

Возможности использования гиперспектральных и многоспектральных спутниковых данных для мониторинга загрязнений прибрежных акваторий океана

В.Г. Бондур¹, Н.Н. Козленко², Н.И. Рыбакова¹

¹*Научный центр аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»
105064 Москва, Гороховский пер., 4
E-mail: vgbondur@online.ru*

²*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
119071 Москва, Ленинский проспект, 33
E-mail: nick.kozlenko@mail.ru*

Приводятся результаты оценки возможностей использования гиперспектральных (Hyperion) и многоспектральных (ALI) космических изображений поверхности океана, полученных со спутника EO-1, для мониторинга загрязнений прибрежных акваторий. При проведении обработки таких изображений использован алгоритм оценки концентраций базовых примесей (внутриклеточный хлорофилл, растворенные органические вещества и гетеротрофные бактерии), основанный на методе нелинейной многомерной оптимизации, позволяющий учесть вариабельность всего спектра отражения и провести автоматическую коррекцию поверхностного отражения. Для верификации космических данных использованы результаты обработки подспутниковой гидрооптической информации, полученной аппаратурой AC-9. Достигнуто хорошее соответствие параметров, полученных на основании космических и подспутниковых данных, которое свидетельствует об эффективности гиперспектральных и многоспектральных методов для мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории.

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 [1, 2]. Динамика различных процессов в прибрежной зоне океана, подвергшейся загрязнениям такого типа, исследована мало. Методы контактных измерений, хотя и обладают высокой точностью, весьма дороги и не позволяют получить полную картину распределения шлейфов загрязнений. Поэтому задача обнаружения областей загрязнений и оценки физико-химических характеристик загрязненных вод дистанционными методами является весьма актуальной [1-6].

Для решения задач космического мониторинга океана достаточно широко применяются многоспектральные и гиперспектральные методы и системы [1-4, 7]. Их главное преимущество заключается в наличии большого числа спектральных каналов. Такие системы позволяют производить съемку практически непрерывного спектра в определенном диапазоне длин волн. Однако при этом обычно обеспечивается среднее и сравнительно невысокое пространственное разрешение (30 – 250 м).

Многоспектральные и гиперспектральные приборы становятся все более важными для океанографических исследований, так как их использование в прибрежных зонах и в открытом океане быстро становится ключевым элементом для научных исследований, мониторинга океана и получения информации, необходимой для принятия решений [1, 4]. Данные, получаемые с помощью таких систем, предоставляют возможность океанографам осуществлять дистанционную регистрацию и классификацию мелкомасштабных особенностей водной среды (например, таких, как тип и характеристики дна, цветение фитопланктона), а также зависящих от глубины внутренних оптических свойств воды и регистрации проявлений различных антропогенных воздействий [1-4, 7].

В настоящей работе рассматриваются результаты обработки данных, полученных гиперспектральным (Hyperion) и многоспектральным (ALI) спектрорадиометрами спутника EO-1, с использованием метода,

основанного на применении нелинейной многомерной оптимизации, для обнаружения областей загрязнений в прибрежных акваториях и оценки осредненных по глубине концентраций базовых примесей.

Объект исследований, особенности космической съемки и методики обработки данных

Исследования проводились в акватории бухты Мамала, расположенной в южной части острова Оаху Гавайского архипелага [2, 5, 6, 8]. В бухте Мамала на острове Санд находится заглубленный коллектор (Sand Island Outfall), осуществляющий глубоководный сброс, который оказывает существенное антропогенное влияние на прибрежную акваторию [2, 9].

При проведении мониторинга прибрежной зоны о. Оаху, с целью обнаружения загрязнений, вызванных заглубленным стоком, использовались различные космические изображения, в том числе изображения, полученные с помощью аппаратуры ALI и Hyperion спутника EO-1 [2]. Гиперспектральный датчик данного спутника обладает разрешением 30 м и содержит 220 спектральных каналов в диапазоне 0.4...2.5 мкм, а многоспектральный датчик содержит 10 каналов в диапазоне 0.4...2.4 мкм и имеет разрешение 10 м в панхроматическом режиме и 30 м – в многоспектральном. Размер изображения, полученного с помощью аппаратуры Hyperion, составляет 7.7x42 км, а с аппаратуры ALI - 37x42 км (<http://nmp.nasa.gov>).

Для верификации космических данных в дни космической съемки в акватории бухты Мамала проводились подспутниковые измерения с помощью гидрооптической аппаратуры AC-9 [8]. Датчик запускался с исследовательского корабля "Klaus Wyrki" с помощью гидравлической лебедки и крана со средней скоростью погружения 0.4 м/с на глубину около 150 м (см. рис.1) [2, 8]. С помощью аппаратуры AC-9 измерялись значения коэффициентов поглощения (k , m^{-1}) и ослабления (ϵ , m^{-1}) для девяти длин волн (в спектральном диапазоне от 412 до 715 нм) на каждой станции (B6), находящихся в районе сбросового устройства. По полученным данным строились вертикальные профили коэффициентов поглощения, ослабления и рассеяния для каждой станции в которых проводились измерения.

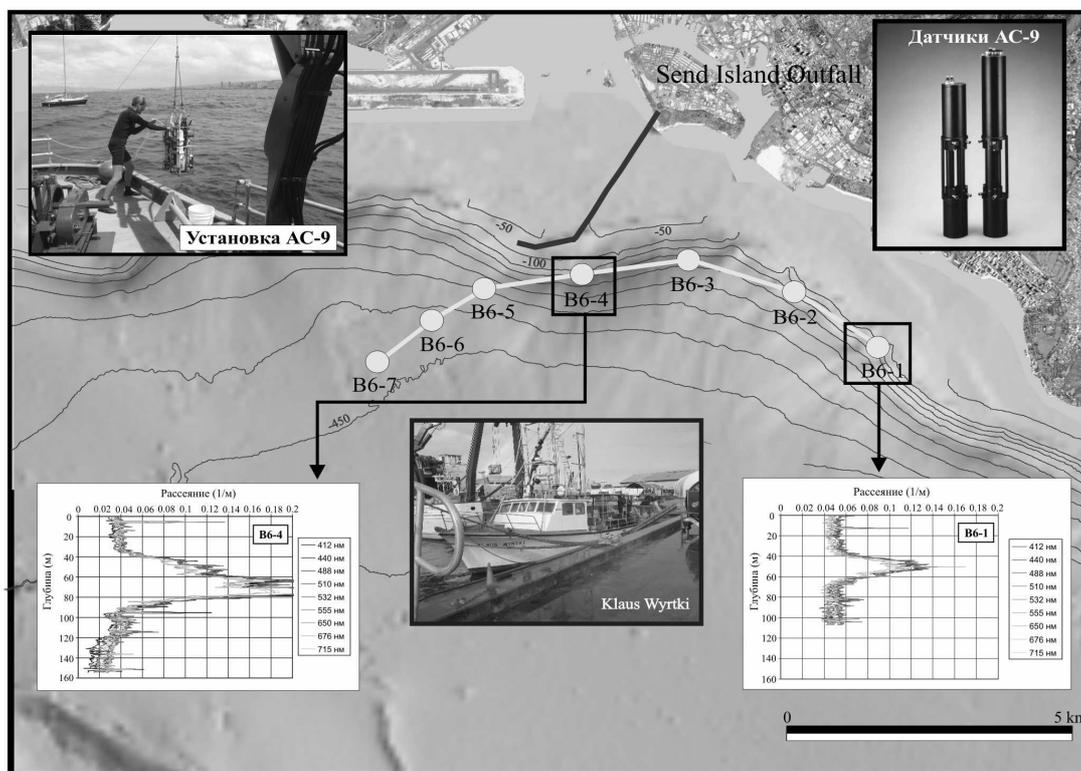


Рис. 1. Измерение гидрооптических характеристик прибором AC-9 в акватории бухты Мамала (Гавайские острова)

На основании полученной информации был разработан метод, основанный на линейной биооптической модели Халтрина-Копелевича [10, 11], который позволяет по оптическим данным рассчитывать концентрации примесей (таких как хлорофилла *a*, РОВ, мелких и крупных частиц) [10-13]:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + C_{ap}(\lambda) + Y_{ay}(\lambda),$$

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + N P_s b P_s(\lambda) + N P_l b P_l(\lambda),$$

где: $a(\lambda)$ и $b(\lambda)$ - коэффициенты поглощения и рассеяния примеси - (m^{-1});

λ - длина волны (нм);

$a_w(\lambda)$ и $b_w(\lambda)$ - коэффициенты поглощения и рассеяния чистой морской воды - (m^{-1});

C - суммарная концентрация хлорофилла *a* - (mg/m^3);

Y - концентрация органических веществ, растворенных в воде - (у.е.);

$a_p(\lambda)$ - удельный коэффициент поглощения базовой смеси фитопланктона (18 видов) - (m^2/mg);

$a_y(\lambda)$ - удельный коэффициент поглощения растворенных в воде органических веществ - (m^{-1});

N - число примесей;

P_s, P_l - концентрации малых частиц и крупных частиц - (g/m^3);

$b P_s(\lambda)$ - удельный коэффициент рассеяния малых частиц - (m^2/g);

$b P_l(\lambda)$ - удельный коэффициент рассеяния крупных частиц - (m^2/g);

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.

При обработке гиперспектральных и многоспектральных космических изображений, полученных с борта спутника EO-1 при помощи аппаратуры Hyperion и ALI, применялась следующая методика:

1. Географическая привязка исходных изображений, которая осуществлялась путем подбора опорных точек с использованием цифровой векторной карты береговой линии о.Оаху и последующего геометрического аффинного преобразования (комбинация сдвига, преобразования масштаба и поворота), минимизирующего невязку;

2. Маскирование суши с использованием цифровой векторной карты береговой линии о. Оаху.

3. Маскирование облаков, теней от облаков и отмелей. При обработке изображений Hyperion был применен метод маскирования облачности и теней от облаков, основанный на пороговой обработке канала 13 (477.7 нм) исходного изображения, а для изображений ALI - на анализе трех каналов оптического диапазона: каналы 2 (443 нм), 3 (482 нм) и 4 (565 нм). Маскирование отмелей проводилось на основе батиметрической карты. Результаты маскирования уточнялись на основе визуального анализа в интерактивном режиме.

4. Выбор спектральных каналов для обработки. Для обработки данных Hyperion были выбраны 30 каналов в видимом диапазоне (каналы 8-37 исходного изображения). Для обработки данных ALI - 4 канала в видимом диапазоне (каналы 2-5 исходного изображения) и один канал в ближнем инфракрасном диапазоне (канал 7 исходного изображения).

5. Подавление инструментального шума методом сегрегации шумовых компонент.

6. Атмосферная коррекция выбранных каналов. При этом были использованы следующие вспомогательные данные:

- оптическая толщина атмосферных аэрозолей для излучения с длиной волны 550 нм (архив данных AERONET, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>);

- содержание водяного пара в атмосфере (архив данных AERONET, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Атмосферная коррекция проводилась с использованием пакета MODTRAN 4.3r1, в предположении, что атмосфера горизонтально однородна.

7. Построение карт концентраций базовых примесей проводилось в соответствии с методом оценки осредненных по глубине концентраций примесей. Он основан на применении нелинейной многомерной оптимизации [14] для решения задачи минимизации невязки:

$$\sum_{i=1, N} (R_{mes}(\lambda_i) - R_{mod}(\lambda_i))^2,$$

где $R_{mes}(\lambda_i)_{i=1,N}$ – измеренный спектр;

$R_{mod}(\lambda_i)_{i=1,N}$ – модельный спектр, вычисленный по методу Халтрина [11].

Вычисления производились в предположении, что океан оптически однороден по глубине и отражением от дна можно пренебречь, и параметризации поверхностного отражения от взволнованной поверхности океана.

Так как $R_{mod}(\lambda_i)$ нелинейно зависит от концентраций базовых примесей C (хлорофилл), Y (растворенные органические вещества) и H (гетеротрофные бактерии), минимизация невязки происходит итерационно и на каждом шаге требует вычисления матрицы Гесса

$$H = P * P^T,$$

где P – матрица производных $[dR_{mod}(\lambda_i)/dC, dR_{mod}(\lambda_i)/dY, dR_{mod}(\lambda_i)/dH]$

$$R^k(\lambda_i) = R^{k+1}(\lambda_i) + (H^k + \mu_k * I)^{-1} * (P_k)^T * (R_{mes}(\lambda_i) - R^k(\lambda_i)), k=0,1,2, \dots$$

Производные $dR_{mod}(\lambda_i)/dC$, $dR_{mod}(\lambda_i)/dY$ и $dR_{mod}(\lambda_i)/dH$ рассчитываются на основе результатов, изложенных в [11]. Плохая обусловленность $P * P^T$ приводит к замедлению процесса, так как в этом случае необходимо итеративно уточнять регуляризующий параметр μ_k .

Осредненные по глубине концентрации примесей, являющиеся результатом применения метода спектральной оптимизации, вообще говоря, не являются истинными средними по глубине вертикальных профилей концентрации примесей. Они являются взвешенными средними. Весовая функция приближенно описывается функцией Гордона-Кларка, которая убывает с глубиной и равна 1 вблизи поверхности.

Результаты обработки и их анализ

В качестве примера приведем результаты оценок концентрации базовых примесей по изображениям, полученным аппаратурой Hyperion и ALI со спутника EO-1 17 августа 2004 года для акватории бухта Мамала. Идентификационный номер сцены для изображения, полученного с аппаратуры Hyperion - EO1N0640452004230110PG, время начала съемки 10:43:52.813 (LT), время окончания съемки 10:44:10.814 (LT). Номер сцены для изображения, полученного с аппаратуры ALI - EO1A0640452004230110PG, время начала съемки 10:43:55.022 (LT), время окончания съемки 10:44:11.022 (LT). Результаты обработки изображений приведены на рисунке 2.

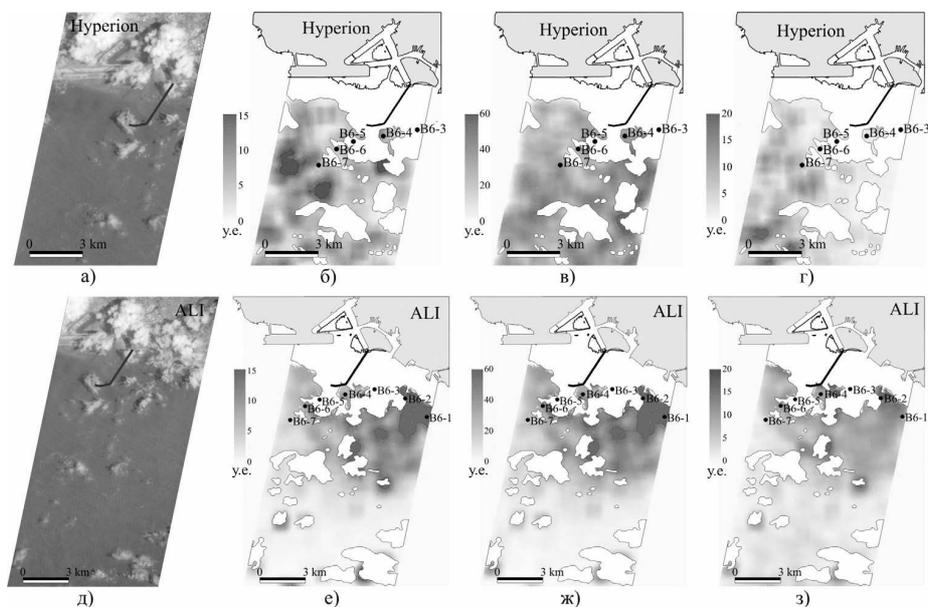


Рис. 2. Фрагменты изображений, полученные с борта спутника EO-1 (а, д), рассчитанные распределения концентраций внутриклеточного хлорофилла (б, е), растворенных в воде органических веществ (в, ж), гетеротрофных бактерий (з, з) с наложением составной маски (суша - светло-серым цветом, отмель+облака+тени от облаков - белым цветом). Hyperion (а, б, в, з); ALI (д, е, ж, з)

Погрешности калибровки исходных данных, моделей поверхностного отражения и весовой функции осреднения по глубине, неопределенность параметров атмосферной коррекции, приводили к тому, что оценки концентраций базовых примесей (внутриклеточного хлорофилла, растворенных органических веществ и гетеротрофных бактерий), полученные с использованием метода спектральной оптимизации, являлись монотонными функциями истинных значений концентраций, осредненных по глубине. Поэтому оценки концентраций представлены в условных единицах.

Карта концентрации внутриклеточного хлорофилла, полученная по изображению аппаратурой Huregion позволила локализовать область аномальных концентраций (>13 у.е.) к югу от диффузора очистных сооружений (рис.2.б.). По изображению, полученному аппаратурой ALI, распределение концентрации внутриклеточного хлорофилла (>13 у.е.) характеризуется наличием нескольких аномалий к югу и юго-востоку от диффузора (рис.2.е.). Причем наибольшая по площади и концентрации аномалия выделялась в зоне сброса дренажного канала Али-Вайи (точки В6-1, В6-2).

Карты концентрации растворенных органических веществ позволили выявить область аномальных концентраций (>50 у.е.) к югу и юго-западу от диффузора очистных сооружений на изображении, полученном аппаратурой Huregion (рис.2.в.) и к югу и юго-востоку от диффузора – аппаратурой ALI. Здесь так же выделилась наибольшая по площади и концентрации аномалия в зоне сброса дренажного канала, в точках В6-1 и В6-2 (см. рис.2.ж.).

Анализ карты концентрации гетеротрофных бактерий, построенный по полученному аппаратурой изображению Huregion, позволил установить область аномальных концентраций (>18 у.е.) к юго-западу от диффузора очистных сооружений (рис.2.г.). Карта концентрации гетеротрофных бактерий, полученная по изображению с ALI характеризовалась наличием нескольких аномальных областей (>18 у.е.) к северо-востоку и юго-востоку от диффузора. Небольшая аномалия обнаруживалась также в зоне сброса дренажного канала Али-Вайи (рис.2.з.).

Для проверки данного метода были использованы результаты гидрооптических измерений, полученных с помощью датчика АС-9 [8]. На рис.3 представлены двумерные спектры базовых примесей, построенные с помощью модели Халтрина-Копелевича по данным, полученным 17 августа 2004 г. в момент времени, близкий к моменту космической съемки. Анализ рисунка показывает, что в этот день наблюдалось всплытие вод, характеризующихся повышенной концентрацией хлорофилла при локальном всплытии сезонного термоклина под воздействием внутренних приливных волн, которое сопровождалось взрывным размножением мелких частиц.

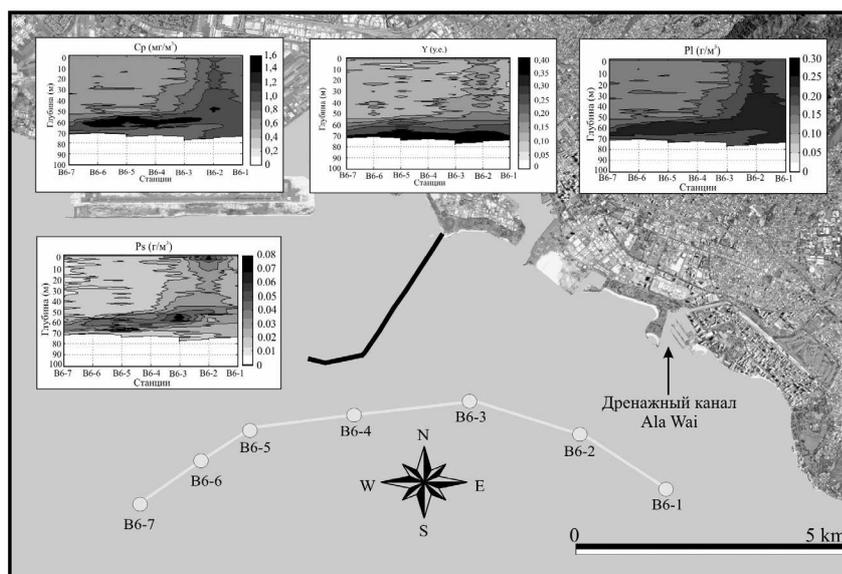


Рис. 3. Двумерные вертикальные профили концентрации примесей, построенные по данным погружаемого датчика АС-9. С-концентрации хлорофилла, Y- концентрации РОВ, Ps- концентрации мелких ($<<1\text{мкм}$) частиц и Pl - концентрации крупных ($>>1\text{мкм}$) частиц

По сравнению с другими местами измерений, в районе станции В6-2 с помощью датчика АС-9 зафиксированы повышенные значения примесей, вызванные влиянием дренажного канала, которые также хорошо выделяются по космическим данным.

На рисунке 4, представлено частичное сопоставление результатов оценок базовых примесей водной среды в бухте Мамала, рассчитанных по изображениям, полученным аппаратурой Hyperion и ALI спутника EO-1 и по данным прибора АС-9. Как следует из анализа этого рисунка, наблюдается достаточно хорошее совпадение данных.

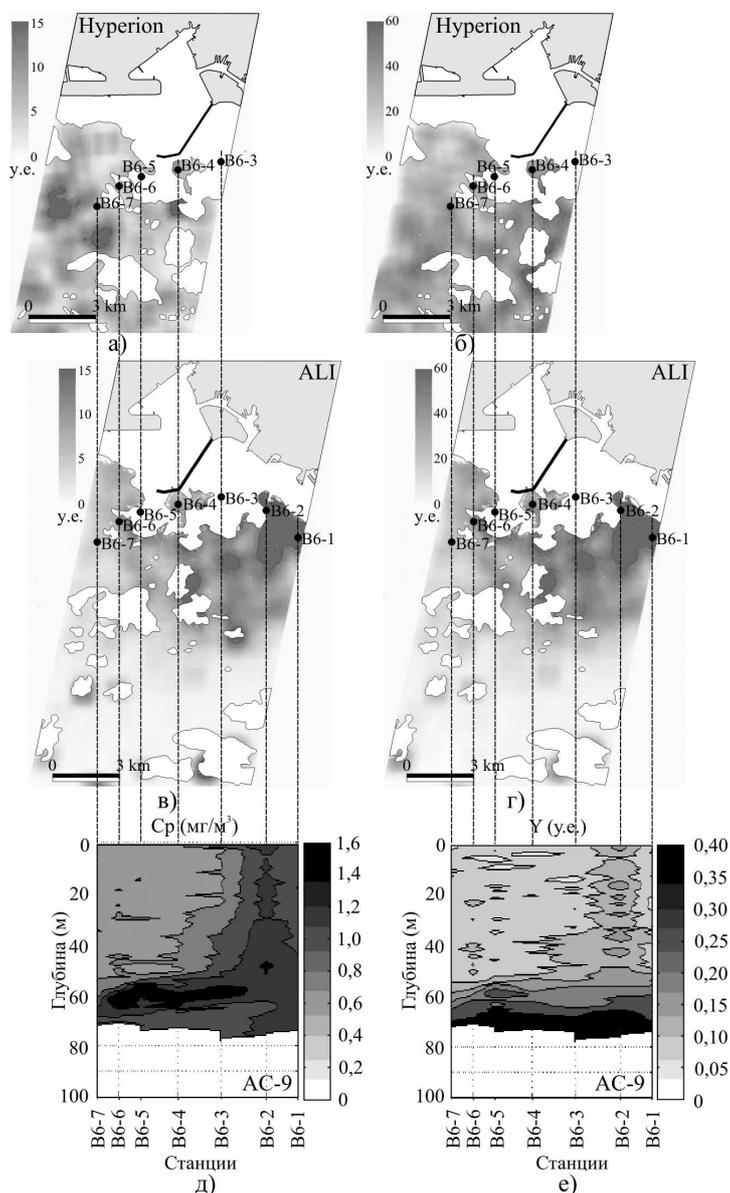


Рис. 4. Сопоставление результатов оценок базовых примесей водной среды в бухте Мамала, рассчитанных по изображениям, полученным спутником EO-1 года аппаратурой Hyperion и ALI, и по данным прибора АС-9: распределения концентраций внутриклеточного хлорофилла (а, в, д), растворенных в воде органических веществ (б, г, е). Hyperion (а, б); ALI (в, г); АС-9 (д, е)

Таким образом, метод спектральной оптимизации, учитывающий зависимость формы всего спектра отражения от осредненной по глубине концентрации примесей, позволяет (при условии отсутствия облачности или густой атмосферной дымки) обнаруживать по многоспектральным и гиперспектральным космическим изображениям области подповерхностных загрязнений, обусловленных глубинными стоками.

Заключение

В представленной работе изложены результаты обработки и анализа изображений, полученных с помощью многоспектральной (ALI) и гиперспектральной (Hyperion) аппаратуры спутника EO-1, а также гидрооптических данных, полученных сенсором AC-9 при мониторинге прибрежных акваторий, подверженных антропогенным влияниям.

На основании сопоставления результатов обработки многоспектральных и гиперспектральных космических изображений, а также подспутниковых гидрооптических данных продемонстрирована принципиальная возможность регистрации аномалий гидрооптических свойств приповерхностного слоя океана для исследования процессов и явлений, связанных с заглубленными стоками. Определены концентрации хлорофилла и примесей в области стоков. Получено хорошее совпадение космических и подспутниковых данных, свидетельствующее о высокой эффективности гиперспектральных и многоспектральных методов дистанционного зондирования для космического мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории.

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. *Grace Chang, Kevin Mahoney, Amanda Briggs et al.* The new age of hyperspectral oceanography // *Oceanography*, 2004. P. 22-29.
5. *Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*, April, 2004, P. 53-58.
6. *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*. Vol. 32, L12610, doi:10.1029/2005GL022390, 2005.
7. *Еремеев В.А., Мордвицев И.Н., Платонов Н.Г.* Современные гиперспектральные сенсоры и методы обработки гиперспектральных данных // Исследование Земли из космоса, 2003. №6. С. 80-90.
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. *Fisher H.B. et al.* Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press, 1979. 484 p.
10. *Kopelevich O. V.* Small-Parameter Model of Optical Properties of sea water. Chapter 8 // *Ocean Optics, Vol. 1: Physical Ocean Optics*, (A. S. Monin, Ed., Nauka Publishers, Moscow, 1983).
11. *Haltrin V.I. and Kattawar G.W.* Self-consistent solutions to the equation of transfer with elastic and inelastic scattering in oceanic optics: I. Model // *Applied Optics*, 1993. Vol. 32. No. 27. P. 5356-5367.
12. *R.M. Pope and E.S. Fry.* Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water, II. Integrating cavity measurements // *Applied Optics*, 1997. Vol. 36. P. 8710–8723.
13. *Buiteveld H.J., et al.* The optical properties of pure water // *Ocean Optics XIII, SPIE 2258*, pp. 174–183, 1994.
14. *Demidenko E.Z.* Nonlinear regression, Ch. 7 // *Linear and nonlinear regressions. Finances and statistics*, 1981.