

Выделение гидрооптических неоднородностей морской среды, связанных с антропогенными воздействиями, по многоспектральным космическим изображениям высокого разрешения

В.Г. Бондур, С.А. Старченков

*Научный центр аэрокосмического мониторинга "Аэрокосмос"
105064, Москва, Гороховский пер., 4
E-mail : ygbondur@online.ru*

Приводятся результаты обработки многоспектральных космических изображений высокого пространственного разрешения, полученных при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории у г. Гонолулу (Гавайи, США). В результате обработки таких изображений по специально разработанной методике были выделены гидрооптические аномалии, вызванные интенсивными загубленными стоками, и определены их геометрические характеристики. Проведено сопоставление космических данных с данными гидрооптических контактных измерений и продемонстрировано высокое соответствие результатов измерений *in situ* и результатов обработки космических изображений. Это позволяет использовать разработанную методику при решении задач мониторинга прибрежных областей Мирового океана с использованием многоспектральных космических изображений высокого разрешения.

Введение

Осуществление мониторинга морей и океанов в настоящее время трудно представить без использования спутниковых методов и технологий [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 спутников, оборудованных многоспектральной аппаратурой, позволяют [1-4]:

- оценивать качество вод в прибрежных зонах и проводить их мониторинг;
- 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 флуктуаций коэффициентов рассеяния и поглощения света при изменениях концентрации взвешенных и поглащающих 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 спектральным 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 получать изображения с очень высоким пространственным разрешением. Так, аппаратура спутника IKONOS обеспечивает получение изображений в четырех спектральных каналах (0.48 мкм, 0.55 мкм, 0.67 мкм, 0.81 мкм) с пространственным разрешением около 3.2 метра (в надир), а камера спутника QuickBird позволяет получать в четырех каналах (0.49 мкм, 0.56 мкм, 0.66 мкм, 0.83 мкм) изображения с разрешением около 2.4 м (в надир).

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 каналах изображений, полученных при помощи аппаратуры спутников QuickBird и IKONOS. На основе применения предлагаемого метода выделены аномалии, вызванные заглубленным стоком в акваторию бухты Мамала (Гавайи) и определены их пространственно-геометрические характеристики.

Основные характеристики объекта исследования, особенности получения и обработки данных

Исследования, результаты которых описаны в настоящей работе, проводились в акватории бухты Мамала, расположенной в южной части острова Оаху Гавайского архипелага [2, 6-8]. Для акваторий у Гавайских островов, как и для большинства прибрежных акваторий Мирового океана, очень остро стоит проблема захоронения (дампинга) отработанных вод. На наиболее населенном из островов Гавайского архипелага - о. Оаху, где расположена столица штата Гавайи г. Гонолулу (City and County of Honolulu), проживает около 900000 человек. Наибольшая плотность населения характерна для южной части острова Оаху, для восточного (районы Downtown, Waikiki, Ala Moana-Kakaako и др.) и западного (район Ewa) берегов бухты Мамала [www.co.honolulu.hi.us]. Единственным путем захоронения отходов (в частности, жидких), для такого островного региона и такого крупного города, как Гонолулу, является их сброс в океан (после предварительной очистки) по заглубленным трубопроводам (рис. 1).

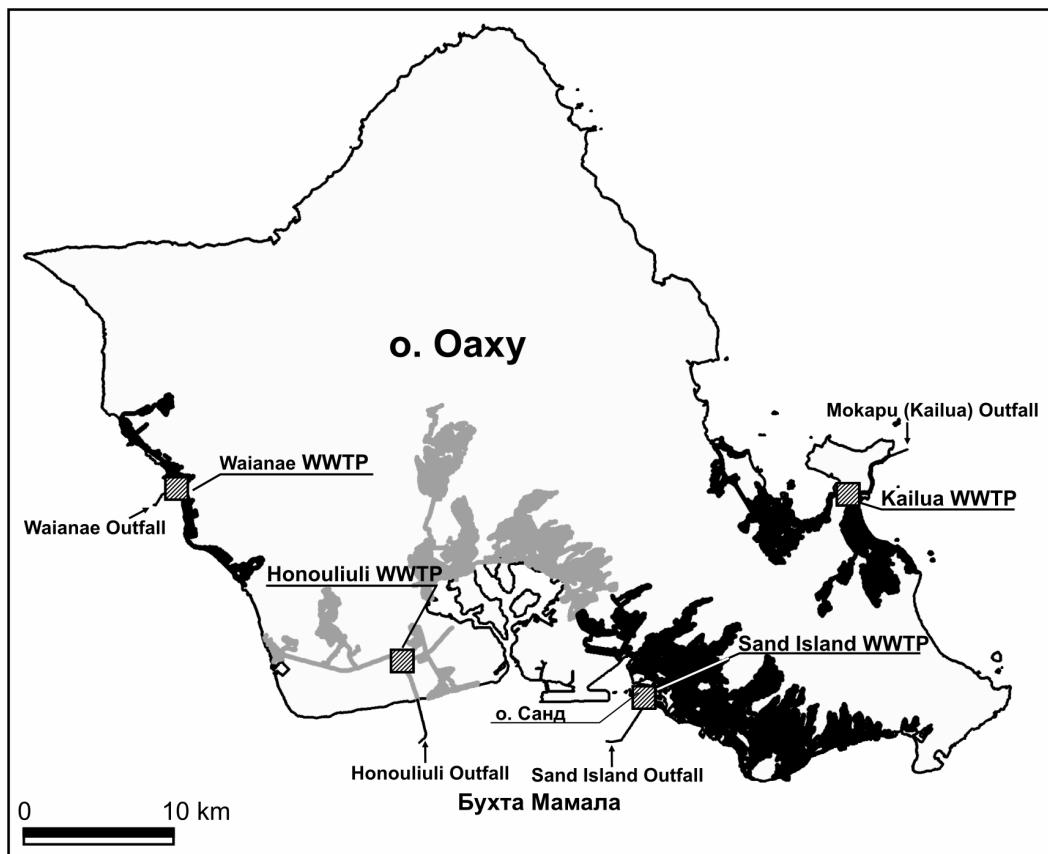


Рис. 1. Схема расположения очистных сооружений сбрасываемых вод (о. Оаху), имеющих подводные устройства сброса, и зоны их обслуживания

В связи с этим, в Гонолулу на острове Санд создано масштабное очистное сооружение Sand Island Wastewater Treatment Plant (WWTP) мощностью более 300000 м³/сутки, имеющее заглубленное сбросовое устройство длиной около 3.8 км (рис. 1) [www.hwea.org].

При проведении комплексного мониторинга прибрежной зоны о. Оаху с целью обнаружения аномалий водной среды, вызванных таким заглубленным стоком, наряду с другими, использовались космические изображения высокого пространственного разрешения, полученные спутниками QuickBird и IKONOS [2]. На рис. 2, в качестве примера, приведены спектральные характеристики съемочной аппаратуры, установленной на борту спутника QuickBird. На этом рисунке показано спектральное пропускание в синем, зеленом, красном, ближнем инфракрасном и панхроматическом каналах камеры спутника QuickBird. На рис. 3, в качестве примеров, представлены исходные космические изображения и выделены фрагменты, используемые для тематической обработки. Представленные изображения получены с борта спутника QuickBird 16 августа (время съемки 11:14:52 по местному времени) и 3 сентября (время съемки 11:15:37 по местному времени) 2004 г.

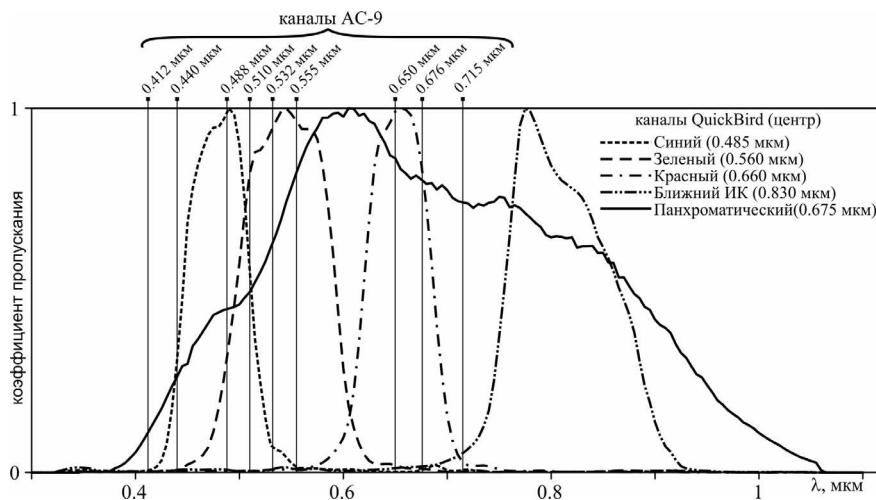


Рис. 2. Спектральные характеристики каналов аппаратуры спутника QuickBird (www.digitalglobe.com) и каналы аппаратуры AC-9 (www.wetlabs.com), предназначенной для подспутниковых гидрооптических измерений

Для верификации результатов обработки многоспектральных космических изображений в акватории бухты Мамала 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 исследовательского корабля на глубину до 150 м. С помощью аппаратуры АС-9 измерялись значения коэффициентов поглощения κ (м⁻¹) и ослабления ϵ (м⁻¹) на девяти длинах волн (см. рис. 2) в шести точках (станциях), находящихся в районе сбросового устройства.

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, 9, 10]:

- 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 непараметрической 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:

- делении изображения на фрагменты на основе анализа результатов предварительной обработки;
- устранении 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 спутника QuickBird. Для верификации осуществлялось сопоставление полученных результатов с результатами обработки подспутниковых данных и делались выводы о правильности проведенной обработки космической информации.

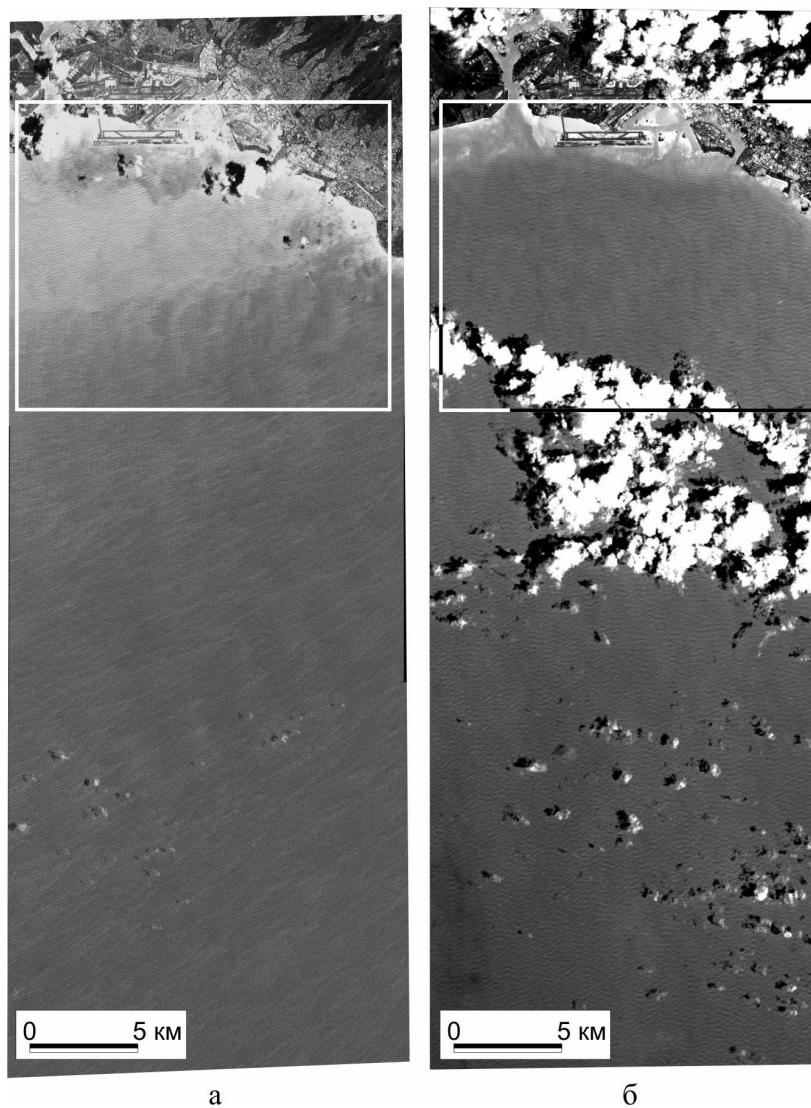


Рис. 3. Исходные изображения, полученные при съемке с борта спутника QuickBird 16 августа (а) и 3 сентября (б) 2004 года (рамками показаны фрагменты, выбранные для тематической обработки)

Результаты обработки многоспектральных изображений, полученных со спутника QuickBird, и их анализ

На рис. 4 а, в качестве примера, приведены результаты обработки многоспектральных изображений, полученных для исследуемой акватории спутником QuickBird 16 августа 2004 года. Как видно из анализа приведенного рисунка, гидрооптическая аномалия водной среды, выделенная по используемой методике, имеет хорошо различимые границы, что позволило провести её оконтурирование и определить пространственно-геометрические характеристики. Из рисунка 4а 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 её антропогенном происхождении.

Результаты обработки многоспектральных изображений, полученных с борта спутника QuickBird 3 сентября 2004 года, приведены на рис. 4 б. Как следует из анализа этого рисунка, на поверхности и в приповерхностном слое океана также выделена аномалия, обусловленная глубоководным стоком. Анализ рис. 4 б 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.

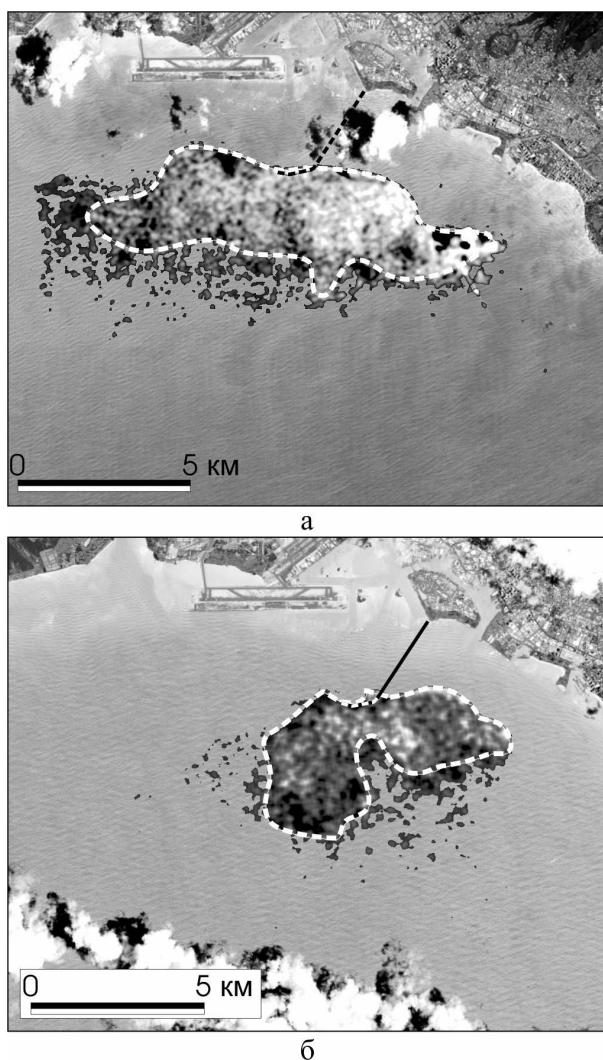


Рис. 4. Выделение и оконтурирование оптической аномалии по результатам обработки изображений, полученных спутником QuickBird 16 августа (а) и 3 сентября (б) 2004 года

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

Сопоставление результатов обработки многоспектральных космических изображений и подспутниковых данных

Гидрооптические неоднородности приповерхностного слоя океана, вызванные загубленным 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.wetlabs.com]. Причем, в случае верной интерпретации космических изображений, результаты, полученные дистанционными средствами, должны совпадать с данными контактных измерений.

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 к этой длине волны поглощение солнечного света водами Тихого океана в районе Гавайских островов близко к минимуму [11, 12]. Кроме того, спектральный канал датчика AC-9 $\lambda=0.488$ мкм совпадает с центром синего канала аппаратуры QuickBird. Это наглядно иллюстрируется на рис. 2.

На рис. 5 а-в, в качестве примера, иллюстрируются результаты сопоставления космических и подспутниковых гидрооптических данных, полученных 16 августа 2004 г.

В этот день измерения при помощи аппаратуры AC-9 проводились в точках B6-1, B6-2, B6-3, B6-4 (см. рис. 5 а). Поэтому оценка совпадения границ аномалии, выделенной по многоспектральным изображениям, с подспутниковыми гидрооптическими данными производилась только для восточной зоны аномалии.

Анализ рис. 5 а-в свидетельствует о хорошем совпадении восточной границы аномалии, выделенной по космическим изображениям, и области повышенных значений коэффициентов 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 подспутниковым гидрооптическим данным, достигает величины 200-300 м, что вполне приемлемо.

Результаты совместного анализа космических (спутник QuickBird) и контактных (AC-9) данных, полученных 3 сентября 2004 года, приведены на рис. 5 г-е. В этот день, космическая съемка была обеспечена измерениями с помощью прибора AC-9 во всех точках B6-1 – B6-7.

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 (рис. 5 г-е), с аномалией, выявленной на двумерных распределениях по глубине гидрооптических параметров (коэффициенты рассеяния и ослабления), зарегистрированных аппаратурой AC-9 (рис. 5 д, е). Расхождения в плане составляли около 100-200 м.

Столь высокое совпадение данных, полученных прибором AC-9 (рис. 5 а-е), с результатами, полученными по космическим многоспектральным изображениям высокого пространственного разрешения, позволяют сделать однозначный вывод, что выделенная аномалия вызвана воздействием сточных вод.

Следует подчеркнуть, что область максимальных значений и других параметров, определенных по данным прибора AC-9, расположенная на глубине около 55-60 м, с очень высокой точностью совпадает в плане с областью наибольшей интенсивности проявления аномалии, выделенной по космическому изображению (рис. 5 д-е).

Таким образом, комплексный анализ полученной информации позволил однозначно интерпретировать результаты обработки многоспектральных космических изображений, полученных при мониторинге антропогенных воздействий на водную среду, обусловленных загруженными стоками.

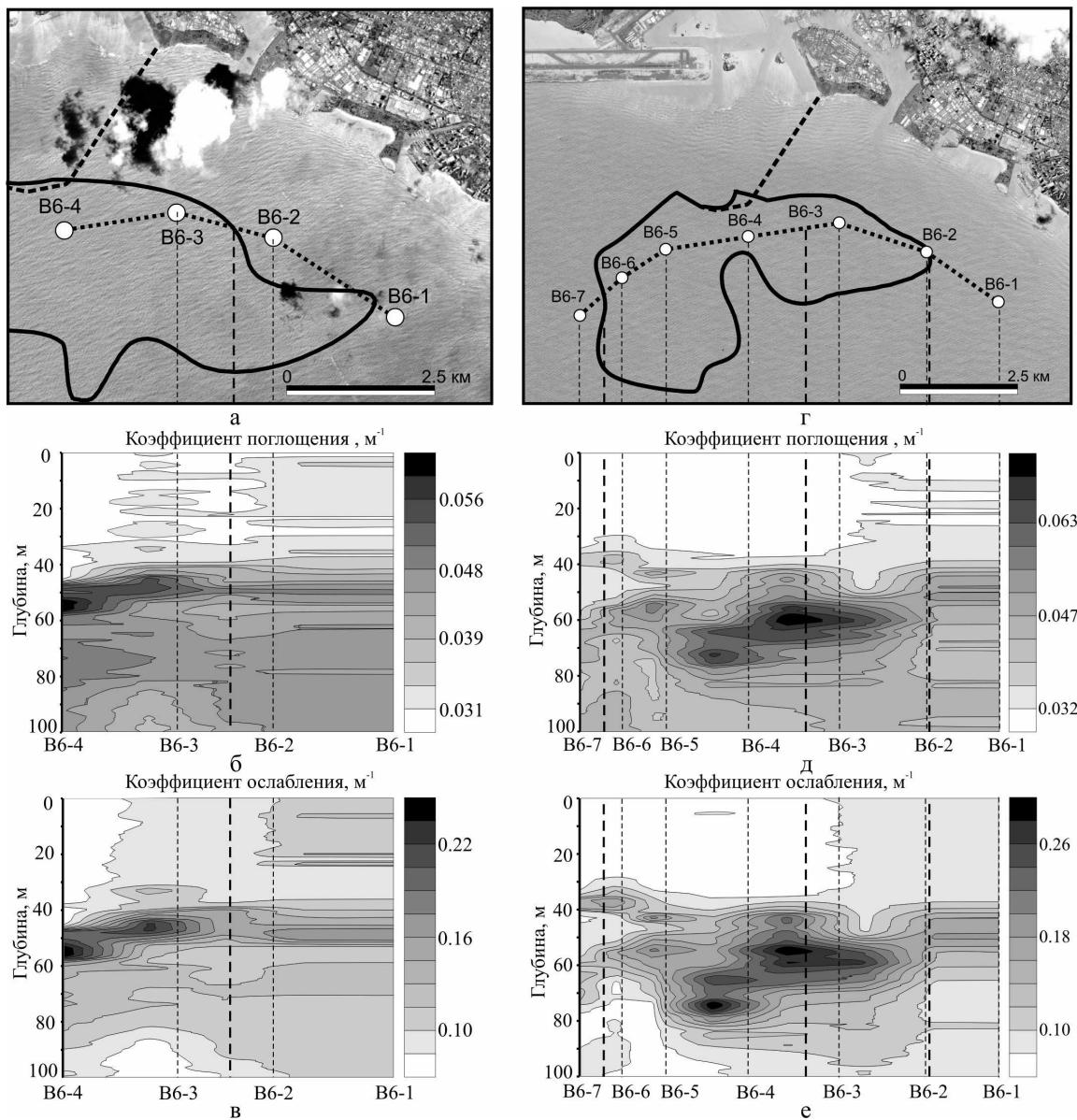


Рис. 5. Результаты сопоставления аномалии, выделенной по данным, полученным спутником QuickBird 16 августа (а) и 3 сентября (г) 2004 г., с данными соответствующих гидрооптических измерений: двумерные сечения значений коэффициентов поглощения (б, д) и ослабления (в, е) на длине волны 0.488 мкм

Заключение

В представленной работе изложены результаты обработки и анализа многоспектральных космических изображений высокого пространственного разрешения, а также подспутниковых гидрооптических данных, полученных при мониторинге прибрежных акваторий, подверженных антропогенным влияниям.

Показано, что возможности многоспектральной аппаратуры высокого пространственного разрешения и используемая методика обработки позволяют исследовать мелкомасштабную

изменчивость приповерхностного слоя океана на значительных площадях и выявлять ареалы распространения загрязнений.

Комплексный анализ результатов выполненной обработки, показал, что размеры и направления распространения аномалий гидрооптических характеристик, выделенных по многоспектральным космическим изображениям, практически совпадают с пространственными распределениями полей первичных гидрооптических параметров, полученных погружающим прибором АС-9. Сопоставление и анализ спутниковых и подспутниковых данных позволили провести валидацию результатов обработки многоспектральных космических изображений высокого пространственного разрешения.

Литература

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. 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 // Исследование 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. Т.1. Физика. Химия. Биология. М.: Наука, 2004. С. 55-117
5. Grace Chang, Kevin Mahoney, Amanda Briggs et al. The new age of hyperspectral oceanography // Oceanography, 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 // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 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. 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.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений // М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
11. Ерлов Н.Г. Оптика моря // Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 249 с.
12. Иванов А.П. Физические основы гидрооптики // Минск: Наука и техника, 1975. 504 с.