

АЛГОРИТМ МОНИТОРИНГА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ В РАЙОНЕ ИХ ИНТЕНСИВНОГО ХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2016

- М. Н. Гурьева** инженер, Рязанский государственный радиотехнический университет, maria_guryeva@mail.ru
- Ю. Н. Журавель** заместитель начальника отдела, Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара, d1133@samspace.ru
- Р. В. Тишкин** кандидат технических наук, начальник отдела, Особое конструкторское бюро «Спектр», г. Рязань, roman.tishkin@mail.ru

В статье рассмотрен алгоритм мониторинга экологического состояния прибрежных акваторий, предназначенный для выявления сильных нефтяных и крупнодисперсных загрязнений, определения наличия тонких нефтяных плёнок и оценки концентрации минеральных, органических загрязнений в приповерхностном водном слое. Представлен метод идентификации мелководья, включающий в себя выявление зон песчаного дна и зон зарастания береговой линии высшей водной растительностью (фитопланктон). Проведена оценка экологического состояния прибрежной зоны города Регенсия (Эспириту-Санту, Бразилия). Представленный алгоритм основан на анализе изменения вида спектрально-энергетических характеристик водной поверхности при её загрязнении компонентами различного типа и концентраций по отношению к спектрально-энергетическим характеристикам условно чистой водной поверхности. На основе полученных оценок проводится кластеризация исходных данных, по результатам которой формируются тематические карты, отражающие классификацию исследуемой акватории по компонентному и суммарному уровню загрязнения и по глубине. На основе полученных результатов делаются выводы об общем загрязнении исследуемой акватории. Приведён пример обработки алгоритмом данных, представляющих собой гиперспектральное изображение, полученное с космического аппарата (КА) «Ресурс-П» №2 и прошедшее предварительную радиометрическую и атмосферную коррекцию.

Дистанционное зондирование Земли, экологический мониторинг, гиперспектральные данные, коэффициент спектральной яркости, кластеризация.

Цитирование: Гурьева М.Н., Журавель Ю.Н., Тишкин Р.В. Алгоритм мониторинга экологического состояния прибрежных акваторий в районе их интенсивного хозяйственного использования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 223-232.
DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-223-232

Введение

Актуальность задачи мониторинга экологического состояния прибрежных акваторий в настоящее время имеет особое значение, поскольку в крупных городах прибрежные водные массивы испытывают большую нагрузку от прибрежных и морских источников загрязнения. В качестве прибрежных источников загрязнения рассматриваются промышленные объекты, имеющие выпуски сточных вод в исследуемую акваторию; поверхностные стоки с загрязнённых территорий; районы морской добычи нефти и нефтепродуктов; участки проведения дноуглубительных, взрывных, буровых и других работ, связанных с изменением дна и берегов водных объектов. Обработка данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предлагаемым алгоритмом предоставляет возможность своевременного отслеживания и контроля вышеперечисленных загрязняющих факторов. Это направлено на оптимизацию промышленного использования акватории без ущерба для окружающей среды.

Результаты существующих исследований зависимости спектральной отражательной способности от длины волны падающего излучения объектов различного типа поз-

воляют по данным ДЗЗ делать выводы о количественных показателях анализируемого объекта.

В статье приведён алгоритм мониторинга экологического состояния прибрежных акваторий для обработки гиперспектральных данных, полученных с КА «Ресурс-П» №2.

В отличие от мультиспектральных изображений, как правило, зафиксированных в 3-10 участках спектра, гиперспектральные изображения регистрируются в десятках и сотнях узких соприкасающихся спектральных диапазонах, что позволяет с большей точностью построить спектральную характеристику (СХ) анализируемого объекта, которая описывает распределение энергии излучения по длине волны (рис. 1) [1].

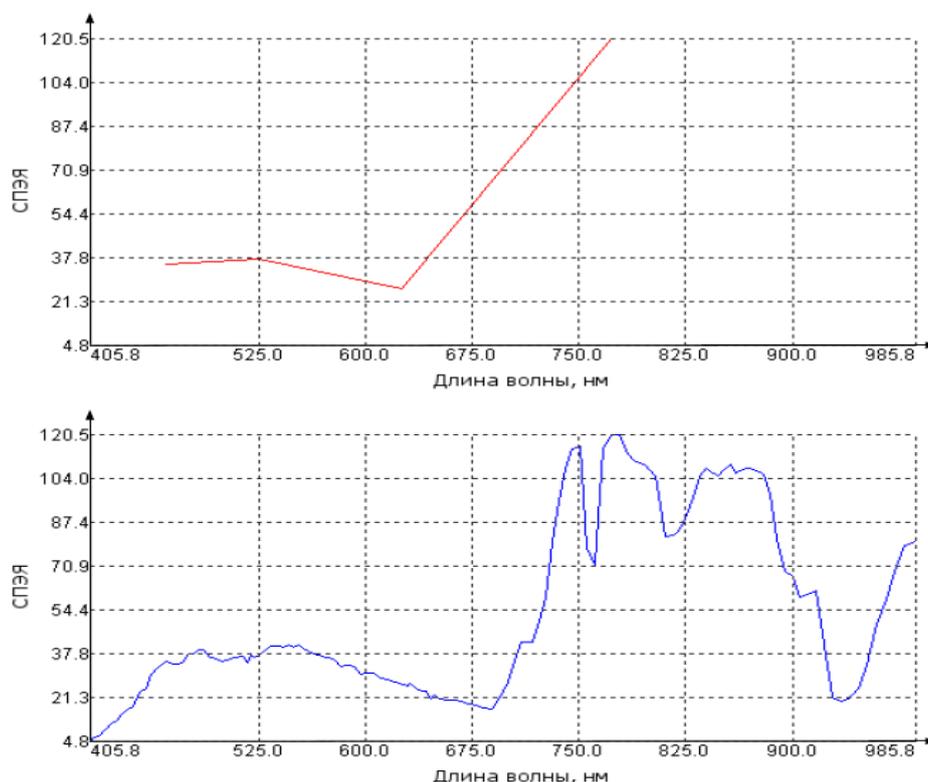


Рис. 1. СХ объекта на мультиспектральных и гиперспектральных данных

Характеристика аппаратуры и калибровка исходных данных

Гиперспектральная съёмка позволяет получить данные о спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) поверхности Земли на входном зрачке аппаратуры. Основные характеристики гиперспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П» приведены в табл. 1 [2].

Таблица 1. Характеристика гиперспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П»

Количество спектральных каналов	не менее 96
Спектральное разрешение, нм	от 5 до 10
Полоса захвата (в надире), км	30
Пространственное разрешение в надире, м	30
Отношение сигнал/шум при значении сигнала, близкому к сигналу насыщения	не менее 200
Разрядность представления информации, бит/пиксель	14

В результате формируется гиперкуб данных в виде набора изображений одной и той же сцены, но полученных в различных спектральных диапазонах. Каждой точке гиперкуба соответствует СХ в виде вектора отсчётов яркости в различных спектральных каналах (рис. 2).

Для преобразования исходных данных из значений СПЭЯ на верхней границе атмосферы в коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) подстилающей поверхности необходимо провести атмосферную коррекцию изображения.

В контексте ДЗЗ в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне влияние атмосферы на световые волны выражается в несовпадении величин отражённой солнечной радиации, измеренных на Земле и зафиксированных на снимке для объектов одного типа. Главных факторов, вызывающих искажения величин СПЭЯ, два: это поглощение молекулами газов и рассеяние различных видов. Для полного устранения атмосферных искажений на конкретном снимке необходимо знать пространственное распределение, концентрации, типы газов и аэрозолей над территорией в момент съёмки. В этом случае используют физические алгоритмы атмосферной коррекции снимков, которые основаны на физических моделях переноса излучения в атмосфере. В числе программных реализаций таких алгоритмов модели FLAASH, ATCOR, MODTRAN и др. [3]. В рамках настоящей реализации атмосферная коррекция проводилась с помощью программной модели MODTRAN. RGB-модель результатов коррекции представлена на рис. 3.

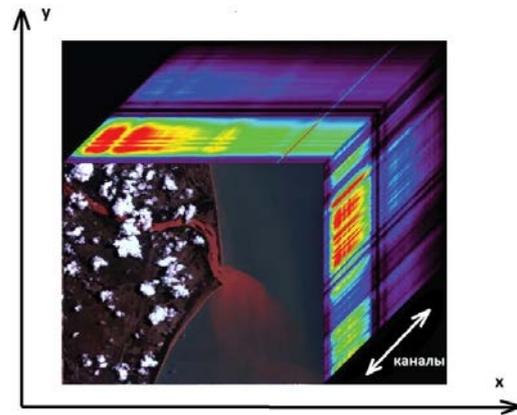


Рис. 2. Гиперкуб данных

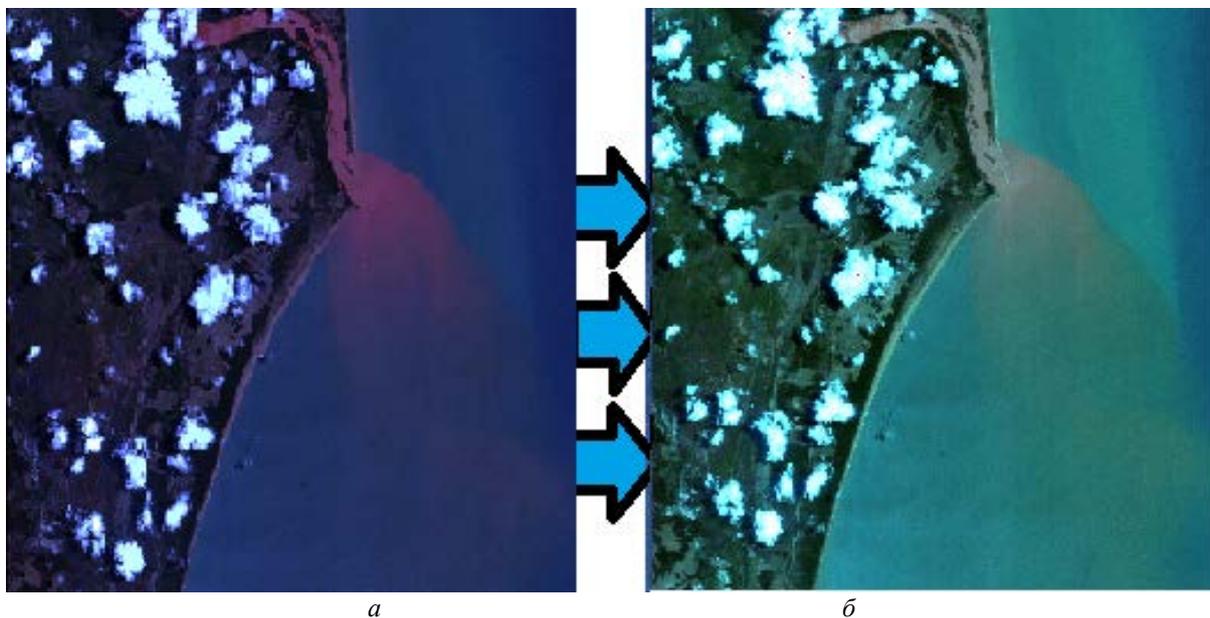


Рис.3. Гиперспектральное изображение: а – исходное; б – прошедшее атмосферную коррекцию

Описание алгоритма

Для классификации водного объекта по уровню загрязнения и определения зоны мелководья реализован алгоритм, схема которого представлена на рис. 4.

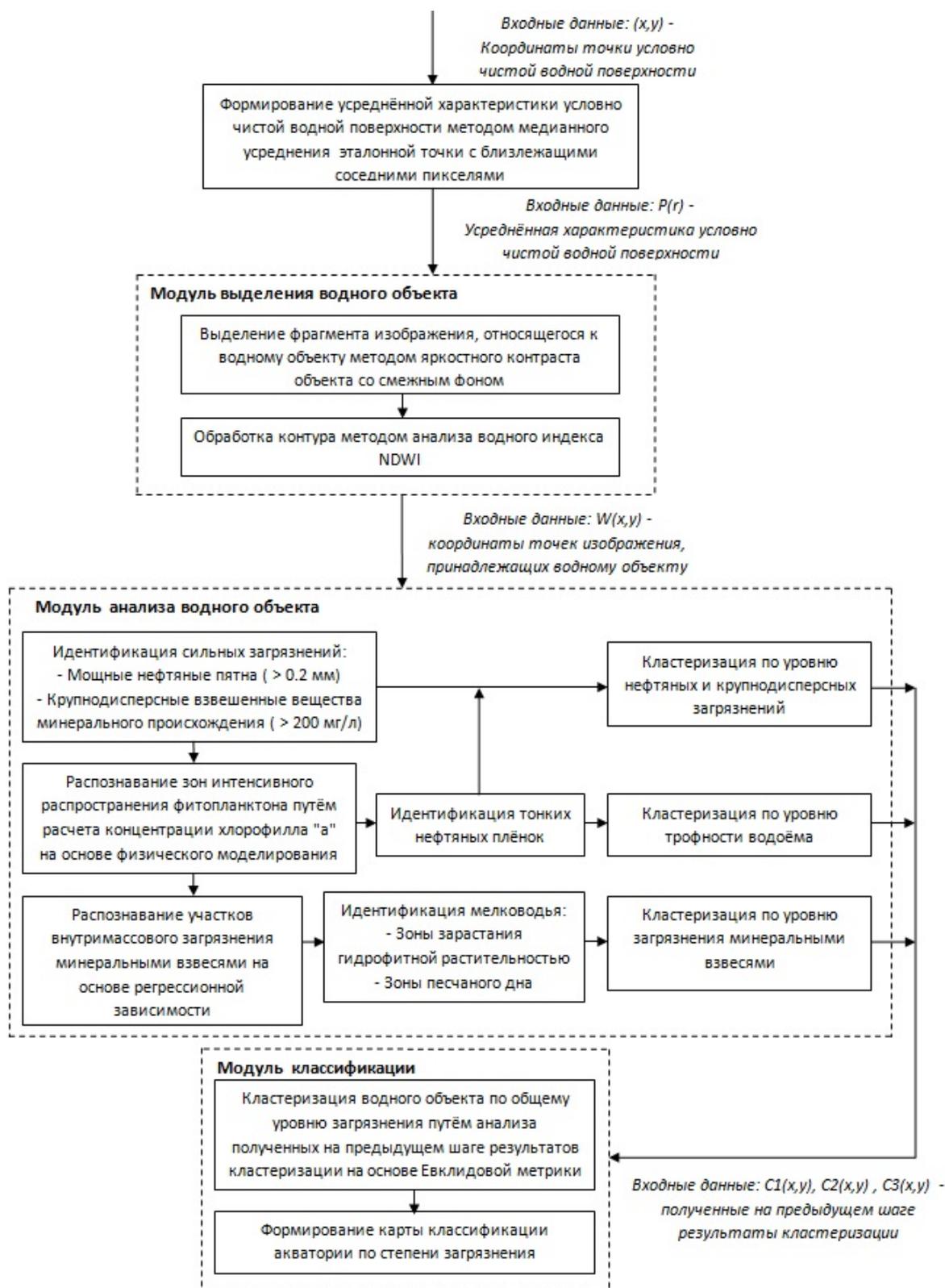


Рис. 4. Алгоритм кластеризации водного объекта по уровню загрязнения

Это последовательно позволяет в автоматическом режиме:

- выделять границы водного объекта;
- определять следы сильных загрязнений и тонких нефтяных плёнок;
- оценивать уровень концентрации хлорофилла «а»;
- оценивать концентрацию взвешенных веществ минерального происхождения и отделять загрязнённые области от мелководных;
- делать итоговые выводы об общем и компонентном уровне загрязнения водоёма.

Алгоритм включает в себя метод обработки данных на основе физического моделирования для определения эфтрофированности водоёмов и выделения участков сине-зелёных водорослей. Преимущество такого метода состоит в том, что это является общим случаем для данных гиперспектральной съёмки, основанным на особенностях изменения СХ приповерхностного водного слоя при увеличении в нём концентрации органических веществ, и не зависит от параметров конкретного водоёма.

На первом этапе происходит определение границ водного объекта методом яркостного контраста объекта со смежным фоном путём наращивания областей [4]. За объект принимается СХ точки, отмеченной оператором, усреднённая по ближайшей области. В качестве порогового критерия принимается максимальное значение СХ исследуемого пикселя в ближней инфракрасной области спектра, в которой водная поверхность имеет низкую отражательную способность, в то время как СХ объектов, относящихся к береговой линии, растительности, антропогенным объектам, напротив, возрастает. После этого производится уточнение контура выделенной области по индексу NDWI, расчёт которого учитывает средние интегральные значения СХ в ближней инфракрасной (770 ... 890 нм) и сине-голубой (400 ... 500 нм) зонах спектра.

На втором этапе происходит попиксельная обработка найденного водного объекта. Это включает в себя следующие шаги.

Идентификация сильных загрязнений. В первую очередь проводится поиск областей, содержащих мощные (>0.2 мм) пятна нефтепродуктов. Значение КСЯ в ближнем инфракрасном диапазоне в этом случае в несколько раз превышает КСЯ других неоднородностей водной поверхности (рис. 5) [4]. Далее идентифицируются механические загрязнения крупнодисперсными взвешенными веществами минерального происхождения концентрацией более 200 мг/л. Положение максимума СХ в этом случае смещается в красно-коричневую область спектра (590 ... 710 нм), при этом значения КСЯ в этой области также в несколько раз превышают КСЯ других неоднородностей (рис. 5).

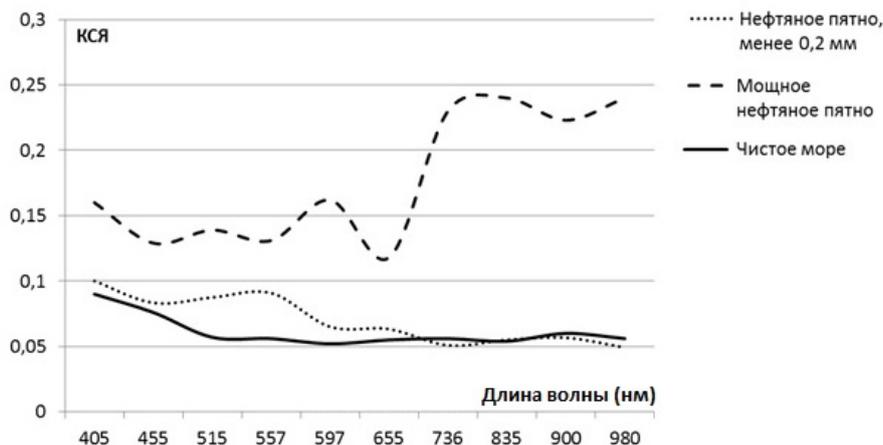


Рис. 5. Характерная форма СХ для сильных загрязнений

Распознавание зон интенсивного распространения фитопланктона. В качестве индикатора трофического состояния водоёма обычно используется концентрация хлорофилла «а», который является основным фотосинтетическим пигментом. Пигмент в составе фитопланктона, необходимый для фотосинтеза, даёт сильные полосы поглощения в голубой (480 нм) и красной (650 нм) области спектра с одновременным смещением максимума отражательной способности в зелёную (560 нм) часть спектра [5]. Таким образом, отношения КСЯ в интервале длин волн, близком к 480 и 560 нм, будут очень чувствительны к изменению концентрации фитопланктона (рис. 6).

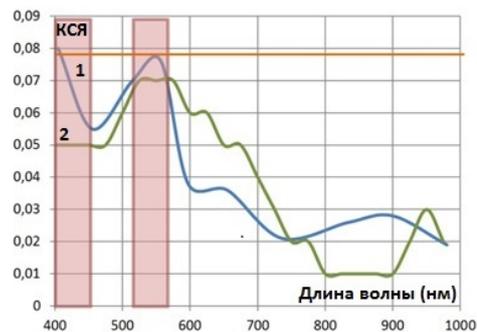


Рис. 6. СХ водной поверхности:
1 – тонкая нефтяная плёнка;
2 – фитопланктон

Концентрация хлорофилла «а» ($C_{хл}$) рассчитана по формуле:

$$C_{хл} = \frac{a_{хл}(\lambda)}{A(\lambda)},$$

где $A(\lambda)$ – константа, зависящая от длины волны; $a_{хл}(\lambda)$ – суммарный показатель поглощения морской водой на длине волны 560 нм, учитывающий биооптический индекс – соотношение КСЯ в двух узких гиперспектральных диапазонах 485 и 560 нм. Такой метод расчёта привлекателен тем, что основан на физических закономерностях формирования излучения от водной поверхности и не требует наземных измерений параметров водоёма, которые являются трудоёмкой и дорогостоящей операцией.

Чтобы отнести анализируемый участок гиперспектрального изображения к тонкой плёнке нефтепродуктов на водной поверхности, необходимо выполнение двух условий:

–отношение максимальных значений КСЯ в интервале 500-550 нм и 400-450 нм должно стремиться к единице. Это связано с тем, что интервал 400...450 нм соответствует возбуждению люминесцентного свечения нефтяными фракциями в коротковолновой части видимого диапазона спектра, вызванного интенсивным поглощением ультрафиолета в интервале 363...365 нм [1];

–величина концентрации хлорофилла «а» не должна превышать порогового значения, характерного для эфтрофных и мезотрофных водоёмов.

Распознавание участков внутримассового загрязнения минеральными взвешиваемыми веществами. Распознавание и классификация участков внутримассового загрязнения воды взвешиваемыми веществами с концентрацией менее 200 мг/л в настоящей реализации основывается на полуаналитическом подходе. При определении регрессионной зависимости, описывающей корреляционные связи между яркостью водной поверхности в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах и вариацией содержания взвешенных веществ, использовалась физическая модель формирования излучения от водного объекта, содержащего взвешенные частицы. Прозрачность чистой воды в сине-зелёном спектральном интервале (470-570 нм) достигает 20-30 м и более, а КСЯ при достаточной глубине не превышает 0,04-0,05 [4]. Основные изменения в значении яркости чистой воды вносит увеличение рассеивания света в воде на частицах взвешенных веществ, что приводит к увеличению ослабления излучений и уменьшению глубины проникновения света. При слабом и умеренном загрязнении с увеличением концентрации твёрдых частиц в воде максимум СХ сдвигается в длинноволновую часть спектра (рис. 7).

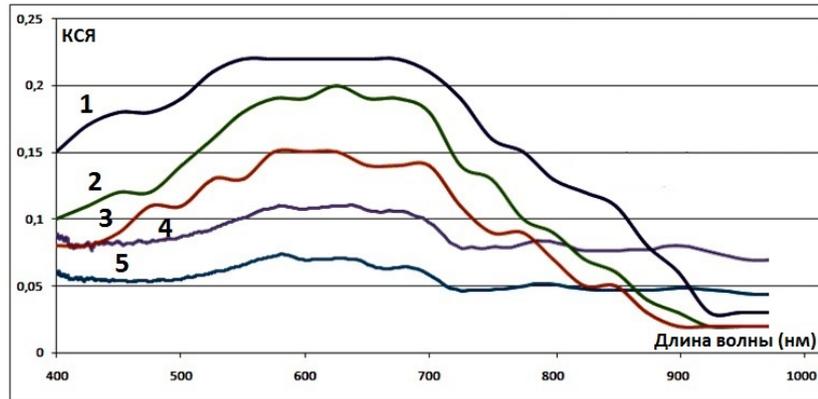


Рис. 7. КСЯ водной поверхности, загрязнённой взвешенными частицами:
 1 – крайне высокий уровень загрязнения (более 300 г/л);
 2 – высокий уровень загрязнения (200-300 мг/л);
 3 – средний уровень загрязнения (30-50 г/л);
 4 – низкий уровень загрязнения (20-30 мг/л);
 5 – условно чистая водная поверхность (менее 20 мг/л)

Установлена регрессионная зависимость между концентрацией взвешенных веществ ($C_{вв}$) и средним значением КСЯ ($r_{ср}$) для этого диапазона [4]:

$$C_{вв} = e^{\frac{r_{ср} + 0.044}{0.043}}$$

Кроме присутствия в воде растворённых и взвешенных органических веществ, определяющих долю рассеивания и поглощения света в воде, величину КСЯ определяют тип дна и глубина водоёма при анализе состояния акватории в районе мелководья (рис. 8). Например, для участков интенсивного распространения высшей водной растительности характерно наличие максимума отражения в спектральном интервале 700...790 нм, а для песчаного дна в качестве признака принято значение энтропии в спектральном диапазоне 600...750 нм, где наблюдаются максимальные флуктуации яркости по сравнению с другими неоднородностями в виде взвесей.

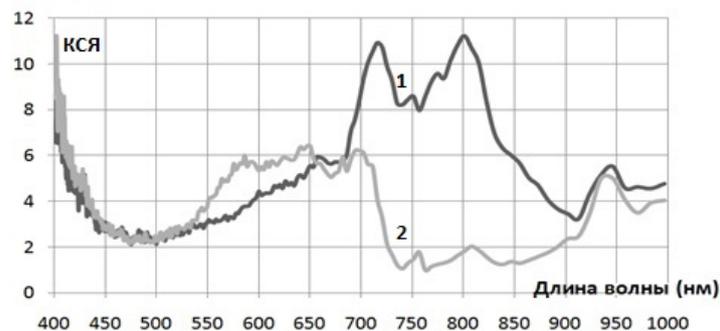


Рис. 8. КСЯ водной поверхности: 1 – мелководная зона; 2 – загрязнённая зона

Результаты

После расчёта признаков акватория классифицируется по степени загрязнения с учётом параметров действующего природоохранного законодательства, в соответствии с которым водные объекты по степени загрязнения разделяются на 5 уровней: условно чистые, слабо загрязнённые, загрязнённые, грязные, экстремально грязные. Каждый из признаков определяет наличие исследуемого компонента загрязнения. В результате

формируются карты компонентного уровня загрязнения (рис. 9). В настоящей работе карты сформированы по результатам обработки гиперспектральных данных, содержащих изображение города Регенсия (Эспириту-Санту, Бразилия).

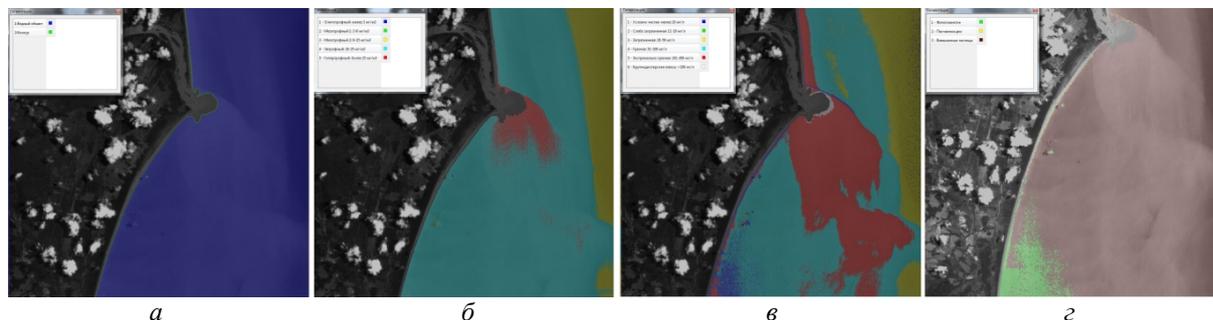


Рис. 9. Карты классификации по компонентному уровню загрязнения акватории:
 а – зона водного объекта; б – концентрация хлорофилла «а»;
 в – концентрация взвешенных минеральных веществ; г – мелководная зона

На следующем этапе формируется массив данных из трёх изображений, каждое из которых содержит классификационные коды, соответствующие пяти уровням загрязнения относительно каждого компонента. Далее проводится классификация созданного трёхмерного пространства на пять классов с использованием простой Евклидовой метрики. Пиксель приписывается тому классу, для которого эта метрика оказывается наименьшей. Таким образом, происходит кластеризация по общему уровню загрязнения, в результате которой формируется карта общего уровня загрязнения акватории (рис. 10).

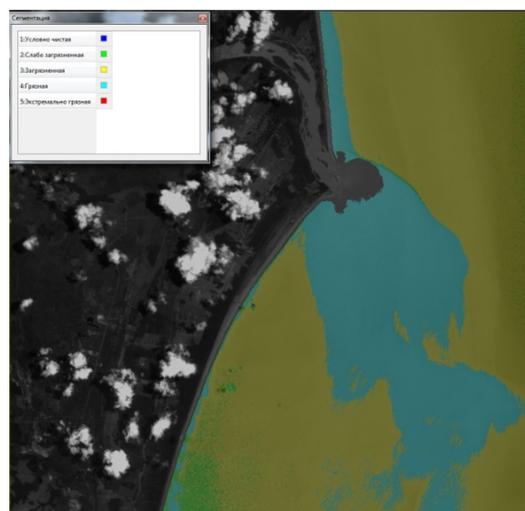


Рис. 10. Карта классификации по общему уровню загрязнения акватории

Заключение

Данные гиперспектральной съёмки в настоящее время могут быть эффективно использованы для выявления нарушения водопользования, своевременного выявления экологической деградации водоёма и принятия мер по её устранению.

Предлагаемая реализация учитывает общий случай физических закономерностей изменения СХ водной поверхности от уровня и компонентов загрязнения и не требует предварительных измерений параметров анализируемого водоёма, что значительно сокращает временные, финансовые и производственные затраты. Определение границ водного объекта происходит с использованием ближней инфракрасной зоны спектра, что позволяет уменьшить количество пикселей, принадлежащих береговой черте, ошибочно отнесённых к водной поверхности. В алгоритме отсутствует предварительная кластеризация и анализ производится не по усреднённым СХ каждого класса, а попиксельно, что повышает точность идентификации, сокращает минимальную площадь обнаруженного загрязнения и значительно уменьшает временные затраты на обработку. Однако алгоритм требует предварительной калибровки данных в КСЯ для устранения влияния атмосферного поглощения и рассеяния различных видов.

Библиографический список

1. Демидова Л.А., Еремеев В.В., Мятлов Г.Н., Тишкин Р.В., Юдаков А.А. Сегментация объектов по данным гиперспектральной съёмки Земли с использованием методов искусственного интеллекта // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 4. С. 32-36.
2. Космический аппарат «Ресурс-П» № 2.
http://www.samspace.ru/products/earth_remote_sensing_satellites/ka_resurs_p2/
3. Деркачева А.А., Тутубалина О.В. Эффективность атмосферных коррекций гиперспектральных снимков Nuregion в регионах с развитым растительным покровом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 4. С. 360-368.
4. Григорьева О.В., Шилин Б.В. Опыт оценки экологических характеристик акваторий морских портов по данным видеоспектральной аэросъёмки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 156-166.
5. Пименова Е.В. Химические методы анализа в мониторинге водных объектов. Пермь: Пермская государственная сельскохозяйственная академия, 2011. 138 с.

ALGORITHM OF MONITORING THE ECOLOGICAL STATE OF COASTAL WATERS IN AREAS OF HEAVY ECONOMIC USE

© 2016

- M. N. Guryeva** engineer, Ryazan State Radioengineering University, Ryazan, Russian Federation, maria_guryeva@mail.ru
- Yu. N. Zhuravel** Deputy Head of Department, Space-Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation, d1133@samspace.ru
- R. V. Tishkin** Candidate of Science (Engineering), Head of Department, Special Design Bureau «Spektr», Ryazan, Russian Federation, roman.tishkin@mail.ru

An algorithm of monitoring the ecological state of coastal waters is presented in the paper. The algorithm makes it possible to detect oil, mineral and organic coarse pollution, thin oil films, to estimate the concentration of mineral organic pollution in the surface layer. A method of identifying shallow water zones including sand-bottomed zones and waterline phytoplankton overgrowth is presented. The pollution level of the coastal zone of the city of Regency (Brazil) is estimated using the analysis of spectral-energy characteristics of polluted and nominally clean surfaces. On the basis of the estimates obtained clustering of the initial data on the component and the total level of pollution is performed. Conclusions are made concerning total pollution of the coastal waters under consideration. An example of data processing on the basis of the algorithm presented is discussed. A hyperspectral image obtained with the help of the «Resurs-P» No. 2 satellite is considered.

Earth remote sensing, environmental monitoring, hyperspectral data, spectral brightness factor, clustering.

Citation: Guryeva M.N., Zhuravel Y.N., Tishkin R.V. Algorithm of monitoring the ecological state of coastal waters in areas of heavy economic use. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 223-232. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-223-232

References

1. Demidova L.A., Eremeev V.V., Myatov G.N., Tishkin R.V., Yudakov A.A. Segmentation of objects according hyperspectral Earth observation using artificial intelligence techniques. *Digital Signal Processing*. 2013. No. 4. P. 32-36. (In Russ.)
2. *Kosmicheskii apparat «Resurs-P» № 2* [Resurs-P № 2 Satellite]. Available at: http://www.samspace.ru/products/earth_remote_sensing_satellites/ka_resurs_p2/

3. Derkacheva A.A., Tutubalina O.V. The effectiveness of atmospheric correction for Hyperion hyperspectral images in regions with developed vegetation cover. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space*. 2014. V. 11, no 4. P. 360-368. (In Russ.)

4. Grigoreva O.V., Shilin B.V. Experience in assessment of the environmental indicators of waters ports of hyperspectral images. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2012. V. 9, no. 1. P. 156-166. (In Russ.)

5. Pimenova E.V. *Khimicheskie metody analiza v monitoringe vodnykh ob"ektov* [Chemical methods of analysis in the monitoring of water bodies]. Perm: Perm State Agricultural Academy Publ., 2011. 138 p.