

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

УДК 528.88: 551.1502.330.15(9-929.9)

МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2006 г. В. Г. Бондур*, Р. Н. Килер**, С. А. Старченков*, Н. И. Рыбакова*

*Научный центр аэрокосмического мониторинга "Аэрокосмос", Москва

**Directed Technologies, Inc. (DTI), 3601 Wilson Blvd., Suite 650 Arlington, VA 22201

*Тел.: (495)632-16-54; e-mail: vgbondur@online.ru

**Norris_keeler@directedtechnologies.com

Поступила в редакцию 01.08.2006 г.

Приводятся результаты обработки многоспектральных космических изображений поверхности океана, полученных с помощью оптической аппаратуры высокого пространственного разрешения (~2...4 м) при мониторинге загрязнений прибрежных акваторий. Применилась методика, основанная на анализе характеристик относительной изменчивости сигналов в спектральных каналах R , G , B шириной 60–80 нм [3]. При проведении мониторинга использовались также результаты подспутниковых гидрооптических измерений, полученные при помощи аппаратуры АС-9. На основе данных вертикального профилирования спектров поглощения и рассеяния построена биооптическая модель загрязненных вод. Проведено сопоставление результатов обработки многоспектральных космических изображений с результатами анализа подспутниковых гидрооптических и гидрофизических измерений и продемонстрировано их высокое соответствие. В результате обработки многоспектральных изображений выделены гидрооптические аномалии, вызванные интенсивными заглубленными стоками, и определены их геометрические характеристики. Это позволяет использовать разработанную методику обработки при решении задач мониторинга прибрежных областей океана с использованием многоспектральных космических изображений высокого разрешения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из наиболее важных направлений изучения Мирового океана является исследование его прибрежных зон. Это обусловлено тем, что эти области подвергаются интенсивным антропогенным воздействиям, наиболее существенными из которых являются глубинные стоки в океан. Динамика различных процессов в береговой зоне океана, подвергшейся воздействиям такого типа, исследована мало. Методы контактных измерений, хотя и обладают высокой точностью, весьма дороги и не позволяют получить полную картину распределения шлейфов загрязнения на больших пространствах. Поэтому осуществление мониторинга прибрежных акваторий с использованием спутниковых методов и технологий в настоящее время является весьма актуальным [1, 2].

Одним из наиболее перспективных средств дистанционного мониторинга экологического состояния прибрежных акваторий, подвергающихся интенсивным антропогенным воздействиям, является многоспектральная космическая съемка с борта спутников высокого пространственного разрешения [1–3]. Данные, получаемые со спут-

ников, оборудованных многоспектральной аппаратурой, позволяют [1–4]:

– оценивать качество вод в прибрежных зонах и проводить их мониторинг;

– анализировать экологическое состояние акваторий;

– исследовать различные динамические процессы, такие как мезомасштабные вихри, изменчивость фронтальных зон, распространение речных стоков и т.п.;

– определять вариации гидрооптических характеристик, в первую очередь цвета и мутности, за счет флюктуаций коэффициентов рассеяния и поглощения света при изменениях концентрации взвешенных и поглощающих веществ;

– контролировать биологические параметры (состояние фитопланктона и биопродуктивность в океане и др.);

– определять рельеф дна в шельфовых зонах, а также его изменения под воздействием разных процессов и т.п.;

Наряду с многоспектральной космической аппаратурой в настоящее время активно начинают применяться гиперспектральные датчики, позволяющие получать информацию с высоким спек-

тральным разрешением при, сравнительно, невысоком пространственном разрешении [1, 5].

Многоспектральная космическая съемка с высоким и средним пространственным разрешением (при условии проведения синхронных подспутниковых контактных измерений) позволяет определять абсолютные значения ряда характеристик морской среды по измерениям цвета океана (мощности восходящего излучения в узких спектральных интервалах) и проводить анализ пространственно-временной изменчивости этих характеристик [1–3].

Современные спутники с многоспектральной аппаратурой позволяют уже сегодня получать изображения с очень высоким пространственным разрешением (~2...4 м).

Для выделения оптических аномалий водной среды, вызываемых антропогенными воздействиями, необходимо применение специальных методов и алгоритмов обработки космической информации. В настоящей работе предлагается метод выявления слабоконтрастных аномалий водной среды, обусловленных антропогенными воздействиями, основанный на использовании характеристик изменчивости сигналов в спектральных космических каналах высокого пространственного разрешения. На основе применения предлагаемого метода проведен комплексный мониторинг прибрежной акватории бухты Мамала (Гавайи), выделены аномалии, вызванные загубленным стоком, и определены их пространственно-геометрические характеристики.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ, ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ

Для большинства прибрежных акваторий Мирового океана очень остро стоит проблема захоронения (дампинга) отработанных вод. Сбрасываемая вода оказывает существенное антропогенное влияние на экологическое состояние этих районов. В настоящей работе проводились исследования в акватории бухты Мамала, расположенной в южной части о-ва Оаху Гавайского архипелага (рис. 1) [2, 6–8]. В этом же районе расположены всемирно-известные курорты Вайкики (рис. 1, см. вклейку с цветными рис.).

На о-ве Санд создано масштабное очистное сооружение Sand Island Wastewater Treatment Plant (WWTP) мощностью более 300000 м³/сут, имеющее загубленное сбросовое устройство длиной около 3.8 км (рис. 1) [www.hwea.org]. Воздействие такого объема сбрасываемых вод в акваторию бухты на состояние экосистем в районе рекреационной зоны исследовано недостаточно.

При проведении комплексного мониторинга прибрежной зоны о-ва Оаху с целью обнаруже-

ния аномалий водной среды, вызванных таким загубленным стоком, наряду с другими спутниками данными, использовались многоспектральные изображения высокого пространственного разрешения, полученные с космических аппаратов QuickBird и IKONOS [2].

На рис. 2 (см. вклейку с цветными рис.) в качестве примера приведены характеристики спектрального пропускания съемочной аппаратуры спутника QuickBird в синем, зеленом, красном, ближнем инфракрасном и панхроматическом каналах. На рис. 3 (см. вклейку с цветными рис.) в качестве примеров представлены фрагменты исходных космических изображений, полученных 16 августа (время съемки 11:14:52 местн. вр.) и 3 сентября (время съемки 11:15:37 местн. вр.) 2004 г.

Для верификации результатов обработки многоспектральных космических изображений в исследуемой акватории проводились подспутниковые измерения с помощью гидрооптической аппаратуры АС-9 и различной гидрофизической аппаратуры в моменты времени, близкие к моментам космической съемки [2, 6–8]. Спектральные линии, соответствующие центрам спектральных каналов аппаратуры АС-9, приведены на рис. 2. Датчик запускался с корабля "Klaus Wyrtki" с помощью гидравлической лебедки и крана со средней скоростью погружения 0.4 м/с на глубину около 150 м (см. рис. 4 на вклейке с цветными рис.). С помощью аппаратуры АС-9 измерялись значения коэффициентов поглощения ($k, \text{ м}^{-1}$) и ослабления ($\epsilon, \text{ м}^{-1}$) на девяти длинах волн (в спектральном диапазоне от 412 до 715 нм) на станциях (B6), находящихся в районе сбросового устройства. По полученным данным строились вертикальные профили этих коэффициентов для каждой из станций, в которых проводились измерения.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для обработки информации, полученной с помощью аппаратуры АС-9, использовался метод, основанный на линейной биооптической модели Халтрина–Копелевича [9, 10], который позволяет по гидрооптическим данным рассчитывать концентрации примесей (таких как хлорофилл-*a*, РОВ, мелкие и крупные частицы) [9–12].

$$a(\lambda) = aw(\lambda) + Cap(\lambda) + Yay(\lambda),$$

$$b(\lambda) = bw(\lambda) + NPshPs(\lambda) + NP/bPl(\lambda),$$

где $a(\lambda)$ и $b(\lambda)$ – коэффициенты поглощения и рассеяния примеси (м^{-1}); λ – длина волны (нм); $aw(\lambda)$ и $bw(\lambda)$ – коэффициенты поглощения и рассеяния чистой морской воды (м^{-1}); C – суммарная концентрация хлорофилла-*a* ($\text{мг}/\text{м}^3$); Y – концентрация органических веществ, растворенных в воде (у.е.); $ap(\lambda)$ – удельный коэффициент погло-

щения базовой смеси фитопланктона (18 видов) ($\text{м}^2/\text{мг}$): $a_y(\lambda)$ – удельный коэффициент поглощения растворенных в воде органических веществ (м^{-1}); N – число примесей; Ps , Pl – концентрации малых частиц и крупных частиц ($\text{г}/\text{м}^3$); $bPs(\lambda)$ – удельный коэффициент рассеяния малых частиц ($\text{м}^2/\text{г}$); $bPl(\lambda)$ – удельный коэффициент рассеяния крупных частиц ($\text{м}^2/\text{г}$);

Для всех станций, в которых проводились измерения аппаратурой АС-9 по вертикальным профилям спектров коэффициентов поглощения и рассеяния, по этой методике оценивались профили концентрации основных примесей.

Обработка многоспектральных космических изображений высокого пространственного разрешения проводилась с использованием характеристик относительной изменчивости сигналов в красном (R), зеленом (G) и синем (B) спектральных каналах шириной 60–80 нм [3].

Методика обработки заключалась в использовании следующих базовых процедур [1, 3, 13]:

- синтезирование цветного изображения из отдельных спектральных каналов (RGB-синтез);
- дешифрирование изображений для выделения облачного покрова, кораблей и следов их движения, суши и незакрытой облаками морской поверхности;
- выбор фрагментов полного кадра изображения в районе исследования для последующей обработки:
- применение процедур фильтрации;
- применение процедуры декорреляционного растяжения, главной целью которой является устранение коррелированности спектральных каналов;
- применение процедур параметрической и не-параметрической классификации;
- применение процедур объединения классов;
- применение процедур цветокодирования.

Для коррекции яркостных искажений изображений, вызванных неоднородной чувствительностью ПЗС-линейки камеры спутника QuickBird, применялись дополнительные специальные процедуры, заключающиеся в следующем:

- деление изображения на фрагменты на основе анализа результатов предварительной обработки;
- устранение яркостного поперечного тренда в пределах каждой полосы (фрагмента);
- взаимном выравнивании яркости по полосам на основе использования статистических параметров.

С использованием данной методики проводилась обработка многоспектральных изображений, полученных с борта спутников высокого разрешения. Для верификации осуществлялось сопоставле-

ние полученных результатов с результатами обработки подспутниковых данных и делались выводы о правильности проведенной обработки космической информации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ПОДСПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

При проведении мониторинга обрабатывались многоспектральные космические изображения, полученные со спутников IKONOS и QuickBird.

На рис. 5а (см. вклейку с цветными рис.) приведены результаты обработки многоспектральных изображений, полученных со спутника QuickBird 16 августа 2004 г. Как видно из анализа приведенного рисунка, гидрооптическая аномалия водной среды, выделенная по используемой методике, имеет хорошо различимые границы, что позволило провести ее оконтуривание и определить пространственно-геометрические характеристики. Из рис. 5а видно, что гидрооптическая аномалия вытянута с востока на запад и имеет следующие размеры: с севера на юг ~3.5 км, а с востока на запад ~12 км. Наибольшей интенсивности аномалия достигает в 2–2.5 км на юго-восток от окончания сбросового устройства. Приуроченность аномалии к сбросовому устройству свидетельствует о ее антропогенном происхождении.

Результаты обработки многоспектральных изображений, полученных с борта того же спутника 3 сентября 2004 г., приведены на рис. 5б. Как следует из анализа этого рисунка, на поверхности и в приповерхностном слое океана, как и в предыдущем случае, выделена аномалия, обусловленная глубоководным стоком. Анализ рис. 5б показывает, что аномалия имеет относительно четкие границы "варежкообразной" формы [1, 2, 7]. Размеры юго-западного лепестка от окончания Sand Island Outfall составили около 4 км, а юго-восточного около 3 км.

Таким образом, использование предложенной методики обработки многоспектральных космических изображений высокого пространственного разрешения, позволило выделить аномалии, вызванные заглубленным стоком в акваторию бухты Мамала, и определить их пространственные характеристики. При этом следует отметить, что на исходных изображениях до обработки эти аномалии не выделялись.

Для проведения подспутниковых измерений использовались следующие типы аппаратуры:

- аппаратура гидрооптических измерений АС-9;
- аппаратура микроструктурных измерений MSS (Microstructure Sensors);
- аппаратура измерения гидрофизических параметров CTD (Conductivity, Temperature, Depth);

- аппаратура измерений скоростей течений ADP (Acoustic Doppler Profiler);
- аппаратура анализа течений – дрифтеры (Drogues);
- устройство оценки глубины видимости – диск Секки;
- аппаратура измерения уровня океана (станция Honolulu);

Результаты обработки подспутниковых данных приведены на рис. 6–9 (см. вклейку с цветными рис.).

На рис. 6а представлены точки и трассы измерений различных параметров указанными типами аппаратуры (см. легенду), проведенных 16 августа 2004 г. Результаты, полученные при обработке измерений различными датчиками в этот день, представлены на рис. 6б–д: приливной режим (данные предоставлены NOAA) – б; распределение по глубине показателя рассеяния назад (аппаратура MSS, см. легенду) – в; распределение по глубине солености – г и температуры – д (аппаратура CTD, точки измерений В6-1–В6-4); направление и скорость ветра, измеренные корабельными анемометрами на момент съемки, скорость ветра приведена к стандартному горизонту 10 м (а, см. легенду); средние скорости течений на горизонтах 30 м (дрифтер D5, см. легенду), 50 м (дрифтер D2, см. легенду), 90 м (дрифтер D4, см. легенду).

На рис. 7 приведены двумерные распределения коэффициентов поглощения (б), рассеяния (в), ослабления (г), полученные при помощи измерений аппаратурой AC-9 в точках В6-1–В6-4, а также рассчитанные по ним (на основе биооптической модели Халтрина–Копелевича) биологические характеристики: концентрация хлорофилла-*a* (д), концентрация растворенных органических веществ (е) и крупных частиц (ж). Кроме этого, на рис. 7б–ж нанесены результаты измерений глубин видимости, полученные при помощи диска Секки.

Аналогичные подспутниковые измерения были проведены 3 сентября 2004 г. (рис. 8, 9). В этот день, многоспектральная космическая съемка была обеспечена измерениями с помощью прибора AC-9 во всех точках В6-1–В6-7. Кроме того, в отличие от эксперимента, проведенного 16 августа 2004 г., были проведены измерения с помощью аппаратуры ADP в точках ADP-2 и ADP-3 (см. легенду). На рис. 8 представлены точки и трассы подспутниковых измерений различными датчиками (см. легенду), проведенных 3 сентября 2004 г. Результаты обработки данных измерений представлены на рис. 8б–ж: приливной режим (данные предоставлены NOAA) – б; распределение по глубине показателя рассеяния назад (аппа-

ратура MSS, см. легенду) – в; перспективно-векторные диаграммы течений на горизонтах 29.5 м и 49.5 м в точке ADP-2 – г, д; распределение по глубине температуры (е) и солености (ж) (аппаратура CTD, точки измерений В6-1–В6-4); направление и скорость ветра, измеренные корабельными анемометрами на момент съемки, скорость ветра приведена к стандартному горизонту 10 м (а, см. легенду); средние скорости течений на горизонтах 30 м (дрифтер D5, см. легенду), 50 м (дрифтер D2, см. легенду), 90 м (дрифтер D4, см. легенду).

На рис. 9 аналогично рис. 7 представлены двумерные распределения коэффициентов поглощения (б), рассеяния (в), ослабления (г), полученные аппаратурой AC-9 в точках В6-1–В6-7, а также рассчитанные по ним биологические характеристики: концентрация хлорофилла-*a* (д), концентрация растворенных органических веществ (е) и крупных частиц (ж). Как и для 16 августа 2004 г.. на рис. 7б–ж нанесены результаты измерений при помощи диска Секки.

Таким образом, в результате обработки космических изображений и подспутниковых измерений был сформирован набор данных, позволяющих с высокой степенью точности и достоверности оценить воздействие загрязняющих веществ на исследуемую акваторию.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Гидрооптические неоднородности приповерхностного слоя океана, обусловленные заглубленным стоком с Sand Island WWTP в акваторию бухты Мамала, выделенные при обработке многоспектральных изображений, могут быть обнаружены также на основе контактных гидрооптических данных, полученных прибором AC-9 [www.wet-labs.com]. Причем в случае верной интерпретации космических изображений, результаты, полученные дистанционными средствами, должны совпадать с данными контактных измерений.

Многоспектральные изображения, полученные спутником QuickBird, обладая высоким пространственным разрешением, позволяют получать точную информацию о пространственном положении выделяемых гидрооптических аномалий [3]. Такие данные о вертикальных гидрооптических характеристиках получались с помощью аппаратурой AC-9. Нами была применена следующая методика сопоставления:

- граница аномалии, полученная на основании оконтуривания результатов выделения аномалий, обусловленных заглубленным стоком, по многоспектральным изображениям, при помощи ГИС-средств пространственно совмещалась с ломаной,

образованной в результате последовательного соединения точек (B6-1–B6-7), в которых производились гидрооптические измерения аппаратурой AC-9 с корабля "Klaus Wyrki";

– полученная ломаная линия B6-1–B6-7 совмещалась с двумерными изображениями распределения по глубине коэффициентов поглощения, рассеяния и ослабления, рассчитанными по данным измерений прибором AC-9 на длине волны 0.488 мкм;

– производилось совмещение этой линии с результатами расчетов таких параметров, как концентрации хлорофилла, растворенных органических веществ, содержание крупных взвешенных частиц, вычисленных по гидрооптическим данным, а также с результатами, полученными при помощи диска Секки;

– оценивалась степень совпадения границы аномалии, выделенной по космическим изображениям, и по данным, построенным по результатам измерений датчиком AC-9, и с учетом результатов обработки подспутниковых гидрофизических данных делались выводы о правильности выделения аномалии на основе космических данных.

Для сопоставления с результатами обработки спутниковых изображений использовались коэффициенты поглощения и ослабления, полученные по данным AC-9 на длине волны $\lambda = 0.488$ мкм. Такой выбор был обусловлен в первую очередь тем, что для этой длины волны поглощение солнечного света водами Тихого океана в районе Гавайских островов близко к минимуму [14, 15]. Кроме того, спектральный канал датчика AC-9 $\lambda = 0.488$ мкм совпадал с центром синего канала аппаратуры QuickBird. Это наглядно иллюстрируется на рис. 2.

На рис. 6 и 7 в качестве примеров иллюстрируются результаты сопоставления космических, а также подспутниковых гидрооптических и гидрофизических данных, полученных 16 августа 2004 г.

Так как 16 августа 2004 г. измерения при помощи аппаратуры AC-9 проводились лишь в точках B6-1, B6-2, B6-3, B6-4 (см. рис. 7), оценка совпадения границ аномалии, выделенной по многоспектральным изображениям, с подспутниковыми гидрооптическими данными производилась только для восточной зоны аномалии.

Анализ рис. 6 и 7 свидетельствует о хорошем совпадении восточной границы аномалии, выделенной по космическим изображениям, и области повышенных значений коэффициентов рассеяния, поглощения и ослабления, расположенной в слое скачка на глубине около 50 м, выделенной по данным прибора AC-9. При совмещении на горизонтальной плоскости невязка в плановом положении границ аномалий, выделенных по многоспектральным космическим изображениям и под-

спутниковым гидрооптическим данным, достигала величины 200–300 м, что вполне приемлемо.

В связи с этим можно утверждать, что область повышенных значений рассмотренных выше гидрооптических характеристик вызвана заглубленным стоком, что подтверждается также при анализе таких параметров, как концентрация хлорофилла-*a*, растворенных органических веществ и крупных частиц, максимальные значения которых наблюдаются в описанной выше аномальной области (рис. 7).

Измерения диском Секки в точке B6-3 показали, что предельная видимость в этой точке составила в среднем 45.5 м, в то время как в точке B6-7 – 50.47 м. Очевидно, это объясняется тем, что причиной снижения предельной видимости в точке B6-3 является наличие концентрации различных веществ (органика, взвеси и т.п.), содержащихся в сбрасываемых водах, в слое скачка (рис. 7). Значение предельной видимости по диску Секки очень хорошо совпадает с характеристиками, рассчитанными по данным измерений прибором AC-9 – концентрациям хлорофилла-*a*, растворенных органических веществ и крупных частиц (рис. 7) – верхняя граница зоны их повышенных концентраций в слое скачка совпадает со значением, полученным по диску в точке B6-3. Таким образом, анализ данных, полученных при помощи диска Секки, также подтверждает правильность выделения аномалии по многоспектральным космическим изображениям.

Направление перемещения дрифтеров на различных глубинах: D2 – 50 м, D4 – 90 м и D5 – 30 м, показанных на рис. 6, соответствует фазе прилива (рис. 6б) и обуславливает ориентацию и протяженность восточной части гидрооптической аномалии.

Наличие достаточно протяженной западной части аномалии может быть объяснено тем, что эта аномалия образована ранее, на фазе отлива.

Данные, полученные при помощи аппаратуры MSS, в частности рассеяние назад (рис. 6в), демонстрируют наличие области с повышенными значениями рассеяния в направлении на юг от диффузора на расстояние до ~1 км. Глубина залегания этой области – около 50 м, что совпадает с данными AC-9.

В соответствии с данными о глубине всплыивания струи на момент съемки с борта спутника QuickBird 16 августа 2004 г. (11:14), полученными по результатам численного моделирования, глубина всплыивания струи составила ~54 м [16]. Как видно из рис. 7б–ж, демонстрируется очень хорошее соответствие модельных расчетов и данных, полученных при контактных измерениях AC-9 – глубина всплыивания струи соответствует области

максимальных значений коэффициентов рассеяния, поглощения и ослабления, а также рассчитанным по ним значениям концентраций хлорофилла-*a*, растворенных органических веществ и крупных частиц.

Результаты совместного анализа многоспектральных космических и контактных (AC-9) данных, полученных 3 сентября 2004 г., приведены на рис. 8 и 9.

Результаты, полученные при обработке многоспектральных космических изображений, снятых в этот день, так же, как и для 16 августа 2004 г., хорошо совпадают с результатами подспутниковых измерений. Как показал анализ результатов обработки, наблюдается высокая степень совпадения как восточной, так и западной границы аномалии, выделенной по космическим многоспектральным изображениям, с аномалией, выявленной на двумерных распределениях по глубине гидрооптических параметров (коэффициенты рассеяния и ослабления), зарегистрированных аппаратурой AC-9 (рис. 9).

Результаты, полученные при помощи дисков Секки, показали, что в точках B6-3 и B6-5 (вблизи диффузора) предельная видимость составила около 48–51 м, в то время как в точке B6-7 (вдали от диффузора) – 55.5 м. Очевидно, что причина снижения предельной видимости в точках B6-3 и B6-5 – повышенная концентрация различных веществ (органика, взвеси и т.п.), содержащихся в сточных водах, вблизи слоя скачка (рис. 9). Значение предельной видимости по диску Секки также очень хорошо совпадает с характеристиками, рассчитанными по данным измерений AC-9 – хлорофилла-*a*, растворенных органических веществ и крупных частиц (рис. 9 δ , e , $ж$) – верхняя граница зоны их повышенных концентраций совпадает со значениями, полученными по диску в точках B6-3 и B6-5.

Повышенные значения первичных гидрооптических характеристик и рассчитанных концентраций примесей, а также относительно невысокие значения дальностей видимостей, измеренных по дискам Секки, в районе стации B6-1 может быть вызвано влиянием дренажного канала Ала Вай (Ala Wai) (см. рис. 7 и 9).

По данным MSS, полученным 3 сентября 2004 г., глубина залегания аномалии, обусловленной за-глубленным стоком, составляет около 60 м. Это очень хорошо совпадает с данными прибора AC-9 (~58 м).

Направления перемещения дрифтеров на различных глубинах D2 (50 м), D4 (90 м) и D5 (30 м), показанные на рис. 9 $а$, соответствуют фазе прилива и очень хорошо коррелируют с ориентацией скорректированного лепестка восточной части

аномалии, выделенной по многоспектральному космическому изображению.

Эффекты смены направления течений, вызванных приливными явлениями, достаточно хорошо демонстрируются данными ADP2, полученными на горизонтах 29.5 м (рис. 8 $г$), 49.5 м (рис. 8 $д$). В интервале времени с 5 до 12 час LT 3 сентября 2004 г.: направление переноса на горизонте 29.5 м меняется на 180° (с ~300° на ~120°) после смены фазы прилива, в то время как на горизонте 49.5 м (вблизи слоя скачка) смены направления переноса не происходит. Таким образом, в слое скачка в интервал времени с 5 до 12 час сохранялся перенос в направлении ~120°, что и обусловило появление восточного лепестка аномалии, наиболее ярко выделенной по результатам гидрооптических измерений на глубинах ~50...70 м.

Достаточно интенсивное проявление процессов термохалинного расслоения в области глубинного стока выявлено по данным, полученным CTD датчиками при измерениях с борта судна "Klaus Wyrtki" (рис. 8 $е$, $ж$). Область, где наиболее интенсивно проявляются данные эффекты, совпадает с областью максимальных значений параметров, определенных по данным AC-9 (см. рис. 8, 9). Это хорошо согласуется с физическими представлениями и результатами моделирования.

Модельные расчеты глубины всплыvания струи на момент съемки с борта QuickBird 3 сентября 2004 г. (11:16) показали, что этот параметр оказался равен ~53 м [16]. Сопоставление с двумерными распределениями параметров, полученных по данным аппаратуры AC-9 (рис. 9 $б$ – $ж$), показало, что имеется хорошее совпадение модельных расчетов глубины всплыvания струи и области максимальных значений, измеренных коэффициентов рассеяния и ослабления, а также вычисленных значений коэффициентов поглощения, концентраций хлорофилла-*a*, растворенных органических веществ и крупных частиц. При этом показано, что глубина всплыvания струи соответствует верхней границе максимальных значений указанных параметров.

Столь высокое совпадение данных, полученных прибором AC-9 (рис. 9), с результатами, полученными по космическим многоспектральным изображениям высокого пространственного разрешения, позволяют сделать однозначный вывод, что выделенная аномалия вызвана воздействием глубинного стока о-ва Санд.

В ходе комплексного анализа космической и подспутниковой информации также подтверждены, впервые полученные в работе [3], данные об антропогенном воздействии на бухту Мамала и на рекреационную зону Вайкики (Waikiki) еще одного источника – дренажного канала Ала Вай. На-

лучшим образом воздействие данного источника проявилось при анализе измерений, выполненных аппаратурой АС-9. Так, на рис. 9 в районе устья наблюдаются повышение значений таких параметров, как концентрация хлорофилла (рис. 9д) и концентрации РОВ (рис. 9е), что вызвано сбросом из дренажного канала.

Таким образом, комплексный анализ полученной информации позволил однозначно интерпретировать результаты обработки многоспектральных космических изображений, полученных при мониторинге антропогенных воздействий на водную среду, обусловленных заглубленными стоками и сбросами из дренажных каналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе изложены результаты исследований, проведенных с использованием многоспектральных космических изображений высокого пространственного разрешения, а также гидрооптических и гидрофизических данных, полученных при мониторинге прибрежных акваторий, подверженных антропогенным воздействиям.

Показано, что возможности многоспектральной космической аппаратуры высокого пространственного разрешения (~2...4 м) и примененная методика обработки позволяют исследовать мелкомасштабную изменчивость океана на значительных площадях в пределах слоя формирования яркости морской среды.

Комплексный анализ результатов обработки многоспектральных космических изображений высокого пространственного разрешения, а также подспутниковых гидрооптических данных показал, что размеры и направления распространения аномалий гидрооптических характеристик, выделенных по многоспектральным изображениям, практически совпадают с пространственными распределениями полей первичных гидрооптических параметров и производных характеристик (концентрации хлорофилла-*a*, растворенного органического вещества, крупных и мелких частиц и др.), полученных прибором АС-9.

Сопоставление и анализ спутниковых и подспутниковых (гидрооптических и гидрофизических) данных позволили провести валидацию результатов обработки многоспектральных космических изображений высокого пространственного разрешения и подтвердить их высокую эффективность при мониторинге прибрежных акваторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Физика. Химия. Биология. М.: Наука, 2004. Т. 1. С. 55–117.
2. Bondur V.G. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // Proc. of 31 Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, St. Petersburg, 2005.
3. Бондур В.Г., Зубков Е.В. Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многоспектральным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
4. Копелевич О.В., Буренков В.И. и др. Оптические методы в океанологии и морской геологии // Новые идеи в океанологии. Физика. Химия. Биология. М.: Наука, 2004. Т. 1. С. 55–117.
5. Grace Chang, Kevin Mahoney, Amanda Briggs et al. The new age of hyperspectral oceanography // Oceanogr. 2004. P. 22–29.
6. Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Technology. April, 2004. P. 53–58.
7. Keeler R., Bondur V., Gibson C. Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L12610, doi: 10.1029/2005GL022390.
8. Bondur V., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // Proc. of 31 Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. St. Petersburg, 2005.
9. Kopelevich O.V. Small-Parameter Model of Optical Properties of sea water. Chapter 8 // Ocean Optics, V. 1: Physical Ocean Optics / Ed. A.S. Monin. M.: Nauka Publishers, 1983.
10. Haltrin V.I., Kattawar G.W. Self-consistent solutions to the equation of transfer with elastic and inelastic scattering in oceanic optics: I. Model // Applied Optics. 1993. V. 32. № 27. P. 5356–5367.
11. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Applied Optics. 1997. V. 36. P. 8710–8723.
12. Buiteveld H.J., et al. The optical properties of pure water // Ocean Optics XIII, SPIE 2258. 1994. P. 174–183.
13. Бондур В.Г., Старченков С.А. Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. ВУЗов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 1. С. 118–146.
14. Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 249 с.
15. Иванов А.П. Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975. 504 с.
16. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Журбас В.М. Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006. № 6.

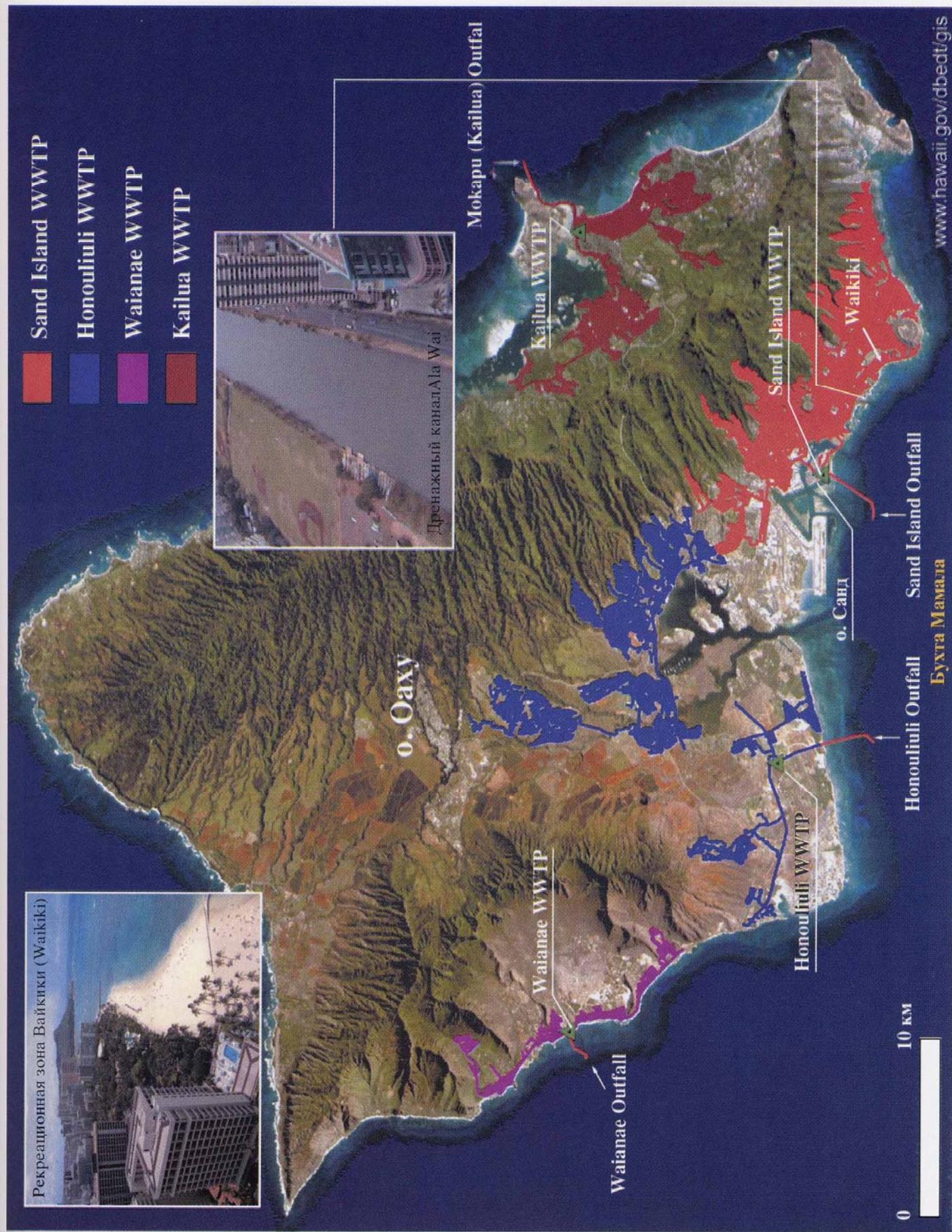
Monitoring of the Pollution of the Ocean Coastal Water Areas Using Space Multispectral High Resolution Imagery

V. G. Bondur*, R. N. Keeler**, S. A. Starchenkov*, N. I. Rybakova*

**Scientific Center of Aerospace Monitoring "AEROCOSMOS", Moscow;*

***Directed Technologies, Inc.(DTI), Arlington, U.S.A.*

The results of processing ocean multispectral high resolution space imagery ($\sim 2\ldots 4$ m) of the ocean surface, obtained for the purpose of monitoring of the pollution coastal water areas are presented. We applied the image processing method based on analysis of the comparative variability signal characteristics of moderate spectral within 60–80 nm width *R, G, B* channels [3]. Subsatellite hydrooptical AC-9 measurement results are also used during monitoring. Biooptic model for polluted waters are created on the base of vertical profiling absorption and scattering spectrum. Analysis results both of multispectral space images and subsatellite hydrooptical and hydrophysical measurements showed their high correspondence. Hydrooptical anomalies caused by intensive submerged discharge are marked out with their geometric parameters as a result of processing ocean multispectral images. This method can be used for the solution of various issues of the monitoring littoral ocean regions using space multispectral high resolution imagery.



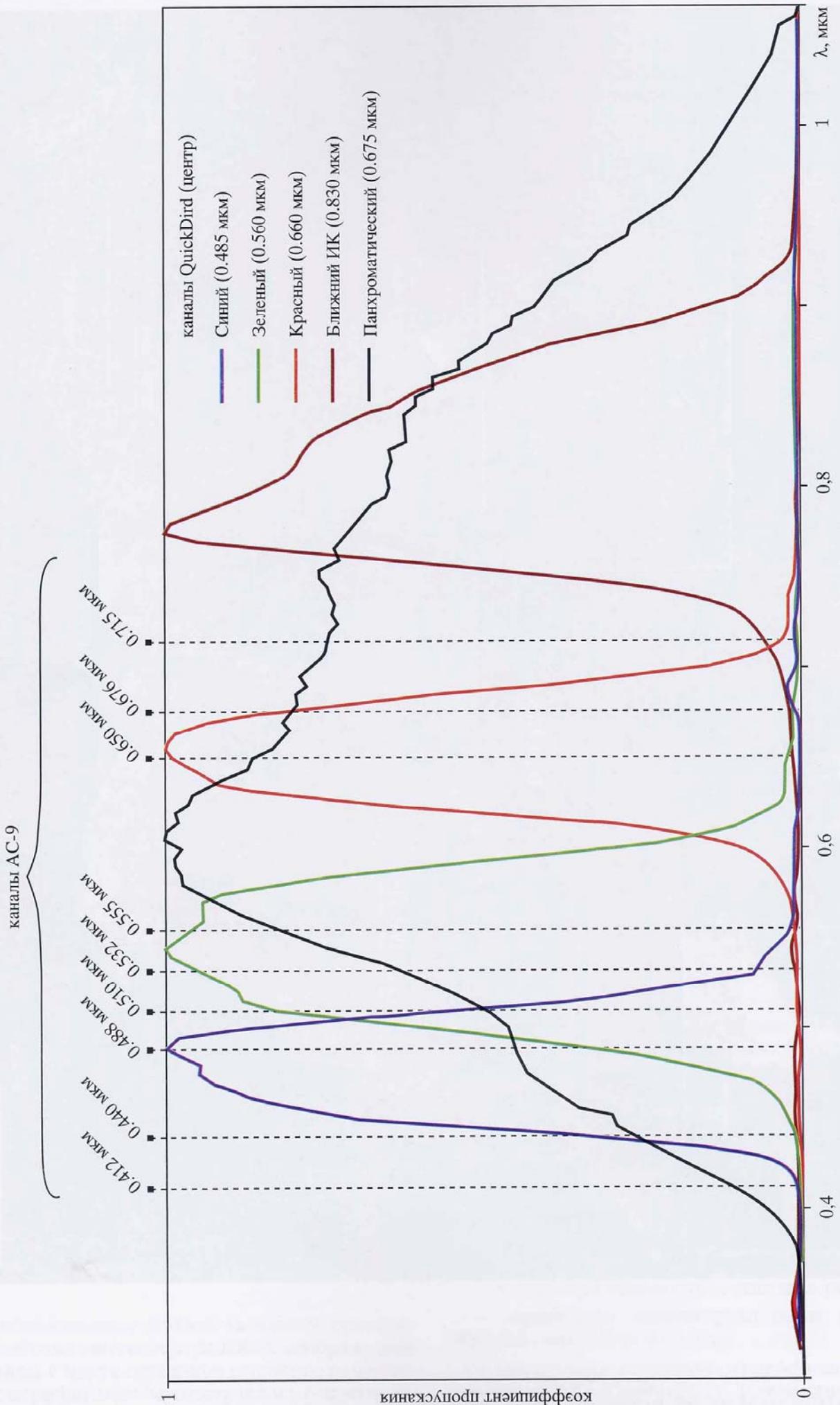


Рис. 2. Спектральные характеристики каналов аппаратуры спутника QuickBird (www.digitalglobe.com) и каналы аппаратуры AC-9 (www.wetlabs.com), предназначенный для подспутниковых гидрооптических измерений.

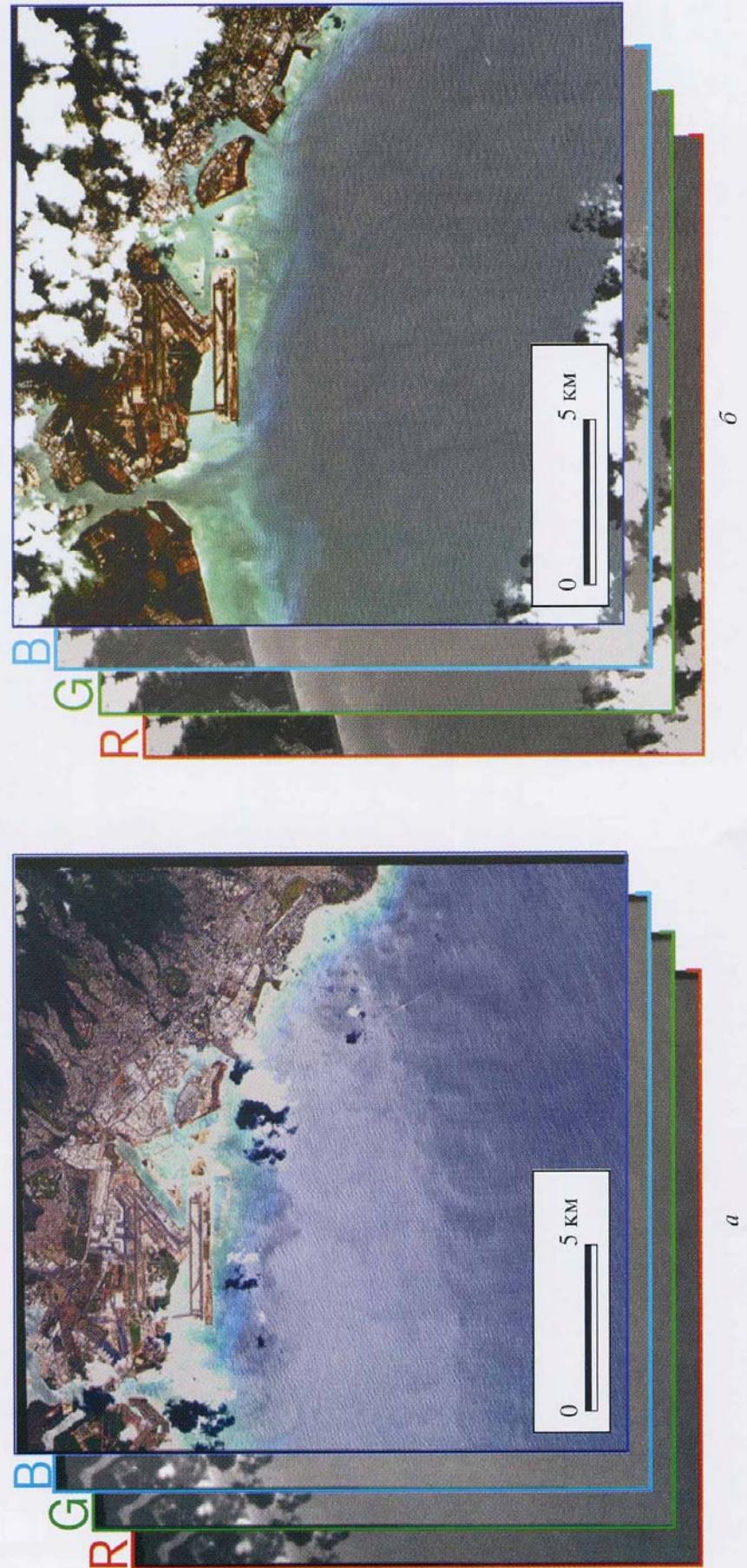
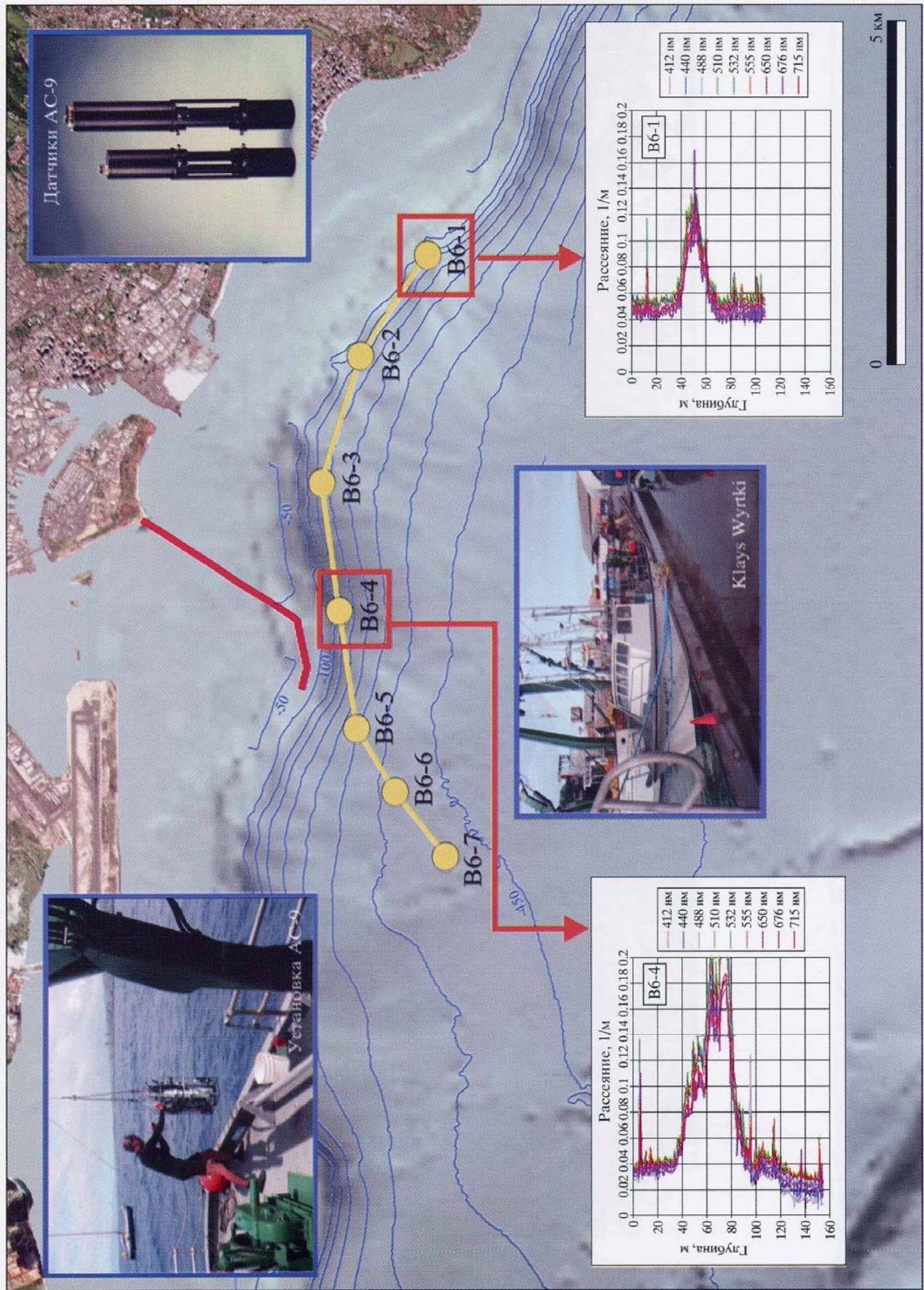
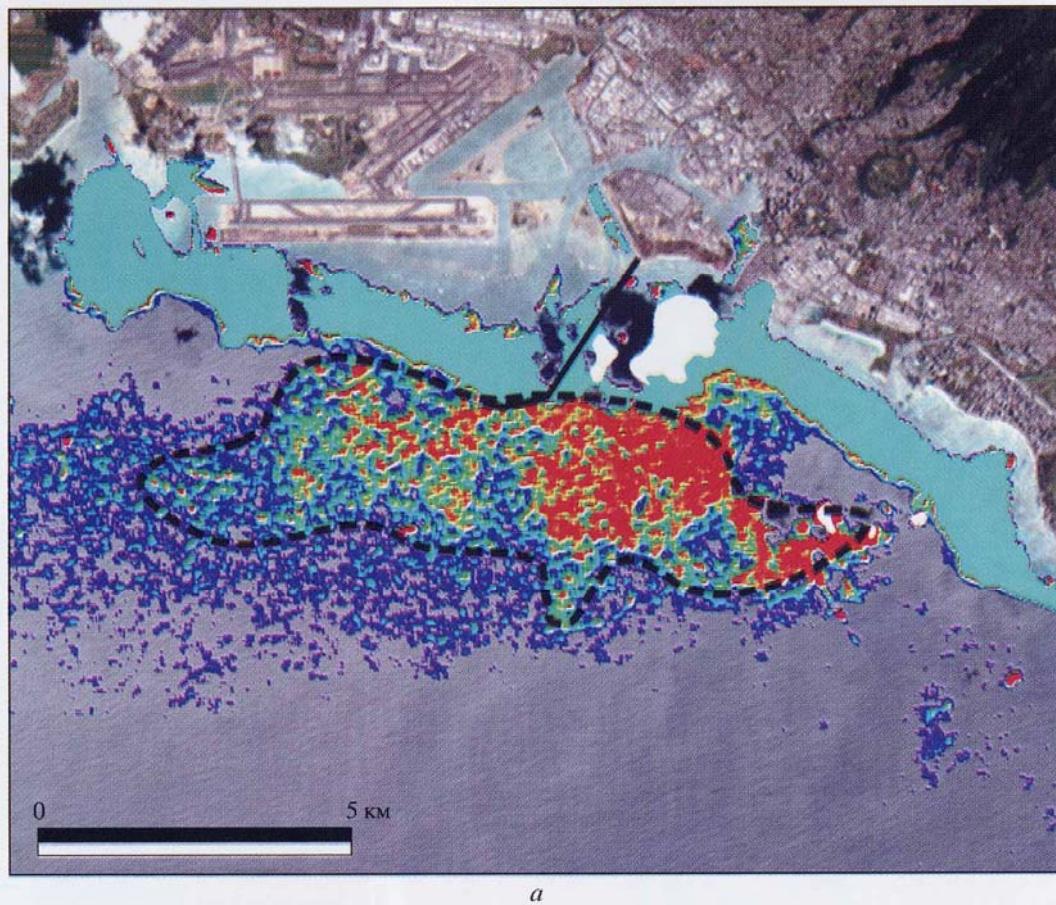
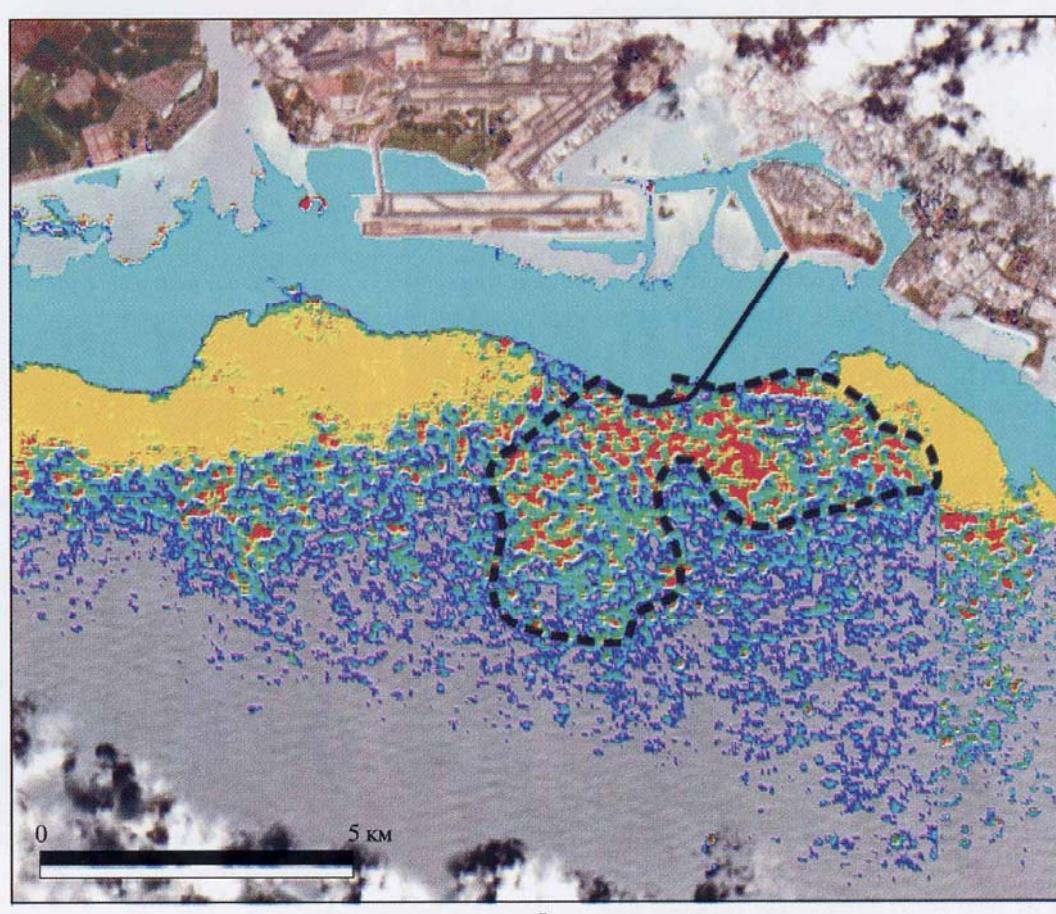


Рис. 3. Исходные изображения, полученные при съемке с борта спутника QuickBird 16 августа (а) и 3 сентября (δ) 2004 г.





a



б

Рис. 5. Выделение и оконтуривание оптической аномалии по результатам обработки изображений, полученных спутником QuickBird 16 августа (а) и 3 сентября (б) 2004 г.

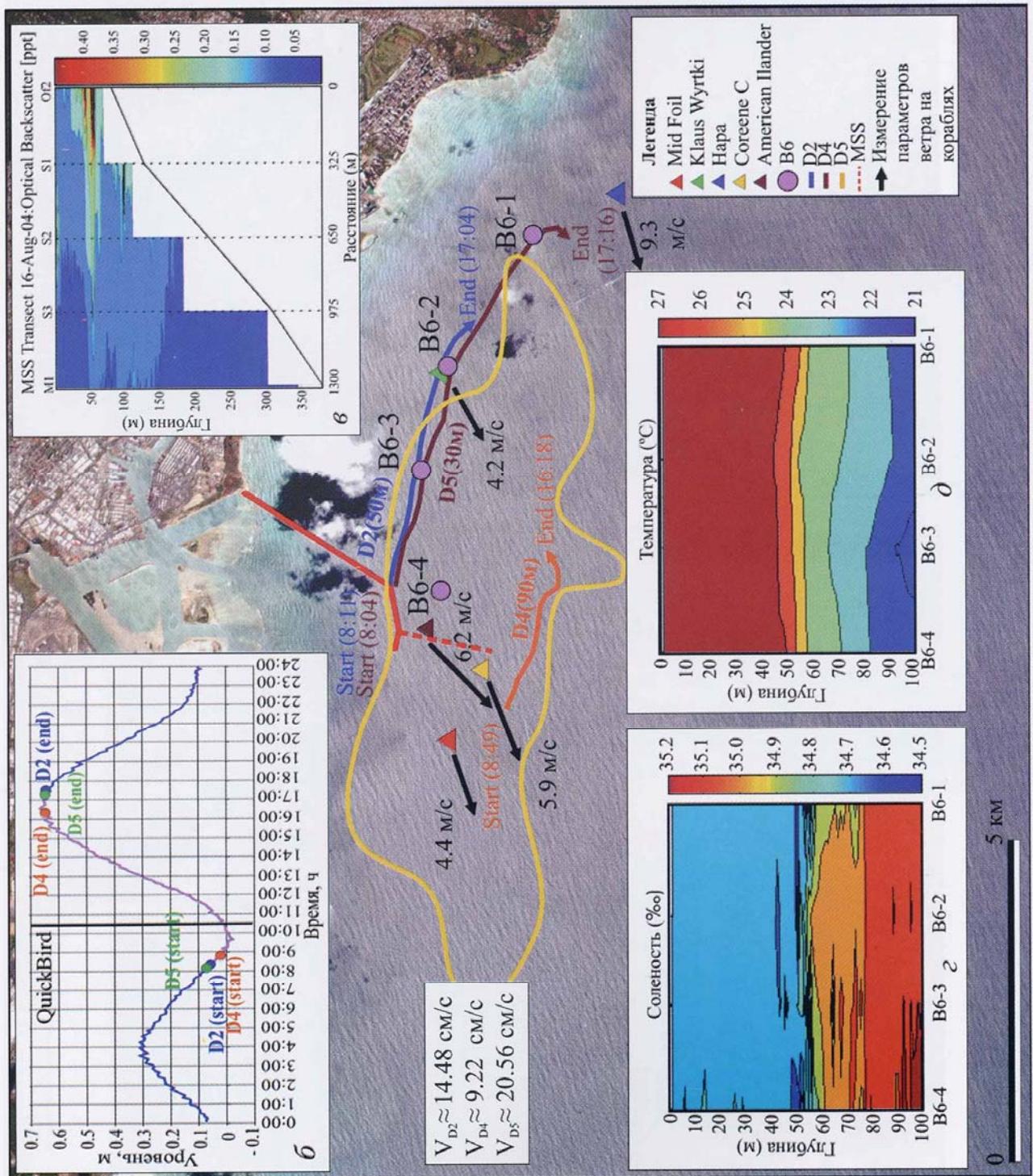


Рис. 6. Результаты комплексного сопоставления аномалии, выделенной по данным, полученным спутником QuickBird 16 августа 2004 г., с данными, полученными различными датчиками: *a* – схема проведения комплексных исследований; *b* – приливной режим; *в* – обратное рассеяние по данным MSS; *г* – двумерный профиль солености по результатам измерений СТД в точках измерений СТД в точках B6-1 – B6-4.

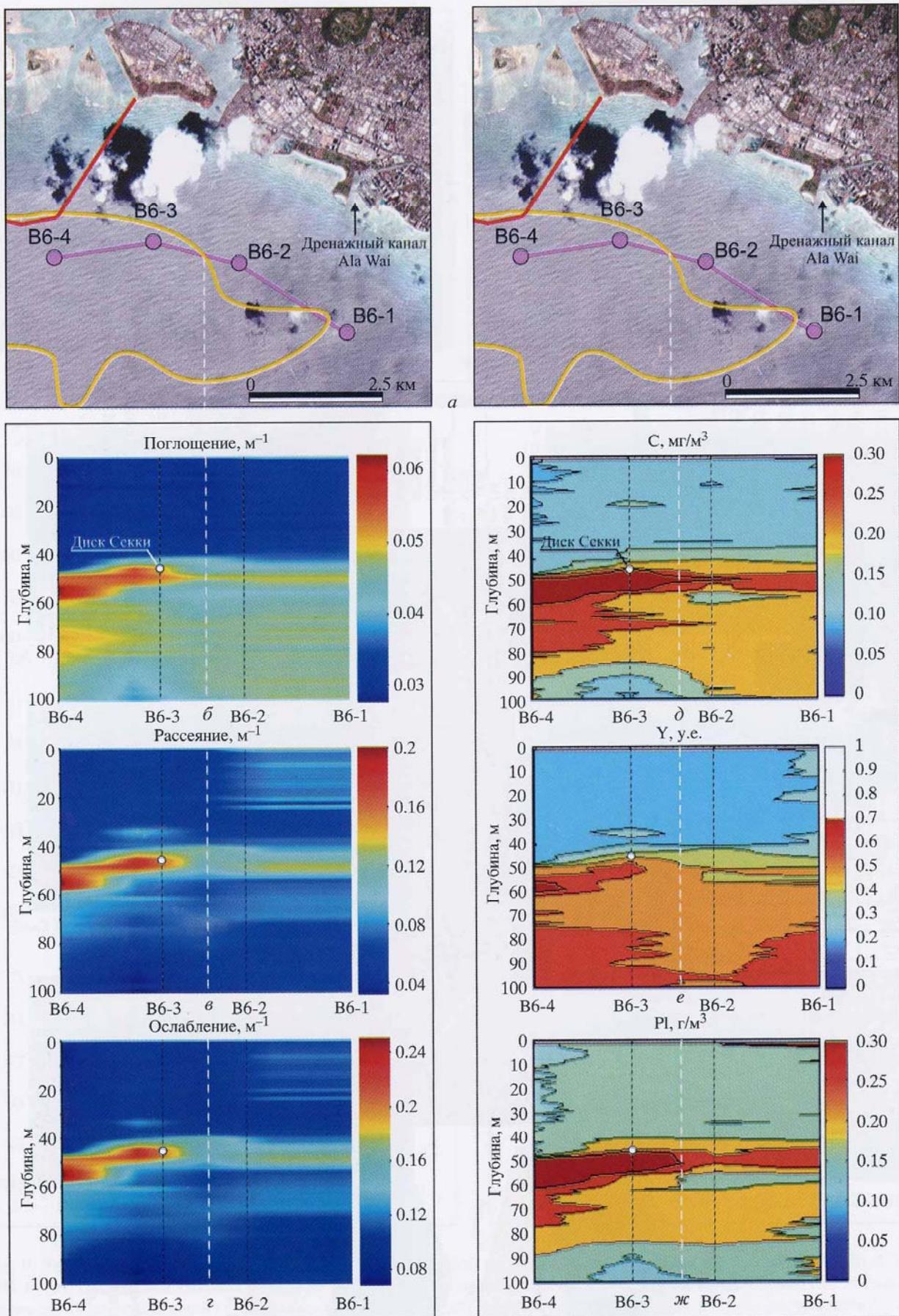


Рис. 7. Результаты сопоставления аномалии, выделенной по данным, полученным спутником QuickBird 16 августа 2004 г. (а), с данными гидрооптических измерений: двумерные сечения значений коэффициентов поглощения (δ), рассеяния (β) и ослабления (γ) на длине волны 0,488 мкм; концентрации хлорофилла-*a* (δ), растворенного органического вещества (ϵ) и крупных частиц (ζ), построенных по результатам измерений прибором АС-9; предельные оценки видимости по диску Секки (β - ζ).

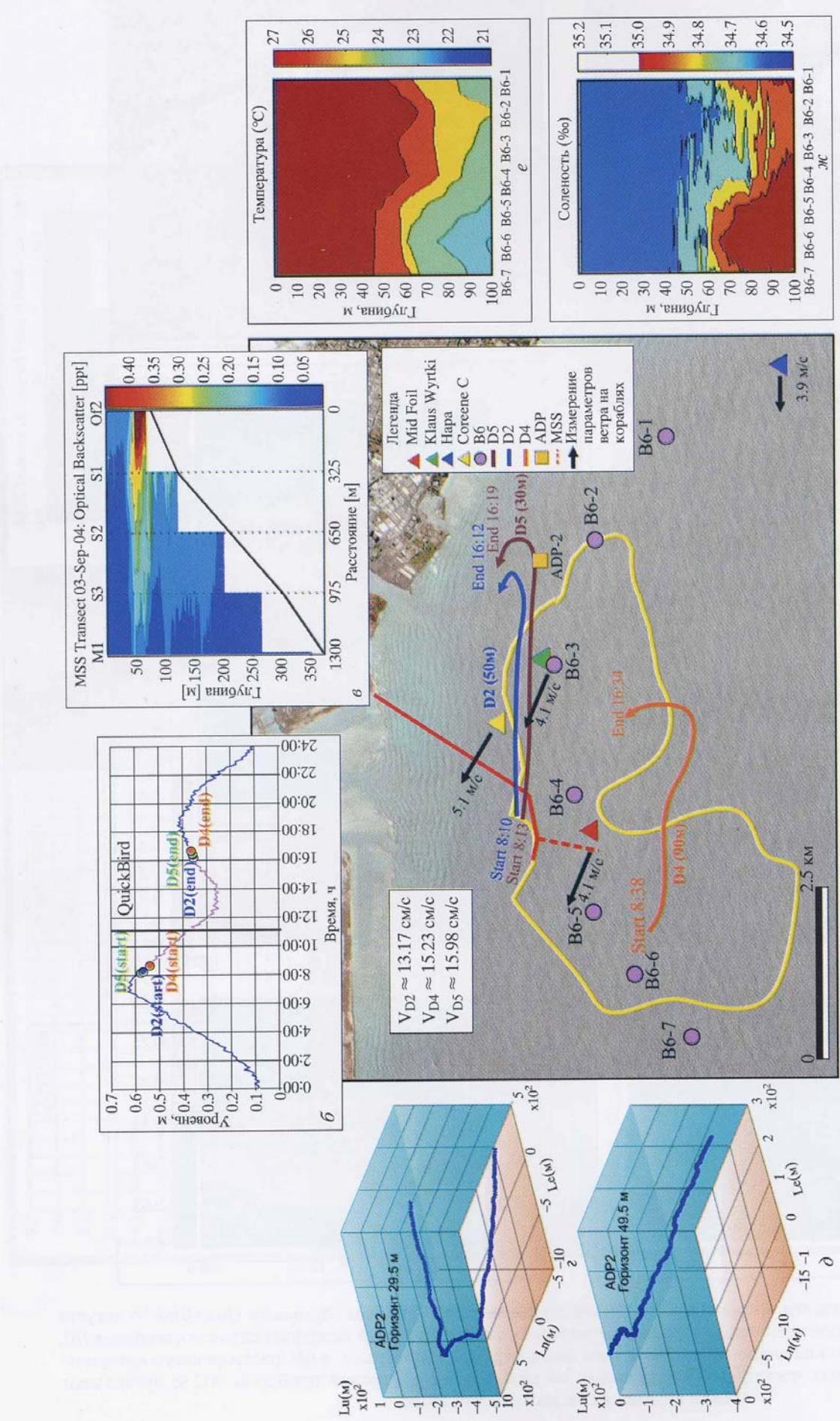
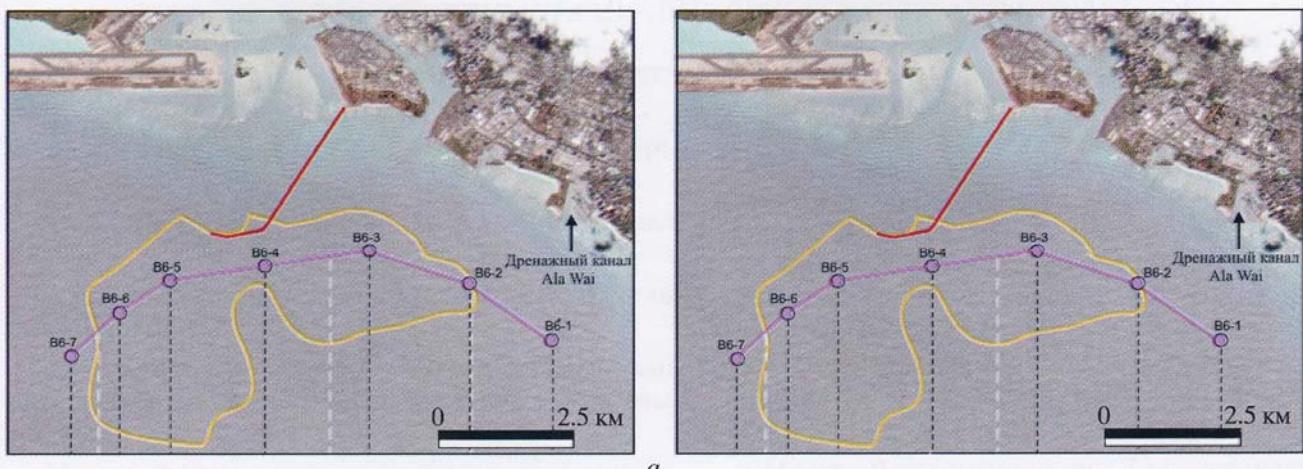


Рис. 8. Результаты комплексного сопоставления аномалии, выделенной по данным, полученным спутником QuickBird 3 сентября 2004 г., с данными, полученными различными датчиками: *a* – схема проведения комплексных исследований; *b* – приливной режим; *c* – обратное рассеяние по данным MSS; *d* – прогрессивно-векторные диаграммы, построенные по данным, полученным ADP2 с 5 до 12 (LT); *e* – двумерный профиль солености по результатам измерений СТД в точках B6-1 – B6-7. ∂ – двумерный профиль температуры по результатам измерений СТД в точках B6-1 – B6-7.



a

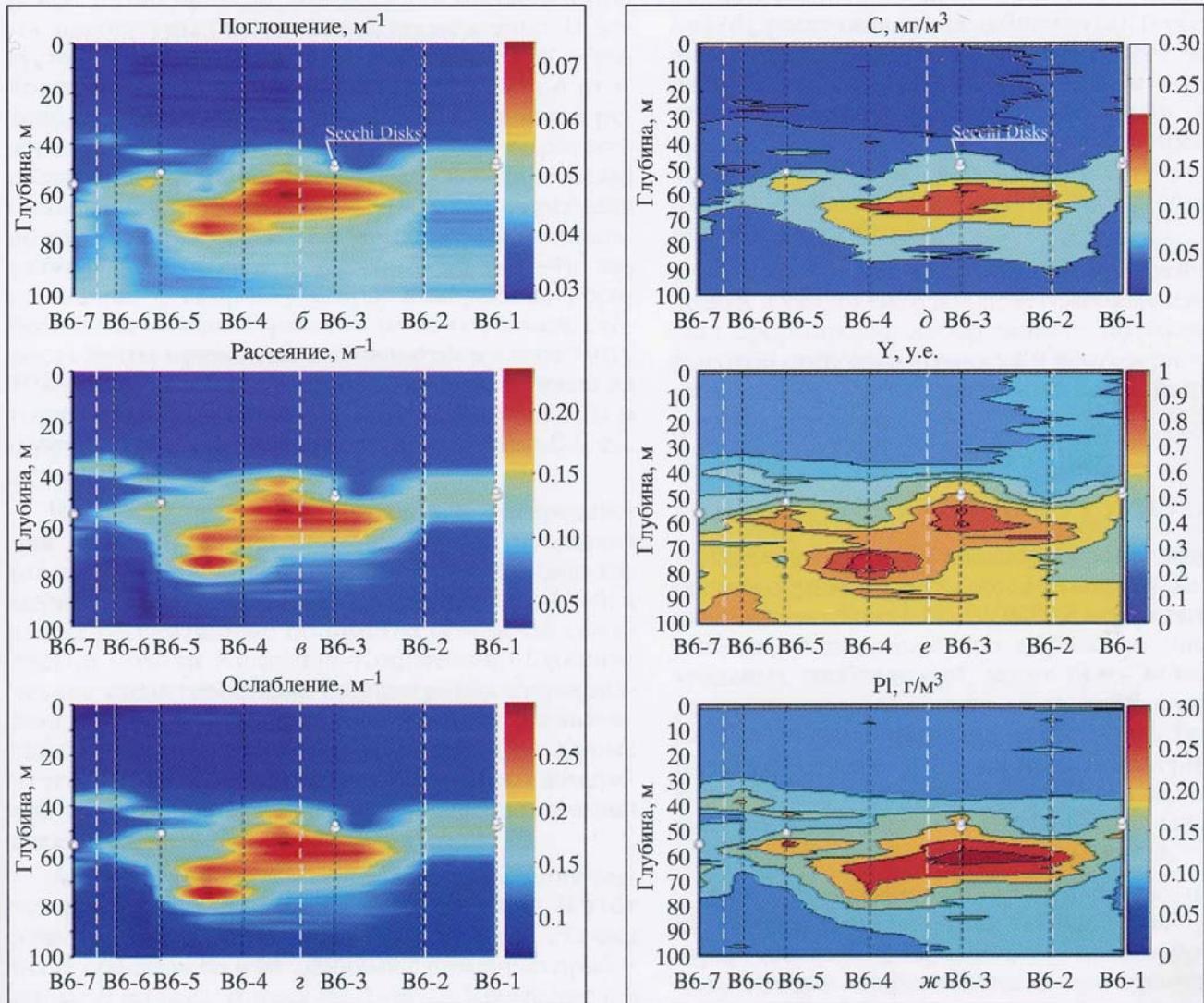


Рис. 9. Результаты сопоставления аномалий, выделенной по данным, полученным спутником QuickBird 3 сентября 2004 г. (а), с данными гидрооптических измерений: двумерные сечения значений коэффициентов поглощения (б), рассеяния (в) и ослабления (ж) на длине волны 0,488 мкм; концентрации хлорофилла-*a* (д), растворенного органического вещества (е) и крупных частиц (ж), построенных по результатам измерений прибором АС-9; предельные оценки видимости по диску Секки (б–ж).