

Исследование возможностей гиперспектральной съемки для мониторинга состояния водных объектов

А.Н. Виноградов¹, В.В. Егоров², А.П. Калинин³, А.И. Родионов¹, И.Д. Родионов¹
И.П. Родионова¹

¹НПЦ «Реагент», Москва, 125190, Россия

E-mail: office@reagent-rdc.ru

²Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: victor_egorov@mail.ru

³Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, 119526, Россия

E-mail: kalinin@ipmnet.ru

Исследуются возможности использования данных авиационной гиперспектральной съемки для мониторинга состояния водных объектов (на примере акватории Невской губы). Съемка проводилась с самолета АН-2 с высоты 1000 м при скорости полета 120 км/ч в октябре 2015 г. Высота Солнца составляла около 17 град. В ходе предварительной обработки полученных гиперкубов выполнялся пересчет значений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ). В качестве эталонного источника при этом использовались результаты регистрации излучения от белого прорезиненного полотна размером 3 м × 3 м. Выполнена тематическая обработка гиперспектральных изображений и спектров по акватории Невской губы вблизи защитной дамбы Санкт-Петербурга. Сравнение измеренных спектров и спектров, взятых из литературных источников, показало их удовлетворительное совпадение. Для оценки суммарной концентрации содержания твердой взвеси и фитопланктона в воде использовалось регрессионное выражение, связывающее значения указанной концентрации со средним значением КСЯ в диапазоне 590–710 нм. Точность оценки содержания концентрации взвесей составила порядка 12%. Полученные в работе результаты свидетельствуют о целесообразности осуществления оперативного авиационного мониторинга экологического состояния водных бассейнов.

Ключевые слова: гиперспектрометр, спектр, взвесь, фитопланктон, водоем, концентрация, изображение, дамба, экология

Одобрена к печати: 14.02.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-125-134

Введение

Вопросы оперативной оценки экологического состояния водоемов представляются весьма актуальными в связи с постоянно возрастающей экологической нагрузкой.

Однако здесь возникает проблема, обусловленная использованием адекватных методов и инструментария. Очевидно, что методы «точечных» контактных измерений, проводимых с исследовательских судов и сопровождающихся спектральной съемкой и забором воды в водоеме, страдают рядом недостатков, связанных с фрагментарностью таких оценок и низкой оперативностью. Альтернативой контактным методам измерений может служить метод дистанционного определения степени загрязнения водного бассейна с аэрокосмических носителей. Однако и этот метод не свободен от недостатков. В частности, обработка и корректная интерпретация данных дистанционного зондирования (ДЗ) требует наличия априорной информации об измеряемых параметрах зондируемого объекта, получаемой на обучающих участках или адекватных теоретических или эмпирических моделей, описывающих их состояние (Балтер, Егоров, 1981). Однако на практике такая информация часто бывает неполной.

В связи с этим целесообразно исследовать возможности дистанционного метода по определению загрязнения водных объектов по данным авиационной гиперспектральной

съемки, так как гиперспектрометр представляет собой исследовательский прибор с широкими возможностями и его использование обусловлено еще и тем, что он позволяет проводить одновременно широкий круг исследований. Следует отметить, что данная работа не посвящена измерению количества взвеси в воде, ее целью была проверка работоспособности предлагаемого метода с использованием только дистанционных измерений и опорой на некоторые модельные результаты и литературные данные измерений коэффициента спектральной яркости (КСЯ).

Проблемы исследования экологического состояния водоемов

Научные разработки, относящиеся к рассматриваемой проблеме – исследованию экологического состояния внутренних водоемов, были начаты с 40-х годов прошлого столетия (Кринов, 1947; Аванесов, Снеткова, 1981). Можно также сослаться на результаты исследований по оценке прозрачности вод пресноводных водоемов по данным дистанционных измерений в трех спектральных диапазонах: 470, 550 и 660 нм (Егоров, Тарнопольский, 1977). Однако использование приведенных в этой работе графических зависимостей для решения обратных задач ДЗ, т.е. определения степени загрязнения исследуемого водоема, представляется малоперспективным, поскольку не ясно, как связаны значения прозрачности с содержанием взвесей в воде.

В работе (Fargoq, 2011) приводятся графики КСЯ для различных значений суммарной концентрации твердых взвесей и фитопланктона в воде (рис. 1).

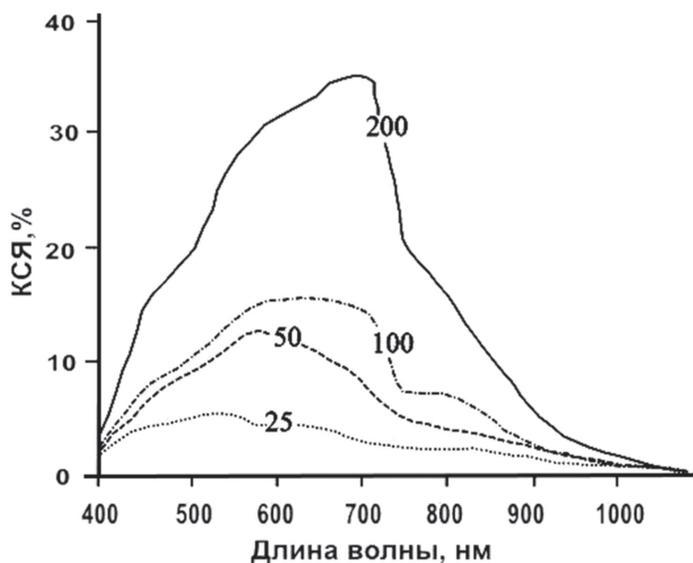


Рис. 1. Графики КСЯ в зависимости от величины суммарного содержания твердых взвесей и фитопланктона в воде (в мг/л)

В статье (Нап, 1997) приводятся результаты лабораторных экспериментов по измерению КСЯ в зависимости от концентраций глины и фитопланктона (algae-laden), выпол-

няемому для каждой взвеси по отдельности, что также затрудняет их использование при интерпретации данных гиперспектрального дистанционного зондирования.

Заслуживающей внимания является работа (Григорьева, Шилин, 2012), в которой приводятся материалы гиперспектральной съемки и измерений *in situ* по акватории морского порта Санкт-Петербурга. В частности, в ней даны графики КСЯ для различных значений суммарных концентраций крупнодисперсной взвеси и фитопланктона (см. рис. 2).

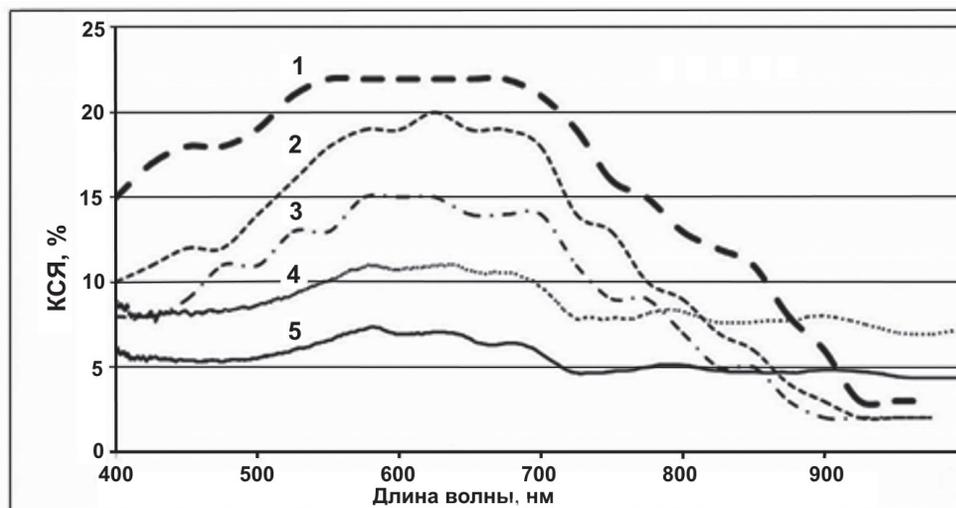


Рис. 2. Графики КСЯ для различных уровней загрязнения акватории морского порта г. Санкт-Петербурга: 1 – крайне высокий уровень загрязнения (более 300 мг/л); 2 – высокий уровень загрязнения (около 200 мг/л); 3 – низкий уровень загрязнения (20–50 мг/л); 4 – крупнодисперсная взвесь в реке (около 30 мг/л); 5 – вынос крупнодисперсной взвеси из реки – менее 20 мг/л)

В этой работе также разработаны методы и алгоритмы выявления и количественной оценки суммарных объемов механических взвесей и фитопланктона. В частности, было получено регрессионное выражение для связи среднего значения $КСЯ_{cp}$ (в процентах) в диапазоне 590–710 нм – с суммарным содержанием взвесей в воде:

$$КСЯ_{cp} = (0,043 \ln(C27) - 0,044) \cdot 100, \% . \quad (1)$$

Указанные методы и алгоритмы были применены к обработке гиперспектральных данных, полученных в ходе авиационной съемки акватории Финского залива. Несмотря на то, что в приведенную выше формулу (1) входят лишь среднее значение КСЯ и суммарная концентрация механических взвесей и фитопланктона в воде, она может быть использована для верификации результатов, полученных в наших экспериментах по гиперспектральной съемке акватории Невской губы.

Описание района и материалы гиперспектральной съемки

Район съемки – акватория Невской губы был выбран нами не случайно. Акватория включает в себя восточную часть Финского залива. В вершину Невской губы несколькими

рукавами впадает р. Нева. Антропогенное воздействие на акваторию Невской губы всегда было интенсивным, а она в свою очередь оказывала влияние на прилегающую часть Финского залива. Одной из интересных с точки зрения экологии зон акватории Невской губы являлась зона, расположенная вблизи защитной дамбы Санкт Петербурга (рис. 3), где проходят наиболее динамичные гидрологические процессы, связанные с переносом взвеси и фитопланктона.

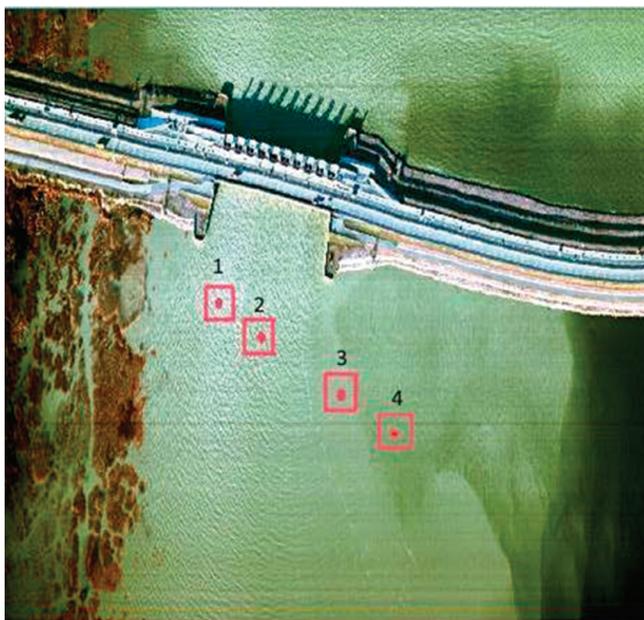


Рис. 3. Гиперспектральное RGB-изображение исследуемого участка акватории Невской губы вблизи защитной дамбы Санкт-Петербурга. Красными рамками (1–4) выделены локальные участки на трассе полета самолета, которые были подвергнуты детальному спектральному и интерпретационному анализу

Гиперспектральная съемка акватории Невской губы в районе защитной дамбы проводилась с борта самолета с высоты 1000 м при скорости полета 120 км/ч в ясную погоду 28 октября 2015 года. Среди полученных материалов был выбран массив данных для участка, гиперспектральное RGB-изображение которого показано на рис. 3. К сожалению, в момент съемки высота Солнца над горизонтом была равна 17° и, следовательно, интенсивность падающего солнечного излучения была небольшой. Это создает определенные трудности при обработке и интерпретации результатов измерений, однако оправданием проведения измерений в этот сезон служит то, что экологические катастрофы могут иметь место в любое время. В качестве бортового сенсора использовался гиперспектрометр ВИД – ИКЗ (Vinogradov et al., 2016), разработанный и созданный в ЗАО «НПЦ «Реагент». Основные характеристики этого гиперспектрометра приведены в табл. 1.

Даже визуальный анализ RGB-снимка (рис. 3) участка акватории, подвергнутого съемке, говорит о том, что поверхностное загрязнение воды пространственно неоднородно: ближе к створу плотины вода сильнее загрязнена взвесями глины и фитопланктона, чем на удалении от него, что, возможно, связано с большей турбулентностью в локальной зоне 1 (рис. 3). Это подтверждается и различием спектров (рис. 4) в локальных зонах 1–4.

Таблица 1. Основные характеристики гиперспектрометра ВИД – ИКЗ

Спектральный диапазон, мкм	0,4–1,0
Угловое поле зрения, град.	35
Пространственное разрешение (с высоты 1000 м), м	1,0
Число спектральных каналов	до 500
Частота кадров, 1/с	70

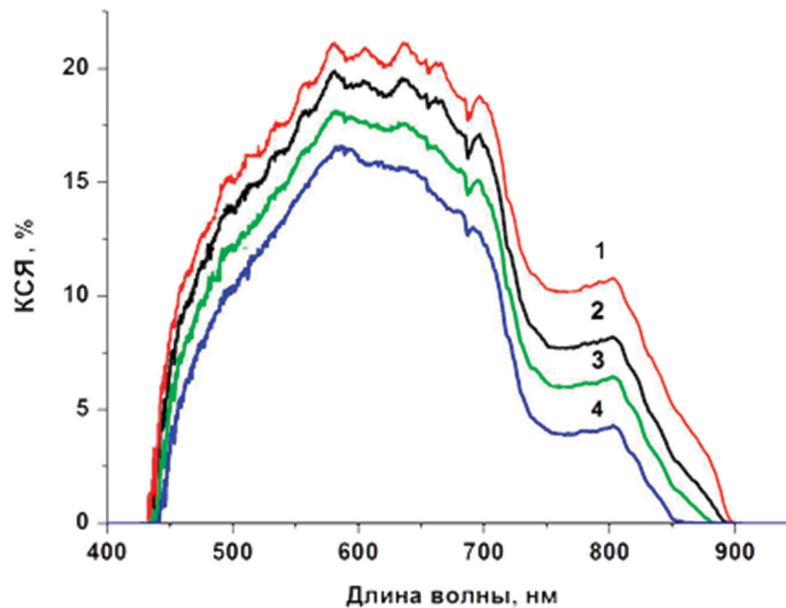


Рис. 4. Графики КСЯ для четырех локальных зон, показанных на рис. 3

В то же время графики рис. 4 показывают, что состав взвесей в локальных зонах 1–4 примерно постоянен. Об этом, в частности, говорит форма практически идентичных кривых КСЯ.

Методика обработки данных гиперспектральных измерений

Первый этап обработки гиперспектральных данных (гиперкубов) включал в себя процедуру пересчета измеренных значений спектральной плотности энергетической яркости в значения КСЯ, причем в качестве эталонного отражателя использовалось специальное прорезиненное полотно белого цвета размером 3м × 3м, которое подвергалось съемке в начале и в конце полета. Полотно располагалось на экспериментальном полигоне в 15 мин лета от объекта съемки. Погода в это время была устойчивой, облачности не наблюдалось, поэтому следует считать, что результаты пересчета коэффициента спектральной яркости (СПЭЯ) в КСЯ были корректными. Переход от СПЭЯ к КСЯ позволяет в значительной степени исключить влияние атмосферы.

На втором этапе проводилась тематическая обработка результатов гиперспектральных измерений. В нашем случае – это процедура оценки параметров состояния водной среды исследуемой акватории. Известно, что основными загрязнителями водной среды Невской губы служат: частицы твердой взвеси, прежде всего глины и фитопланктона.

Для решения обратной задачи ДЗ, т.е. в нашем случае для определения значений концентраций твердой взвеси и планктона необходимо знать точную связь значений КСЯ со значениями указанных параметров. Поскольку теоретические модели, определяющие такую связь, в литературе отсутствуют, было решено воспользоваться данными экспериментальных измерений, выполненных в работах (Григорьева, Шилин, 2012).

Результаты наших исследований показали, что спектр водной поверхности акватории Невской губы не обладает какими-либо специфическими особенностями, а его максимум довольно «плоский». Поэтому осреднение значений КСЯ в диапазоне 590–710 нм, как это предусматривалось в процедуре, предложенной в работе (Григорьева, Шилин, 2012), хоть и приводит к некоторому уменьшению информативности данных, но при этом позволяет существенно увеличить отношение сигнал/шум, что немаловажно при зондировании воды в условиях низкого Солнца. Для получения модельных оценок концентрации взвесей в локальных зонах 1–4 использовалась формула (1), приведенная выше. По ней нами была построена зависимость средних значений КСЯ для диапазона 590–710 нм от концентрации взвеси для кривых, приведенных на *рис. 5* (крестики). На этом рисунке цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены проекционные линии, показывающие значения средних КСЯ для локальных зон (1–4) соответственно. Пересечение этих линий со сплошной кривой позволило определить значения суммарных концентраций взвеси в воде для указанных локальных зон. Результаты этих вычислений приведены в *табл. 2*. Кроме того, на этом рисунке нанесены квадратики, полученные для средних КСЯ (в диапазоне 590–710 нм) из работы (Fargoq, 2011).

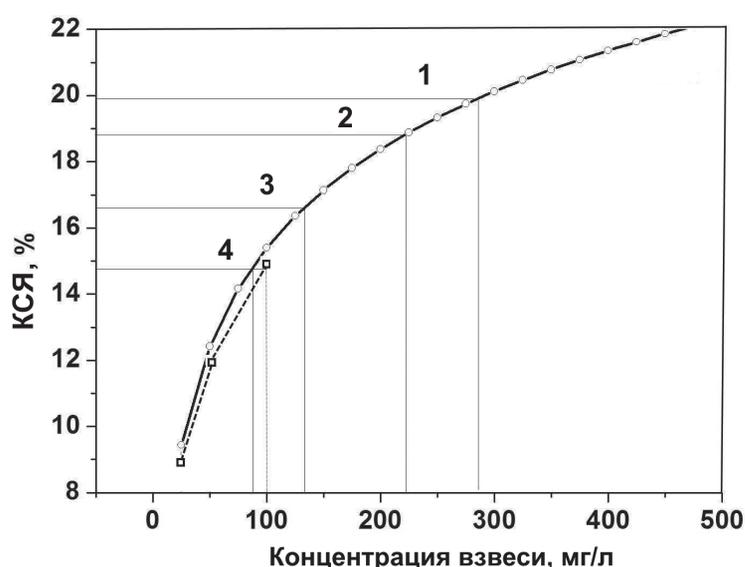


Рис. 5. График зависимости КСЯ от концентраций взвеси, построенный по формуле (1) из (Григорьева, Шилин, 2012) (кружочки), а также квадратики, полученные на основе работы (Fargoq, 2011) (см. рис. 1). Средние значения КСЯ: 1 – 19,96; 2 – 18,43; 3 – 16,65; 4 – 14,81

Таблица 2. Значения средних КСЯ и концентраций взвеси в локальных зонах 1–4

<i>Номер локальной зоны</i>	<i>КСЯ_{ср}</i>	<i>Концентрация взвеси, мг/л</i>
1	19,96	235
2	18,43	180
3	16,65	125
4	14,81	78

Поскольку, согласно работе (Исимару, 1980), вся информация о восходящем от объекта зондирования излучении заключена в огибающей спектра, в качестве другого способа решения задачи о содержании суммарной взвеси в воде было выполнено сравнение графика КСЯ (рис. б), измеренного в локальной зоне 4, с графиками, полученными в работе (Fagoog, 2011). Для построения графика спектра со значением концентрации взвеси равным 87,5 мг/л была выполнена процедура линейной интерполяции для графиков с концентрациями взвесей 50 мг/л и 100 мг/л.

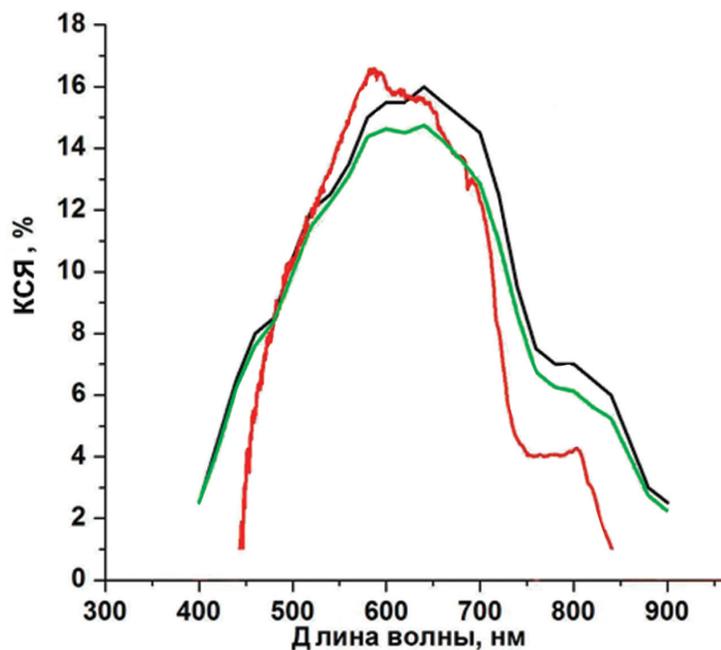


Рис. 6. Сравнение графиков КСЯ, полученных в локальной зоне 4 (красный цвет) и в работе (Fagoog, 2011) (для концентрации суммарной взвеси 100 мг/л – черный и 87,5 мг/л – зеленый)

Такое качественное сравнение позволяет получить еще одно оценочное значение концентрации взвеси в воде Невской губы, которое находится в интервале 87,5–100 мг/л. Совпадение оценочных результатов, полученных двумя различными способами, подтвердило правильность наших результатов. Из сравнения этих результатов был сделан вывод, что максимальная погрешность оценки концентрации взвеси составляет порядка 12,5 мг/л или 12%.)

Обсуждение результатов

Из анализа гиперспектральных данных, полученных в ходе авиационной съемки (рис. 3), видно, что RGB-изображения являются эффективным средством качественного оперативного контроля за состоянием поверхностных вод акваторий, что обусловлено высоким пространственным и спектральным разрешением сенсора. На снимке наблюдаются участки акватории с загрязненной и относительно чистой водой, а также участки заболачивания Невской губы, расположенные вдоль берега (в левой части снимка). При этом даже визуально на рис. 3 уверенно выделяются локальные участки с различной степенью замутненности.

Анализ графиков КСЯ (рис. б) и данных табл. 2 для локальных зон 1–4, выделенных на снимке (рис. 3), позволяет заключить, что степень загрязнения воды монотонно снижается по мере удаления от створа защитной дамбы, в области которого, очевидно, имеет место сильная турбулентность воды и, следовательно, более интенсивный подъем взвесей глины и планктона со дна водоема. В целом результаты оценки степени загрязнения вод Невской губы в районе защитной дамбы удовлетворительно согласуются с данными, полученными в работе (Григорьева, Шилин, 2012), и указывают на наличие значительных концентраций взвесей.

Относительная точность оценки концентраций взвеси по методике, представленной в работе (Григорьева, Шилин 2012; Fagoog, 2011), и гиперспектральным данным, полученных нами, составляет около 12%.

Заключение

Результаты настоящего исследования позволяют утверждать, что авиационная гиперспектральная съемка водных объектов дает возможность достаточно эффективно осуществлять качественный оперативный мониторинг экологического состояния водоемов: озер, рек, водохранилищ, каналов и др. Основной вклад в значения КСЯ воды Невской губы вносят примесь глины и фитопланктон (сине-зеленые водоросли). Это подтверждается удовлетворительным совпадением измеренных и модельных спектров. При этом относительная точность количественного определения концентраций суммы примесей составляет около 12%. К сожалению, отсутствие экспериментальных данных по измерению КСЯ воды для различных контролируемых значений концентраций компонент взвесей и их процентных сочетаний не дает возможности определять концентрации взвесей глины и водорослей по отдельности. Однако даже оценка суммарной концентрации говорит о целесообразности осуществления оперативного авиационного мониторинга экологического состояния пресноводных бассейнов.

Литература

1. Аванесов Г.А., Снеткова Н.И. Многозональные аэрокосмические съемки Земли. М.: АН СССР, 1981. С. 100–117.
2. Балтер Б.М., Егоров В.В. Статистическая оценка состояния природных объектов по данным дистанционных измерений // Исследования Земли из космоса. 1981. № 3. С. 46–55.
3. Григорьева О.В., Шилин Б.В. Опыт оценки экологических характеристик акваторий морских портов по данным видеоспектральной аэросъемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. ИКИ РАН. 2012. Т. 9. № 1. С. 156–166.
4. Егоров В.В., Тарнопольский В.И. Физические основы дистанционного зондирования Земли из космоса. Баку: Изд-во «Элм», 1977. С. 38–100.
5. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. М.: Мир, 1980. Т. 1. 280 с.
6. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.
7. Farooq S. Spectral reflectance of land covers, Department of Geology, Aligahr Museum university. 2011. URL: <http://www.geol-amu.org/notes/mlr-1-8.htm>.
8. Han L. Spectral reflectance with varying suspended sediment concentration in clear and algae-laden waters // Photogrammetric Engineering & Remote sensing. 1997. V. 6. No. 6. P. 701–705.
9. Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P., Rodionov A.I., Rodionov I.D. A line of aviation hyperspectrometers in the UV, visible, and near-IR ranges // Journal of Optical Technology. 2016. Vol. 83. Issue 4. P. 237–243.

Investigation of hyperspectral survey capabilities for monitoring water bodies state and water quality

A.N. Vinogradov¹, V.V. Egorov², A.P. Kalinin³, A.I. Podionov¹, I.D. Rodionov¹
I.P. Rodionova¹

¹Reagent Research & Development Center, Moscow 125190, Russia
E-mail: office@reagent-rdc.ru

²Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: victor_egorov@mail.ru

³A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Moscow 119526, Russia
E-mail: kalinin@ipmnet.ru

We investigate the feasibility of using aviation hyperspectral survey data for monitoring water bodies state and water quality (by example of the Nevskaya Guba area). The aviation survey was performed in October, 2015, from board of AN-2 airplane at an altitude of 1000 m and a speed 120 km/h. The height of the sun was about 17 degrees. The obtained hypercube data were recalibrated with respect to a reference white rubber-coated cloth 3x3 meters in size (used as a reference reflective surface). Hyperspectral images and spectrums of certain areas of water bodies of Nevskaya Guba near the protective dam in St. Petersburg area were processed. A comparison of our data to reference spectral data from literature showed a satisfactory similarity. To evaluate the concentration of total suspended solid material and phytoplankton in water, a regression analysis was used which established the concentration dependency on the average value of reflectance factor in the 590–710 nm range. The accuracy of the concentration estimate was within 12%. Overall results suggest feasibility of hyperspectral aerial monitoring the ecological state of water bodies.

Keywords: hyperspectrometer, spectrum, suspended solid, phytoplankton, basin, concentration, image, dam, environment

Accepted: 14.02.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-125-134

References

1. Avanesov G.A., Snetkova N.I., *Mnogozonealnye aerokosmicheskie semki Zemli* (Multispectral aerospace Earth photography), Moscow: AN SSSR, 1981, pp. 100–117.
2. Balter B.M., Egorov V.V., *Statisticheskaya otsenka sostoyaniya prirodnykh obektov po dannym distantsionnykh izmerenii* (Statistical estimation of the natural objects state on the data of remote measurement), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1981, No. 3, pp. 46–55.
3. Grigor'eva O.V., Shilin B.V., *Opyt otsenki ekologicheskikh kharakteristik akvatorii morskikh portov po dannym videospektral'noi arosemki* (Experience of environment characteristics estimation for marine ports area of water area on videospectral survey data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 156–166.
4. Egorov V.V., Tamopolskii V.I., *Fizicheskie osnovy distatsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Physical base of remote sensing Earth from space), Proc. *Mehzdunarodny uchebny seminar OON po primeneniyu distantsionnogo zondirovaniya* (UN international training seminar on remote sensing application), Baku, October 7–19, 1977, Baku: Izd-vo Elm, 1977, pp. 38–100.
5. Isimaru A., *Rasprostranenie i rasseyanie voln v sluchaino neodnorodnykh sredakh* (Propagation and scattering waves in random heterogeneous media), Moscow: Izd-vo Mir, 1980, Vol. 1, 280 p.
6. Krinov E.L., *Spektral'naya otrazhatelnaya sposobnost prirodnykh obrazovaniy* (Spectral reflectance of natural objects), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1947, 271 p.
7. Farooq S., *Spectral reflectance of land covers*, Department of Geology, Aligahr Museum university, 2011, URL: <http://www.geol-amu.org/notes/mlr-1-8.htm>.
8. Han L., Spectral reflectance with varying suspended sediment concentration in clear and algae-laden waters, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1997, Vol. 6, No. 6, pp. 701–705.
9. Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P., Rodionov A.I., Rodionov I.D., A line of aviation hyperspectrometers in the UV, visible, and near-IR ranges, *Journal of Optical Technology*, 2016, Vol. 83, Issue 4, pp. 237–243.