Выявление и распознавание различных типов вод в прибрежной зоне Черного моря и в озерах Крыма на основе анализа гиперспектральных данных

О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, И.А. Уваров

Институт космических исследований РАН, Москва 117997, Россия E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Обсуждаются особенности данных гиперспектральных сенсоров по сравнению с данными многоканальных спектрорадиометров в их приложении к исследованию процессов и явлений в океане. Показано, что спутниковые гиперспектральные данные становятся эффективным инструментом исследования Мирового океана. Обсуждается степень информативности различных спектральных каналов и их комбинаций с точки зрения их применимости для определения гидрооптических свойств умеренно мутных и продуктивных вод прибрежной зоны морей и внутренних водоемов. Подчеркивается высокий потенциал гиперспектральных данных для выявления и распознавания различных типов антропогенных и биогенных загрязнений в прибрежных зонах. Обработка и совместный анализ разнородных спутниковых данных проводился с использованием возможностей разработанного в ИКИ РАН геопортала «See The Sea». В статье приводятся примеры использования космических гиперспектральных данных для решения задачи распознавания антропогенных загрязнений в различных акваториях залива Сиваш и для восстановления детальной картины распространения внутриводной взвеси в районе свала глубин в северо-восточной части Черного моря. В работе проведена также оценка применимости данных гиперспектрометров для выявления акваторий, подверженных интенсивному цветению водорослей.

Ключевые слова: спутниковое дистанционное зондирование, гиперспектральные сенсоры, сенсоры оптического диапазона, геопортал, прибрежные зоны, внутренние водоемы, антропогенные загрязнения, биогенные загрязнения, Черное море, Сиваш.

Введение

В настоящее время исследование прибрежных зон Мирового океана является одним из наиболее важных направлений океанологии и экологии морской среды. Прибрежные зоны подвергаются интенсивным и все более возрастающим антропогенным воздействиям, таким как: выносы рек загрязненных вод, глубинные сбросы сточных вод, несанкционированные сбросы с судов вод, содержащих нефтепродукты и т.п. Задача обнаружения областей загрязнений, выявление их природы и прогноз их распространения является весьма актуальной. Она требует для своего решения создания совершенно новых геоинформационных технологий, составной частью которых должны являться инструменты для анализа и интерпретации спутниковых данных, полученных в различных диапазонах электромагнитного спектра, метаданных и геопространственной информации. С этой целью в ИКИ РАН создан и находится в опытной эксплуатации геопортал «See The Sea» (Лупян и др., 2012; Lavrova et al., 2013). Основываясь на его возможностях, нами ведется разработка новой методики совместной обработки разнородных спутниковых данных, получаемых сенсорами, установленными на различных специализированных спутниках дистанционного зондирования Земли. На базе геопортала создан инструментарий, обеспечивающий также возможность проведения анализа данных гиперспектральной съемки в интересах исследования различных процессов, происходящих в Мировом океане (Уваров и др., 2014).

Особенности использования гиперспектральных данных в приложении к исследованию процессов и явлений в Мировом океане

Первоначально гиперспектральные методы развивались в приложении к исследованию суши. Создавались алгоритмы классификации почв и растительного покрова, выявления засоленных почв, распознавание дорог и типов их покрытия, распознавание искусственных объектов, как открыто стоящих, так и закамуфлированных, решались задачи поиска полезных ископаемых и пр. (Тронин и др., 2011; Kozoderov and Dmitriev, 2008; Ren and Chang, 2003).

Постепенно гиперспектральные данные становились эффективным инструментом и в приложении к исследованию Мирового океана. Применение данных гиперспектральных сенсоров спутникового базирования для наблюдения процессов и явлений в океане потребовало развития значительно более сложных алгоритмов по сравнению с сушей. Публикаций, посвященных этой тематике, меньше, и подавляющее большинство этих публикаций принадлежит зарубежным исследователям, из работ российских ученых можно указать лишь одну (Бондур и др., 2006).

На сегодняшний день в мире опубликовано значительное число работ, направленных на разработку и верификацию алгоритмов восстановления из гиперспектральных данных ключевых параметров состояния океана. Особое внимание уделяется прибрежным водам, представляющим собой сложную композицию фитопланктона, растворенного вещества и минеральной взвеси, при этом на оптические свойства вод этого типа оказывают влияние глубина и тип дна (Lee et al., 1999, 2007; Yacobi et al., 2011).

Задача восстановления концентрации хлорофилла-а по спутниковым данным является одной из старейших задач дистанционного зондирования. Большой вклад в развитие этого направления принадлежит российским ученым, которыми разработаны региональные алгоритмы восстановления концентрации хлорофилла-а по данным многоканальных спутниковых сканеров цвета (Kopelevich et al., 2002, 2004). Методы решения традиционной задачи восстановления концентрации хлорофилла-а продолжают развиваться и в приложении к данным гиперспекрального зондирования (Dall'Olmo and Gitelson, 2006; Schalles, 2006). Концентрация хлорофилла-а – это единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Это важнейший параметр для характеристики биомассы фитопланктона и расчета первичной продукции океанов и морей.

Целый ряд публикаций посвящен определению концентрации в прибрежных водах взвесей, органических и неорганических примесей (Li et al., 2003; Lee et al., 2007; Brando and Dekker, 2003). Эти задачи непосредственно связаны с экологическими задачами определения качества воды, зон прибрежного перемешивания, распространения речных выносов, участков прибрежных вод, загрязненных береговыми стоками и пр.

Различия в спектрах отражения различных типов водорослей лежат в основе методов их распознавания по данным гиперспектральной съемки (VahtmÄae et al., 2006; Klonowski et al., 2007). С экологической точки зрения эти методы могут применяться для обнаружения и контроля цветения токсических водорослей.

В последнее время активно развиваются и методы определения глубины и типа дна в областях мелкой воды (Brando et al., 2009; Louchard et al., 2002). Следует отметить, что все перечисленные методы находятся пока в стадии разработок.

Данная статья посвящена нашему опыту использования гиперспектральных данных для решения задачи распознавания различных типов вод, подвергшихся антропогенным и биогенным загрязнениям как в прибрежной зоне, так и во внутренних водоёмах.

Используемые данные и районы исследования

На базе действующего геопортала «See The Sea» (STS) нами начата разработка методик совместного использования данных гиперспектральных сенсоров Hyperion и HICO и данных спутниковых сенсоров OLI Landsat-8, ETM+ Landsat-7, TM Landsat-5, MODIS Terra/Aqua, ASAR Envisat, а также метеорологических данных для выявления загрязнений морей; распознавания различных типов загрязнений; и исследования динамических процессов в прибрежных зонах, влияющих на перенос загрязнений. Технология интеграции гиперспектральных данных сенсоров Hyperion обеспечивает автоматическое получение этих данных из различных центров распространения (в том числе из центра Геологической службы США (http://earthexplorer.usgs.gov/), их обработку и помещение в архивы системы STS. Данные сенсора HICO поставляются на ftp-сервер ИКИ РАН в рамках соглашения между ИКИ РАН и Naval Research Laboratory «О предоставлении данных гиперспектрометра HICO». После первичной обработки и геометрической привязки с помощью программного продукта Envi 4.3, они также заносятся в архив STS. Данные сенсоров MODIS Terra/Aqua, OLI Landsat-8, ETM+ Landsat-7, TM Landsat-5 в автоматическом режиме поступают в STS с соответствующих центров распространения данных. Радиолокационные изображения ASAR Envisat, содержащиеся в архиве геопортала STS, получены нами в рамках многочисленных научных проектов Европейского космического агентства.

Тестирование разрабатываемых методик комплексного использования спутниковых данных, включая гиперспектральные, производилось для различных районов прибрежной зоны Черного и Азовского морей и внутренних водоемов Крыма.

Возможность разделения различных типов вод основывалась на извлечении спектральных профилей гиперспектральных изображений и анализа спектральных отражательных способностей различных участков водной поверхности. Наиболее яркие результаты по разделению различных типов вод были получены для района северо-западного Крыма, включающего Перекопские озера, западную часть залива Сиваш и Каркинитский залив Черного моря. В частности, по спутниковым изображениям были выделены районы с водами, обладающими разными характеристиками (естественные морские воды; воды с повышенной концентрацией соли; воды, содержащие сернисто-кислые отходы), а также области цветения водорослей.

Выявление и распознавание различных типов загрязнений внутренних водоемов Крыма на основе гиперспектральных данных

Район Перекопских озер может служить своеобразной природной лабораторией для решения задачи классификации вод различных типов на основе их гиперспектральных изображений. Природная особенность Перекопских озер – очень высокая минерализация, достигающая 200–240‰, благодаря чему озёра издавна использовались для добычи соли. Среди солей (образующих здесь на дне озёр 10–15-метровые соленосные пласты) преобладает хлористые натрий и магний. Большая часть Перекопских озер и западная часть залива Сиваш либо используются как сырьевая база для бромного и содового заводов (озеро Старое), либо служат отстойниками многочисленных заводов (западная часть Сиваша, озеро Круглое), либо являются зонами отдыха и разведения рыбы. Причем один и тот же водоем может быть разделен дамбой, одна из частей водоема служит отстойником, а другая - является зоной отдыха. Так, например, озеро Красное разделено плотиной на северный и южный отсеки. Северный отсек используется ОАО «Крымский содовый завод» в качестве накопителя-испарителя промышленных стоков, а южный отсек является зоной отдыха. Многие отстойники в настоящее время переполнены, и загрязненная вода попадает в более чистый резервуар.

Данные гиперспектрометра Hyperion, полученные 30.08.2003, позволили однозначно разделить воды не только разных водоемов, но и отдельных частей водоемов. Для данного изображения были построены графики спектральных отражательных способностей в 9-ти характерных точках (*рис. 1*). Графики распались на несколько семейств. Наибольшую отражательную способность имели воды залива Сиваш восточнее Литовского полуострова и восточная часть запруды реки Воронцовка, причем во всем диапазоне длин волн. Максимальные значения 0,59 и 0,34 достигались на длинах волн 856 нм и 1608 нм, соответственно. Наименьшую отражательную способность имели воды Каркинитского залива Черного моря. Отражательная способность Красного озера имеет очень узкий спектр с максимумом 0,17 на длине волны 560 нм.



Рис. 1. Графики спектральной отражательной способности 9-ти различных типов вод в видимом и ближнем ИК-диапазонах, восстановленной по данным гиперспектрального сенсора Hyperion, полученным 30.08 2003 г. Цифры – соответствуют точкам, выбранным в различных водоемах (см. рис. 2)

Анализ спектральных отражательных способностей различных участков водных акваторий позволил выявить наиболее информативные спектральные каналы и их комбинации для решения задачи разделения вод, подверженных различным антропогенным загрязнениям. Для изображения сенсора Hyperion от 30.08.2003 наилучший результат был достигнут при создании цветосинтезированного RGB изображения, построенного по следующим каналам: R - 23 (579,45 нм); G - 32 (671,02 нм); B – 45 (803,30 нм) (*puc. 2*).



Рис. 2. Пример распознавания антропогенных загрязнений различного происхождения в Перекопских озерах. Цветосинтезированное изображение сенсора Hyperion от 30.08.2003. Цифрами обозначены точки, в которых строились графики спектральной отражательной способности (рис. 1): 1 - западная часть Сиваша, где находится отстойник-накопитель опасных сернистокислых отходов от производства диоксида титана ГАК «Крымский титан»; 2 – отделенная от отстойника (1) плотиной акватория, также отстойник; 3 – залив Сиваша с относительно чистой водой: 4 – северо-западная часть озера Красное, используемое ОАО «Крымский содовый завод» в качестве накопителя-испарителя промстоков; 5 - мелкий залив Сиваша, в котором резко повышена концентрация солей;

6,7 — разделенные дамбой северная и южная акватории озера Старое, используемые как сырьевая база для бромного и содового заводов;

8 – прибрежная часть Каркинитского залива Черного моря;

9 – восточная часть запруды реки Воронцовка, мелкий, сильно прогреваемый водоем

Для более детального разделения вод в различных заливах западной части Сиваша, используемых для разных технологических нужд, наиболее информативной оказалась комбинация следующих каналов: R - 51 (864,35 нм); G - 17 (518,39 нм); B – 9 (436,99 нм) (*рис. 3a*). Графики спектральной яркости, построенные для 4 точек, выбранных в четырех разных заливах, имеют существенные различия (*рис. 36*).

Совместный анализ изображений, полученных сенсором Hyperion 30.08 и сенсором TM Landsat-5 22.08 2003 (*puc. 4*) показал, что для уверенного разделения различных типов вод, содержащих различные антропогенные загрязнения, данные гиперспектрометра предоставляют лучшие возможности. Например, области 1, 2, 4 (*puc. 3a*) не разделяются на изображении TM Landsat-5 ни при каких комбинациях каналов (*puc. 4*).



Рис. 3. Пример более детального распознавания антропогенных загрязнений различного происхождения в западной части Сиваша. а) Цветосинтезированное изображение сенсора Hyperion от 30.08.2003. Цифрами обозначены точки, для которых строились графики спектральной яркости (б)



Рис. 4. Фрагмент цветосинтезированного изображения TM Landsat-5 от 22.08.2003 (каналы 5; 3; 1), полученного в том же районе, что и изображение Hyperion от 30.08.2003 (рис. 2, 3а)

Использование данных гиперспектрометра HICO для восстановления детальной картины распространения внутриводной взвеси

В периоды выпадения ливневых осадков в предгорьях Кавказа, антропогенные загрязнения (бытовые и промышленные отходы, нефтепродукты, удобрения и др.), поступающие со всего водосбора в море с речным стоком, многократно возрастают. Антропогенные загрязнения усиливаются потоками грязи, с подтапливаемых площадей. Особенно это касается горных рек с не зарегулированным стоком. Усиление речного стока горных рек носит кратковременный характер (2–3 суток), но именно в это время происходят самые масштабные загрязнения моря. Пространственная картина распространения мутных речных вод хорошо проявляется на спутниковых изображениях. Так, например, после обильных дождей, прошедших 7 и 8 ноября 2013 г. в прибрежных акваториях, примыкающих к устьям рек в северо-восточной части Черного моря, существенно увеличились зоны распространения внутриводной взвеси. Нами был проведен совместный анализ изображений гиперспектрального сенсора НІСО, сенсоров OLI Landsat-8 и MODIS Terra/Aqua, а также гидрометеорологических данных, полученных в конце первой декады ноября 2013 г. для этого района.

Привлечение к анализу гиперспектральных данных позволило восстановить детальную картину распространения внутриводной взвеси в районе свала шельфа. Данные гиперспектрального сенсора НІСО, полученные 10.11.2013 г. в 09:44 GMT над северовосточной частью Черного моря были проанализированы совместно с изображением спектрорадиометра MODIS ИСЗ Тегга, полученным с интервалом в 16 минут, в 10:00 GMT, и изображением сенсора OLI ИСЗ Landsat-8, полученным над тем же районом накануне, 09.11.2013 в 08:09 GMT (puc. 5). На цветосинтезированном изображении сенсора OLI ИСЗ Landsat-8 (каналы 4, 3, 2) отчетливо проявляется картина усиления берегового стока, вызванного дождями, прошедшими в горах за день до получения спутниковой информации. Однако, несмотря на высокое пространственное разрешение (30 м), недостаточное число спектральных каналов не позволило восстановить детально картину распространения взвеси на основе данных только этого сенсора. К анализу была привлечена карта замутненности вод, восстановленная из данных 36-канального спектрорадиометра MODIS /Terra, позволяющего получать информацию об оптических свойствах подстилающей поверхности с пространственным разрешением до 250 м. Наблюдалось качественное совпадение полей замутненности, восстановленных по данным сенсоров MODIS и НІСО, однако благодаря более высокому пространственному и спектральному разрешению, использование гиперспектральных данных позволило получить существенно более подробную картину распространения взвеси в толще воды и выявить различные типы мезомасштабных и мелкомасштабных вихрей и струй, осуществляющих перенос примесей из прибрежных зон в сторону открытого моря и "самоочищения" прибрежных вод от загрязнений различной природы.



Puc. 5. а) *HICO*, 10.11.2013, 09:44 *GMT*, разрешение 100 м, спектральные каналы R: 0,512 мкм (32); G: 0,536 мкм (24); B: 0,467 мкм (12);
б) *OLI ИC3 Landsat-8*, 09.11.2013б 08:09 *GMT*, разрешение 30 м, спектральные каналы R: 0,630 – 0,680 (4); G: 0,525 – 0,600 мкм (3); B: 0,450 – 0,515 мкм (2);
в) Карта замутненности вод, восстановленная из данных MODIS ИC3 Terra, 10.11.2013, 10:00 GMT, разрешение 500 м, спектральный канал 0,551 мкм

Проявление зон цветения водорослей на изображениях TM Landsat-5 и Hyperion

Для определения возможностей использования гиперспектральных данных для выявления зон повышенного цветения водорослей были проанализированы изображения сенсора Hyperion, полученные в августе 2003 г. над прибрежной зоной Каркинитского залива Черного моря, подверженной как антропогенным загрязнениям, связанным со сбросом сточных вод с очистных сооружений, расположенных на берегу восточной части залива, так и интенсивному цветению сине-зеленых водорослей. На основе построенных в STS графиков отражательной способности в различных точках залива: около берега, где происходит вынос загрязненных вод с очистных сооружений; в районе интенсивного цветения водорослей и в западной части залива, на максимальном удалении от берега которое захватывается кадром, были выбраны наиболее оптимальные каналы для построения цветосинтезированного изображения. Для изображения, полученного 30 августа 2003 г. сенсором Нурегіоп (*рис. 6а*), антропогенные загрязнения, связанные со сбросом сточных вод, проявляются лучше всего в 36 канале (711 нм), а цветение сине-зеленых в 21 канале (559 нм). Полученные результаты сравнивались с квазисинхронным изображением, полученном сенсором TM Landsat-5 (*рис. 66*). Анализ показал, что использование данных сенсора Hyperion позволяет лучше определять области распространения антропогенных загрязнений, по сравнению с данными сенсора TM Landsat-5, благодаря наличию дополнительных каналов в спектральной области от 690 до 750 нм. В то же время для определения интенсивности цветения водорослей и областей их распространения лучше использовать данные сенсора TM Landsat-5, поскольку спектральные каналы в необходимом для решения данной задачи диапазоне совпадают, а ширина кадра TM Landsat-5 в 25 раз больше.



Рис. 6. Выявление областей интенсивного цветения и антропогенных загрязнений на изображениях сенсоров Hyperion и TM Landsat-5 в Каркинитском заливе Черного моря в августе 2003 г. Звездочкой отмечено положение очистных сооружений

Заключение

Опыт использования изображений гиперспектрометров Hyperion и HICO для выявления и распознавания антропогенных и биогенных загрязнений в прибрежной зоне Черного моря и во внутренних водоемах Крыма показал высокий потенциал этих данных. Наличие большого числа спектральных каналов, отсутствующих у сравнимых по пространственному разрешению данных ceнcopoв Landsat-5/7/8, позволяет более детально разделять воды, содержащие различные загрязнения. Однако, стоит отметить и существенные недостатки. Основной недостаток данных Hyperion – узкая полоса обзора, всего 7,5 км при пространственном разрешении 30 м. Съемка данным сенсором производится нерегулярно, нет возможности заказать съемку интересующего района. К недостаткам данных сенсора HICO можно отнести более грубое пространственное разрешение, которое составляет 100 м и плохую географическую привязку. Ее можно улучшить только в случае, если в кадр попадают береговые «контрольные» точки. К несомненным достоинствам нужно отнести возможность заказывать съемку нужного района. Однако съемка не возможна для широт больших 55⁰. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 13-07-12017 офи-м и 13-05-12093 офи-м). Данные гиперспектрометра НІСО получены в рамках соглашения между ИКИ РАН и Naval Research Laboratory.

Литература

- 1. Бондур В.Г., Козленко Н.Н., Рыбакова Н.И. Возможности использования гиперспектральных и многоспектральных спутниковых данных для мониторинга загрязнений прибрежных акваторий океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 30–36.
- 2. Лупян Е.А., Матвеев А.М., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый сервис See the Sea инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. Т. 9. № 2. С.251–262.
- 3. Уваров И.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Организация работы с данными спутниковых гиперспектральных наблюдений для исследования процессов в Мировом океане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т.11. № 1. С. 200–212.
- 4. Тронин А.А., Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии. Обзор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 26–36.
- 5. *Brando V. E, Dekker A. G.* Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. No. 6. P. 1378–1387.
- 6. Brando V. E., Anstee J. M., Wettle M., Dekker A. G., Phinn S. R., Roelfsema C.. A physics based retrieval and quality assessment of bathymetry from suboptimal hyperspectral data // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. P. 755–770.
- Dall'Olmo G., Gitelson A. Effect of bio-optical parameter variability and uncertainties in reflectance measurements on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: modeling results //Applied optics. 2006. Vol. 45. P. 3577–3592.
- 8. *Hsuan Ren, Chein-I Chang.* Automatic spectral target recognition in hyperspectral imagery // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2003. Vol. 39. Issue 4. P. 1232–1249.
- 9. Klonowski W. M., P. Fearns R. C. S., Lynch M. J. Retrieving key benthic cover types and bathymetry from hyperspectral imagery // Journal of Applied Remote Sensing. 2007. Vol. 1 DOI: 10.1117/1.2816113.
- Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Sheberstov S.V., Evdoshenko M.A. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // Deep-Sea Research II. 2004. Vol. 51. P. 1063–1091.
- 11. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V. Sheberstov S.V., Evdoshenko M.A. Assessment of optical characteristics of atmosphere and ocean by data from satellite ocean color sensors // Eight International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Proc. SPIE 4678. 2002. P. 332–343.
- 12. Kozoderov V.V., Dmitriev E.V. Remote sensing of soils and vegetation: regional aspects // International Journal of Remote Sensing. 2008. Vol. 29. No. 9. P. 2733–2748.
- 13. Lavrova O.Yu., Loupian E.A., Mityagina M.I., Uvarov I.A., Bocharova T. Yu. See the Sea Multi-User Information System Ocean Processes Investigations Based on Satellite Remote Sensing Data // Bollettino di Geofisica teorica ed applicata. An International Journal of Earth Sciences, 2013. Vol. 54. P.146–147.
- 14. Li R.- R, Kaufman Y J, Gao B. –C., Davis C.O. Remote sensing of suspended sediments and shallow coastal waters // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. No. 3. P. 559–566.
- Lee, Z. P., K. L. Carder, C. D. Mobley, R. G. Steward, and J. S. Patch. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving depths and optical properties by optimization // Applied Optics. 1999. Vol. 38. P. 3831–3843.
- 16. Lee, Z. P., B. Casey. R.A. Arone, A.D. Weidemann, M.J. Montes, B-C Gao, W. Goode, C.O. Davis, and J. Dye. Water and bottom properties of a coastal environment derived from Hyperion data measured from the EO-1 spacecraft platform // Journal of Applied Remote Sensing. 2007. Vol. 1. SPIE DOI: 10.1117/12.791119.
- 17. Louchard E.M., Reid R.P., Stephens C.F. Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments // Optics Express. 2002. 10(26). P.1573–1584.
- Schalles J.F. Optical remote sensing techniques to estimate phytoplankton chlorophyll a concentrations in coastal waters with varying suspended matter and CDOM concentrations / Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes: Science and Management Applications (ed. L Richardson and E Ledrew). Springer: Berlin. 2006. P. 27–79.
- VahtmÄae E., Kutser T., Martin G., Kotta J. Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters - a Baltic Sea case study // Remote Sensing of Environment. 2006. Vol. 101. No. 3. P. 342–351.

20. Yacobi Y.Z., Moses W.J., Kaganovsky S., Sulimani B., Leavitt B.C. and Gitelson A.A. NIR-red reflectancebased algorithms for chlorophyll-a estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake Kinneret case study // Water Resources. 2011. Vol. 45. P. 2428–2436.

Detection and recognition of various water types in Black Sea coastal zone and in lakes of Crimea based on hyperspectral data analysis

O.Yu. Lavrova, M.I. Mityagina, I.A. Uvarov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Characteristics of hyperspectral instruments are compared to those of multispectral sensors and discussed from the point of view of their use for studying the processes and phenomena in the oceans and seas. It is shown that satellite hyperspectral data become an effective tool for world ocean research. Assessment of informative value of different spectral bands and their combinations for determination of hydrooptical properties of moderately turbid and productive waters of coastal zones of seas and inland water bodies was performed. The feasibility assessment of hyperspectral data were proved also to have high level of information content in view of detection and discrimination of different types of anthropogenic and biogenic pollution in coastal zones. Processing and joint analysis of various satellite data were performed on the basis of the "See the Sea" geoportal developed in IKI RAS. Examples of efficient use of satellite hyperspectral data for recognition of anthropogenic pollution in different areas of the Sivash Sea and for retrieval of a detailed picture of suspended matter distribution in the shelf break area of the northeastern Black Sea are presented and discussed.

Keywords: satellite remote sensing, hyperspectral sensors, optical sensors, coastal zones, anthropogenic pollution, biogenic pollution, geoportal.

References

- Bondur V.G., Kozlenko N.N., Rybakova N.I. Vozmozhnosti ispol'zovaniya giperspektral'nykh i mnogospektral'nykh sputnikovykh dannykh dlya monitoringa zagryaznenii pribrezhnykh akvatorii okeana (Possibilities of usage of satellite hyperspectral and multispectral data for pollution monitoring in ocean coastal zones), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 2, pp. 30–36.
- Loupian E.A., Matveev A.M., Uvarov I.A., Bocharova T.Yu., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I. Sputnikovyj servis See the Sea instrument dlja izuchenija processov i javlenij na poverhnosti okeana (The Satellite service See the Sea a tool for the study of oceanic phenomena and processes), *Sovremennye problemy distantsionno-go zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–262.
- 3. Uvarov I.A., Loupian E.A., Matveev A.M., Mazurov A.A., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I. Organizacija raboty s dannymi sputnikovyh giperspektral'nyh nabljudenij dlja issledovanija processov v Mirovom okeane (Management of hyperspectral remote sensing data for studies of world ocean processes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 200–212.
- 4. Tronin A.A., Gornyi V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh. Spektral'nye metody distantsionnogo zondirovaniya v geologii. Obzor (Spectral remote sensing for mineral exploration. A review), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 26–36.
- 5. Brando V. E, Dekker A. G., Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, No. 6, pp. 1378–1387.
- 6. Brando, V. E., J. M. Anstee, M. Wettle, A. G. Dekker, S. R. Phinn, and C. Roelfsema, A physics based retrieval and quality assessment of bathymetry from suboptimal hyperspectral data, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, pp. 755–770.
- 7. Dall'Olmo G., and Gitelson A., Effect of bio-optical parameter variability and uncertainties in reflectance measurements on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: modeling results, *Applied optics*, 2006, Vol. 45, pp. 3577–3592.
- 8. Hsuan Ren, Chein-I Chang, Automatic spectral target recognition in hyperspectral imagery, *IEEE Transactions* on Aerospace and Electronic Systems, 2003, Vol. 39, Issue 4, pp. 1232–1249.
- 9. Klonowski, W.M., P.R. C.S. Fearns, and M.J. Lynch, Retrieving key benthic cover types and bathymetry from hyperspectral imagery, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2007, Vol. 1, doi: 10.1117/1.2816113.

- Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Sheberstov S.V., Evdoshenko M.A., Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas, *Deep-Sea Research II*, 2004, Vol. 51, No. 10-11, pp. 1063–1091.
- 11. Kopelevich, O.V., Burenkov, V.I., Ershova, S.V. Sheberstov S.V., Evdoshenko M.A. Assessment of optical characteristics of atmosphere and ocean by data from satellite ocean color sensors, *Eighth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Proceedings SPIE 4678*, 2002, pp. 332–343.
- 12. Kozoderov V.V., Dmitriev E.V., Remote sensing of soils and vegetation: regional aspects, *International Journal of Remote Sensing*, 2008, Vol. 29, No. 9, pp. 2733–2748.
- Lavrova O.Yu., Loupian E.A., Mityagina M.I., Uvarov I.A., Bocharova T. Yu. See the Sea Multi-User Information System Ocean Processes Investigations Based on Satellite Remote Sensing Data // Bollettino di Geofisica teorica ed applicata. An International Journal of Earth Sciences, 2013, Vol.54, pp.146–147.
- 14. Li R.-R., Kaufman Y. J, Gao B.-C., Davis C.O. Remote sensing of suspended sediments and shallow coastal waters, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, No. 3, pp. 559–566.
- Lee, Z. P., K. L. Carder, C. D. Mobley, R. G. Steward, and J. S. Patch, Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving depths and optical properties by optimization, *Applied Optics*, 1999, Vol. 38, pp. 3831–3843.
- 16. Lee, ZhongPing, B. Casey. R. A. Arone, A. D. Weidemann, M. J. Montes, B-C Gao, W. Goode, C.O. Davis, and J. Dye, Water and bottom properties of a coastal environment derived from Hyperion data measured from the EO-1 spacecraft platform, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2007, Vol. 1, SPIE doi: 10.1117/12.791119.
- 17. Louchard E M, Reid R P, Stephens C F., Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments, *Optics Express*, 2002, Vol. 10, No. 26, pp.1573–1584.
- Schalles J.F., Optical remote sensing techniques to estimate phytoplankton chlorophyll a concentrations in coastal waters with varying suspended matter and CDOM concentrations, *Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes: Science and Management Applications* (ed. L Richardson and E Ledrew), Springer: Berlin, 2006, pp. 27–79.
- VahtmÄae E., Kutser T., Martin G., Kotta J., Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters - a Baltic Sea case study, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 101, No. 3, pp. 342–351.
- Yacobi Y. Z., Moses W. J., Kaganovsky S., Sulimani B., Leavitt B.C. and Gitelson A.A., NIR-red reflectancebased algorithms for chlorophyll-a estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake Kinneret case study, *Water Resources*, 2011, Vol. 45, pp. 2428–2436.