

**А. Н. Виноградов, В. В. Егоров, А. П. Калинин,
А. И. Родионов, И. Д. Родионов, И. П. Родионова**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЁМКИ
ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ
ОБЪЕКТОВ (НА ПРИМЕРЕ НЕВСКОЙ ГУБЫ)**

Представлено к печати
заместителем директора ИКИ РАН
Р. Р. Назировым

The Research of Hyperspectral Survey Possibility for Monitoring Water Object State (on the Nevskaya Gouba Example)

*A. N. Vinogradov, V. V. Egorov, A. P. Kalinin,
A. I. Rodionov, I. D. Rodionov, I. P. Rodionova*

The possibilities of using aviation hyperspectral survey data for monitoring of inland water bodies state are researched. Thematic processing of hyperspectral images and spectrums on the Nevskaya gouba aquatory near from St. Petersburg protecting dike was carried out. The graphs of spectral reflectance received from literature for loam and phytoplankton mixtures in the water were used as models. The comparison of real and model spectrums showed their satisfactory coincidence.

Keywords: hyperspectrometer, monitoring, pollution, Nevskaya gouba, loam, phytoplankton, spectrum, accuracy.

Исследование возможностей гиперспектральной съёмки для мониторинга состояния водных объектов (на примере Невской губы)

*A. N. Виноградов¹, В. В. Егоров², А. П. Калинин³,
А. И. Родионов¹, И. Д. Родионов¹, И. П. Родионова¹*

¹ Закрытое акционерное общество Научно-технический центр «Реагент» (ЗАО «НТЦ «Реагент»)

² Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

³ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН)

Исследуются возможности использования данных авиационной гиперспектральной съёмки для мониторинга состояния внутренних водоёмов. Выполнена тематическая обработка гиперспектральных изображений и спектров по акватории Невской губы вблизи защитной дамбы Санкт-Петербурга. В качестве модельных спектров использованы графики спектральных коэффициентов яркости, полученные из литературных источников для примесей глины и фитопланктона в воде. Сравнение реальных и модельных спектров показало их удовлетворительное совпадение.

Ключевые слова: гиперспектрометр, мониторинг, загрязнение, Невская дамба, глина, фитопланктон, спектр, точность.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы оперативной оценки качества воды пресноводных водоёмов представляются весьма актуальными в связи с постоянно возрастающей экологической нагрузкой, вызванной ростом потребления воды для бытовых и производственных нужд и сбросом отходов. Однако здесь возникает проблема, обусловленная использованием адекватных методов и инструментария. Очевидно, что методы «точечных» контактных измерений, проводимых с исследовательских судов и сопровождающихся спектральной съёмкой и забором воды в водоёме, страдают рядом недостатков, связанных с фрагментарностью таких оценок и низкой оперативностью, хотя точность камеральных исследований может быть при этом достаточно высокой.

Альтернативой контактными 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, либо 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 съёмки. Исследования проводились на примере изучения акватории Невской губы в районе защитной дамбы Санкт-Петербурга. Выбор гиперспектрометра в качестве бортового сенсора связан с тем, что он обеспечивает получение максимума информации о состоянии зондируемого объекта в оптическом диапазоне длин волн [Исимару, 1980].

STATE OF THE ART

Современное состояние исследуемой проблемы характеризуется фрагментарностью и отсутствием чёткой направленности, что можно отнести и к дистанционному зондированию в целом. Это обстоятельство обусловлено сложностью и трудоёмкостью работ по созданию исчерпывающей базы данных о связи спектральных и предметно-специфических характеристик различных природных и антропогенных объектов земной поверхности. Наличие такой многодисциплинарной базы позволило бы успешно решать задачи тематической обработки данных ДЗ. Поэтому в настоящее время указанная проблема решается на примерах отдельных объектов и их состояний. В частности, это касается и данной области исследования — изучения возможности определения степени загрязнения водных объектов.

Научные разработки, относящиеся к рассматриваемой проблеме, были начаты ещё в 40-х годах прошлого столетия [Аванесов, Снеткова, 1981; Исимару, 1980; Кринов, 1947; Оптика океана, 1983]. Они, за редким исключением [Исимару, 1980], касались экспериментальных исследований по изучению содержания взвесей, прежде всего *хлорофилла-а*, в морской воде с помощью индекса цветности — отношения интенсивности восходящего излучения в двух спектральных каналах: 443 и 670 нм [Yoder et al., 2001]. Однако, несмотря на распространённость этого метода на практике, он мало подходит к решению нашей проблемы, поскольку морская вода не содержит тех взвесей, которые характерны для внутренних водоёмов. Кроме того, растворённые в морской воде соли придают дополнительную голубую окраску, изменяя её спектр.

Можно также сослаться на результаты исследований по оценке прозрачности вод пресноводных водоёмов по данным дистанционных измерений спектральных коэффициентов яркости (СКЯ) в трёх спектральных диапазонах: 470, 550 и 660 нм (рис. 1) [Егоров, Тарнопольский, 1977]. Однако целесообразность использования зависимостей, приведённых на рис. 1, для решения обратных задач ДЗ, т.е. определения степени загрязнения исследуемого водоёма представляется мало перспективной, поскольку неясно как связаны значения прозрачности с содержанием взвесей в воде. Кроме того, вызывают сомнения слишком малые значения СКЯ, приведённые на рис. 1 (см. также рис. 2).

Известно, что свет, падающий на водную толщу, отражается от неё, частично поглощается и проходит внутрь последней. Графики

процентных соотношений таких трансформаций световых волн толщей чистой воды приведены на рис. 2 [Faroog, 2011].

Из рис. 2 следует, что волны длиннее 0,8 мкм практически полностью поглощаются водой, поэтому в инфракрасном диапазоне водные объекты выглядят черными. В видимом же диапазоне вода прозрачна и имеет голубоватый оттенок.

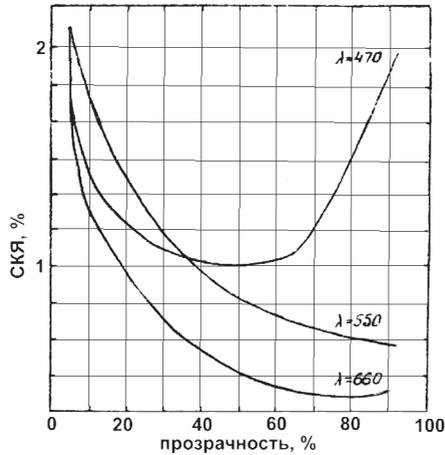


Рис. 1. Зависимость СКЯ воды от прозрачности для длин волн 470, 550 и 660 нм

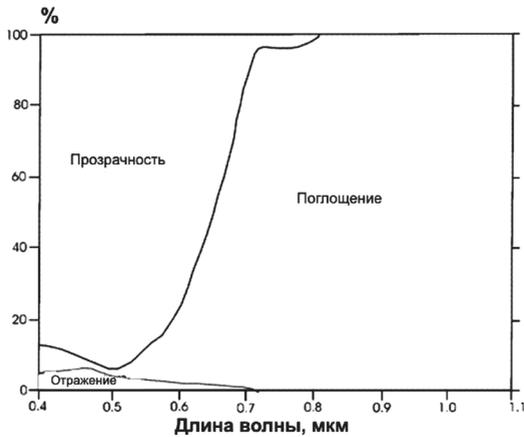


Рис. 2. Процентные соотношения отражения, пропускания (прозрачности) и поглощения световых волн в чистой воде

Кроме того, в работе [Fagoog, 2011], приводятся спектральные коэффициенты яркости для различного суммарного содержания твёрдых взвесей в воде (рис. 3). К сожалению, в этой работе не приводятся какие-либо сведения, как получены эти зависимости, для какого вида воды (морской или речной), для каких взвесей. Это всё снижает возможности использования результатов этой работы применительно к решению нашей проблемы.

Обратимся также к статье [Нап, 1997], в которой приводятся результаты лабораторных экспериментов по измерению СКЯ в зависимости от концентраций глины и фитопланктона (*algae-laden*), выполняемому для каждой взвеси по отдельности. На рис. 4 приведены экспериментальные графики СКЯ воды со значениями концентрации глины в качестве параметра от нуля до 500 мг/л с интервалом в 25 мг/л, а на рис. 5 — графики СКЯ с аналогичными значениями концентрации фитопланктона.

Из сравнения графиков рис. 4 и 5 видно, что они отличаются друг от друга по своей структуре. Например, на графиках СКЯ для взвешенного в воде фитопланктона наблюдается характерный пик на длинах волн 710–720 нм, который отсутствует на графиках для фракций глины. Таким образом, величина этого пика может служить дополнительной информацией при тематической интерпретации данных дистанционных гиперспектральных измерений в случае отсутствия синхронных наблюдений *in situ*.

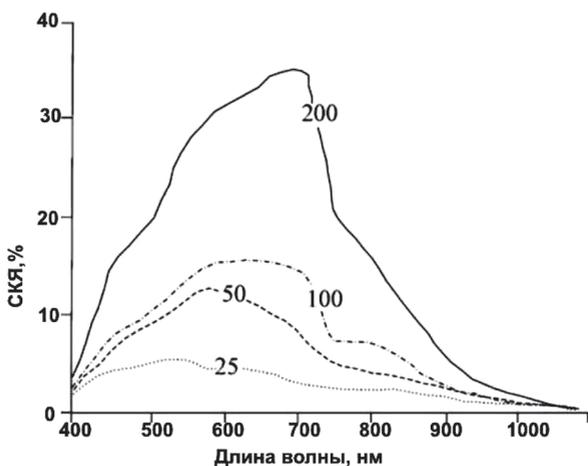


Рис. 3. Графики СКЯ в зависимости от величины суммарного содержания твёрдых взвесей в воде (в мг/л)

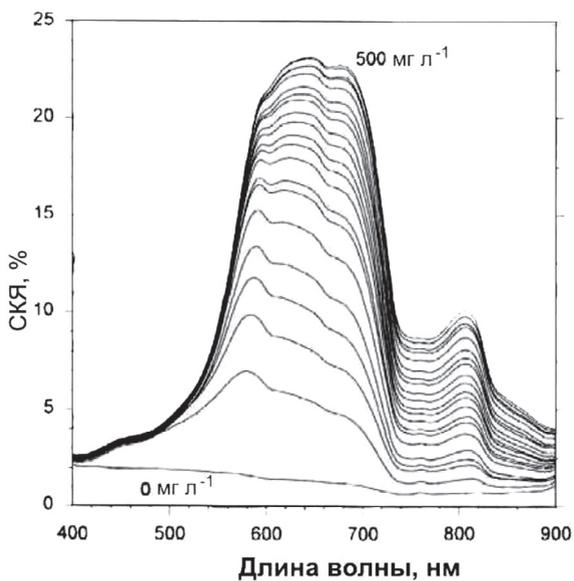


Рис. 4. Графики СКЯ для различных концентраций глины в воде

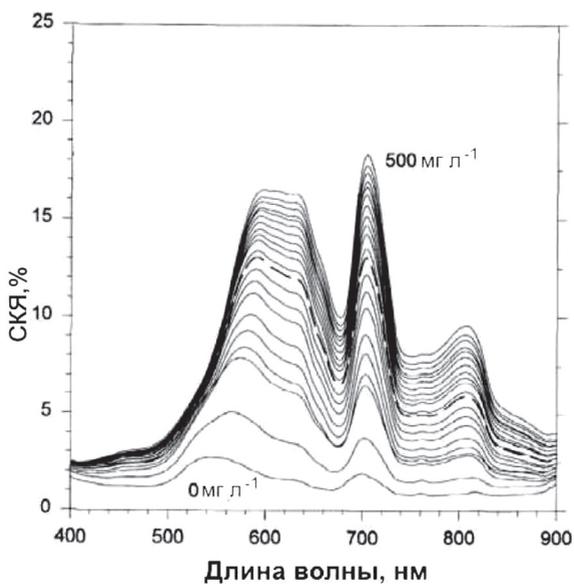


Рис. 5. Графики СКЯ для различных концентраций фитопланктона (algae-laden) в воде

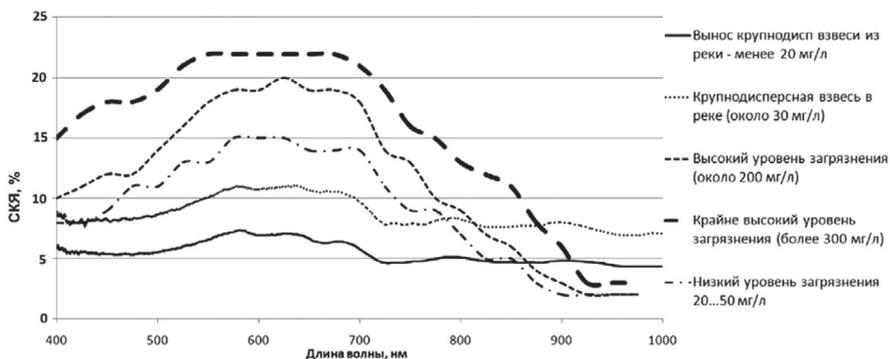


Рис. 6. Графики СКЯ для различных уровней загрязнения акватории морского порта Санкт-Петербурга

Заслуживающей внимания является работа [Григорьева и др., 2012], в которой приводятся материалы гиперспектральной съёмки и измерений *in situ* по акватории морского порта Санкт-Петербурга. В частности, в ней даны графики СКЯ для различных значений суммарных концентраций крупнодисперсной взвеси и фитопланктона (рис. 6).

В этой работе также разработаны методы и алгоритмы выявления и количественной оценки суммарных объёмов механических взвесей и фитопланктона. Указанные методы и алгоритмы были применены к обработке гиперспектральных данных, полученных в ходе авиационной съёмки акватории Финского залива. В частности, было получено регрессионное выражение для связи среднего значения СКЯ_{ср} (в %) в диапазоне 590–710 нм с суммарным содержанием взвесей в воде $C_{вз}$.

$$СКЯ_{ср} = (0,043 \ln C_{вз} - 0,044) 100 \%. \quad (1)$$

Несмотря на то, что в приведённую выше формулу (1) входят лишь среднее значение СКЯ и суммарная концентрация взвесей в воде, она может быть использована для верификации результатов, полученных в наших экспериментах по гиперспектральной съёмке акватории Невской губы, что показано ниже.

ОПИСАНИЕ РАЙОНА СЪЁМКИ

Район съёмки — акватория Невской губы был выбран нами не случайно. Акватория включает в себя восточную часть Финского залива.

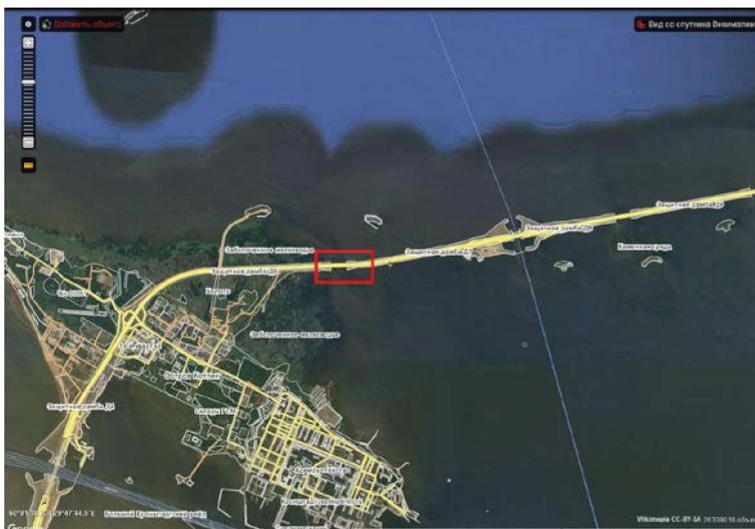


Рис. 7. Остров Котлин и схема восточной части защитной дамбы Санкт-Петербурга. Красной рамкой выделен участок, который был использован для обработки данных гиперспектральной самолётной съёмки

В вершину Невской губы несколькими рукавами впадает р. Нева. В дельте Невы находится город Санкт-Петербург, промышленные, бытовые и ливневые стоки которого являлись источником загрязнения реки. Антропогенное воздействие на акваторию Невской губы всегда было интенсивным, а она в свою очередь оказывала влияние на прилегающую часть Финского залива (*Бабчинский Р.О.* Анализ влияния комплекса защитных сооружений на экологическую обстановку в акватории Финского залива. URL: <http://kzs.narod.ru/ekologia.html>).

Одной из интересных, с точки зрения экологии, зон акватории Невской губы являлась зона, расположенная вблизи защитной дамбы Санкт-Петербурга (рис. 7), где проходят наиболее динамичные гидрологические процессы, связанные с переносом взвеси и фитопланктона.

МАТЕРИАЛЫ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЁМКИ

Гиперспектральная съёмка акватории Невской губы в районе защитной дамбы проводилась с борта самолёта с высоты 1000 м при

скорости полёта 120 км/ч в ясную погоду 28 октября 2015 г. Среди полученных материалов был выбран массив данных для участка, гиперспектральное RGB-изображение которого показано на рис. 8.

К сожалению, в момент съёмки высота Солнца над горизонтом была равна 15° и, следовательно, интенсивность падающего солнечного излучения была небольшой. В качестве бортового сенсора использовался гиперспектрометр ВИД-ИКЗ [Виноградов и др., 2016], разработанный и созданный в ЗАО «НПЦ «Реагент». Основные характеристики этого гиперспектрометра приведены в табл. 1.

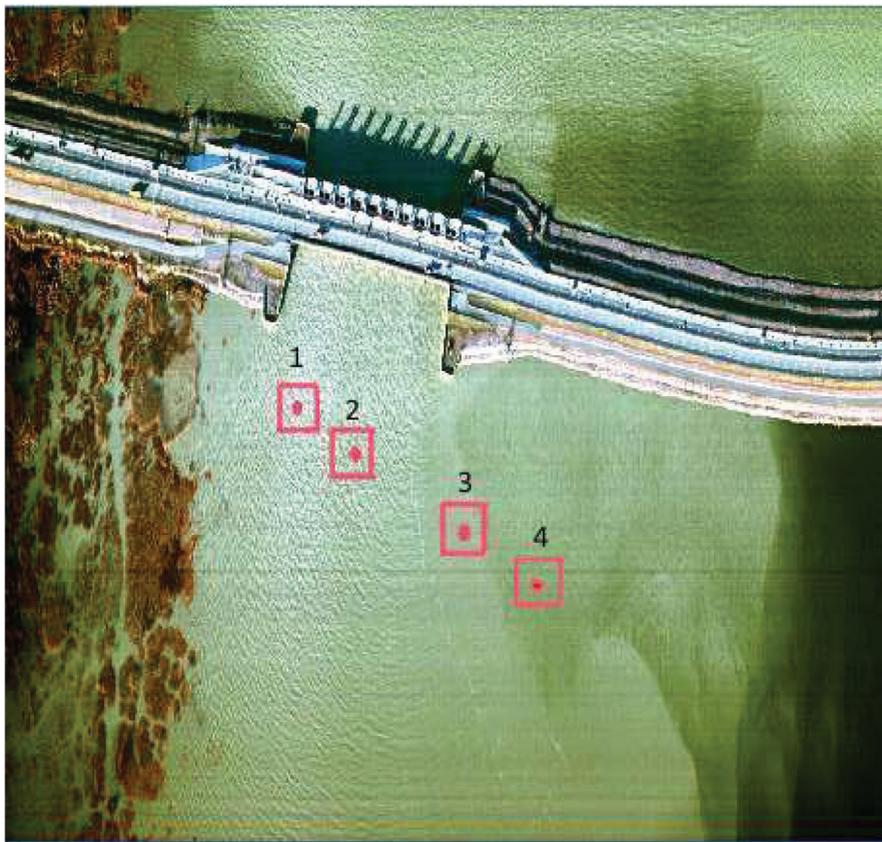


Рис. 8. Гиперспектральное RGB-изображение исследуемого участка акватории Невской губы вблизи защитной дамбы Санкт-Петербурга. Красными рамками (1–4) выделены локальные участки, которые были подвергнуты детальному спектральному и интерпретационному анализу

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

Даже визуальный анализ RGB-снимка (см. рис. 8) участка акватории, подвергнутого съёмке, 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 (см. рис. 8). Это подтверждается и различием спектров (рис. 9) в локальных зонах 1–4.

В то же время графики рис. 9 показывают, что состав взвесей в локальных зонах 1–4 примерно постоянен. Об этом, в частности, говорит форма практически идентичных кривых СКЯ. Наличие в спектрах максимумов в области 800 нм говорит о явном присутствии фитопланктона (водорослей) в воде (см. рис. 5).

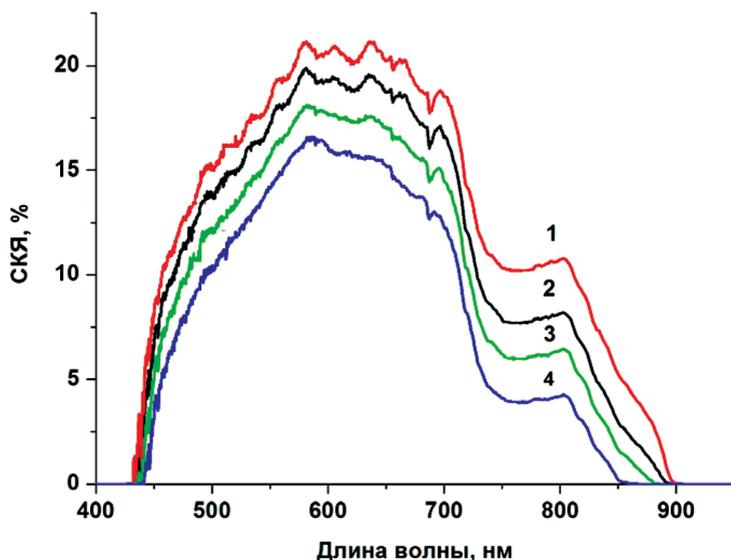


Рис. 9. Графики СКЯ для четырёх локальных зон, показанных на рис. 8

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Первый этап обработки гиперспектральных данных (гиперкубов) включал в себя процедуру пересчёта измеренных значений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в значения СКЯ, причём в качестве эталонного отражателя использовалось специальное прорезиненное полотно белого цвета размером 3×3 м, которое подвергалось съёмке в начале и в конце полёта. Переход от СПЭЯ к СКЯ позволяет в значительной степени исключить влияние атмосферы на результаты спектральных измерений.

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 твёрдой взвеси (прежде всего, глины), нефтепродукты (особенно в районе порта Санкт-Петербурга), соли тяжёлых металлов, фенолы и фитопланктон. Однако основной вклад в спектр восходящего от водной поверхности излучения будут вносить такие вещества, как глина и фитопланктон (сине-зелёные водоросли). Действительно, влияние поверхностных плёнок нефтепродуктов на величины СПЭЯ и СКЯ было незначительным по причине достаточно большой удалённости трассы съёмки от порта, где наблюдалась их максимальная концентрация. Далее, растворенные соли тяжёлых металлов, попадающие в воды Невы за счёт промышленных стоков предприятий г. Санкт-Петербурга практически не влияют на спектральные свойства воды. Концентрации же фенолов в воде Невской губы сравнительно невелики и не превышают ПДК (*Бабчинский Р. О.* Анализ влияния комплекса защитных сооружений на экологическую обстановку в акватории Финского залива. URL: <http://kzs.narod.ru/ekologia.html>).

Для решения обратной задачи ДЗ, т. е. в нашем случае для определения значений концентраций твёрдой взвеси и планктона необходимо знать точную связь значений СКЯ со значениями указанных параметров. Поскольку теоретические модели, определяющие такую связь, в литературе отсутствуют, было решено воспользоваться данными экспериментальных измерений, выполненных в работах [Григорьева и др., 2012; Fagoq, 2011; Han, 1997].

Как уже было сказано выше, вся информация о принимаемом излучении заключена в огибающей спектра, поэтому в качестве одного из способов решения задачи о содержании суммарной взве-

си в воде было сравнение графика СКЯ, измеренного в локальной зоне 4, с графиками, полученными в работе [Fargoq, 2011] (рис. 10). Для построения графика спектра со значением концентрации взвеси равным 87,5 мг/л была выполнена процедура линейной интерполяции для графиков с концентрациями взвесей 50 и 100 мг/л.

Такое качественное сравнение позволяет получить оценочное значение концентрации взвеси в воде Невской губы, которое находится в интервале 87,5–100 мг/л. Таким образом, относительная точность оценки составляет порядка 12,5 мг/л или порядка 12 %.

Для получения модельных оценок концентрации взвесей в локальных зонах 1–4 целесообразно воспользоваться формулой (1) из статьи [Григорьева и др., 2012], приведённой выше. По ней нами была построена (рис. 11) зависимость средних значений СКЯ для диапазона 590–710 нм от концентрации взвеси (крестики) для кривых, приведённых на рис. 9. На этом рисунке цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены проекционные линии, показывающие значения средних СКЯ для локальных зон (1–4), соответственно. Кроме того, на этом рисунке нанесены данные (белые квадратики), полученные для средних СКЯ из рис. 3.

По графикам на рис. 11 были вычислены значения суммарной концентрации взвеси в воде для указанных локальных зон. Результаты этих вычислений приведены в табл. 2.

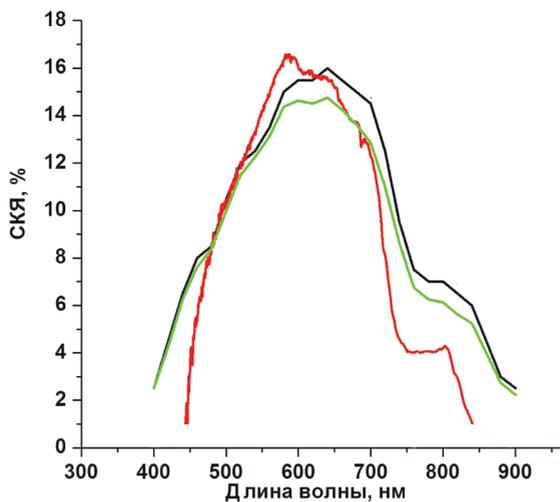


Рис. 10. Сравнение графиков СКЯ, полученных в локальной зоне 4 (красный цвет) и в работе [Fargoq, 2011] (для концентрации суммарной взвеси 100 мг/л — чёрный и 87,5 мг/л — зелёный)

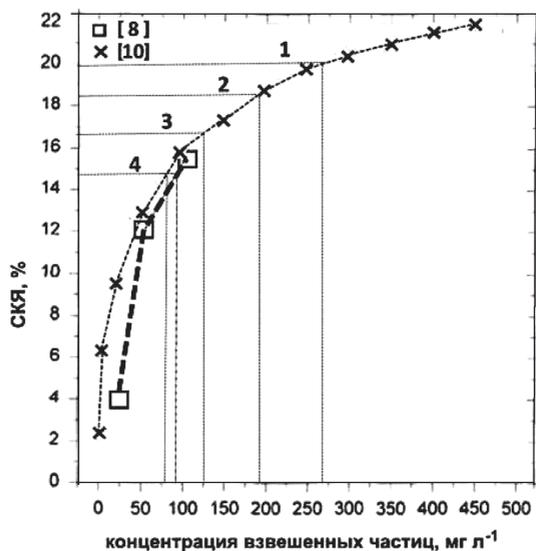


Рис. 11. График зависимости СКЯ от концентрации взвеси, построенный по формуле (1) из статьи [Григорьева и др., 2012] (крестики), а также данные, полученные из рис. 3 [Ғагооq, 2011] (белые квадратики). Средние значения СКЯ: 1 — 19,96; 2 — 18,43; 3 — 16,65; 4 — 14,81

Таблица 2. Значения средних СКЯ и концентрации взвеси в локальных зонах 1–4

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

Если на рис. 11 провести линейную интерполяцию между точка-ми (белые квадратики) и продлить линию 4 с ординатой 14,81 до пересечения с полученной интерполяционной прямой, то можно определить величину концентрации взвеси для локальной зоны 4, которая будет равна 90 мг/л, что укладывается в диапазон 87,5–100 мг/л (см. рис. 10). Эта независимая контрольная точка из работы [Ғагооq, 20118] (см. рис. 3) подтверждает возможность использования формулы (1) для оценки величины концентрации взвеси в воде.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из анализа гиперспектральных данных, полученных в ходе авиационной съёмки (см. рис. 8), видно, что полученные 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 загрязнённой и относительно чистой водой, а также участки заболачивания Невской губы, расположенные вдоль берега (в левой части снимка). При этом даже визуальное на рис. 8 уверенно выделяются локальные участки с различной степенью замутнённости.

Анализ графиков СКЯ (см. рис. 9) и данных табл. 2 для локальных зон 1–4, выделенных на снимке (см. рис. 8), 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 подъём взвесей глины и планктона со дна водоёма. В целом результаты оценки степени загрязнения вод Невской губы в районе защитной дамбы удовлетворительно согласуются с данными, полученными в работе [Григорьева и др., 2012], и указывают на наличие значительных концентраций взвесей.

Относительная точность оценки концентрации взвеси по методике, представленной в работе [Григорьева и др., 2012], и гиперспектральным данным, полученным в данной работе, составляет около 12 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящего исследования позволяют утверждать, что авиационная гиперспектральная съёмка водных объектов позволяет достаточно эффективно осуществлять качественный оперативный мониторинг экологического состояния внутренних водоёмов: озёр, рек, водохранилищ, каналов и др. Основной вклад в значения СКЯ воды Невской губы вносят примесь глины и планктон (сине-зелёные водоросли). Это подтверждается удовлетворительным совпадением измеренных и модельных спектров. При этом относительная точность количественного определения концентрации суммы примесей составляет около 12 %. К сожалению, отсутствие экспериментальных данных по измерению СКЯ воды для различных контролируемых значений

концентраций компонент взвесей и их процентных сочетаний не позволяет определять концентрации взвесей глины и водорослей по отделимости. Однако даже оценка суммарной концентрации говорит о целесообразности осуществления оперативного авиационного мониторинга экологического состояния пресноводных бассейнов.

ЛИТЕРАТУРА

- [Аванесов, Снеткова, 1981] *Аванесов Г. А., Снеткова Н. И.* Спектрометрические исследования земной поверхности // Многозональные аэрокосмические съёмки Земли: сб. ст. М.: Наука, 1981. С. 100–117.
- [Балтер, Егоров, 1981] *Балтер Б. М., Егоров В. В.* Статистическая оценка состояния природных объектов по данным дистанционных измерений // Исслед. Земли из космоса. 1981. № 3. С. 46–55.
- [Виноградов и др., 2016] *Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П., Родионов А. И., Родионов И. Д.* Линейка авиационных гиперспектрометров ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов // Оптический журн. 2016. Т. 88. № 4. С. 54–62.
- [Григорьева и др., 2012] *Григорьева О. В., Шилин Б. В.* Опыт оценки экологических характеристик акваторий морских портов по данным видеоспектральной аэросъёмки // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 156–166.
- [Егоров, Тарнопольский, 1977] *Егоров В. В., Тарнопольский В. И.* Физические основы дистанционного зондирования Земли из космоса // Материалы междунаrod. учебного семинара ООН по применению дистанционного зондирования. Баку: Изд-во «Элм», 1977. С. 21–37.
- [Исмару, 1980] *Исмару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. М.: Мир, 1980. 280 с.
- [Кринов, 1947] *Кринов Е. Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.Л.: Изд-во АН СССР. 1947. 271 с.
- [Оптика океана, 1983] *Оптика океана. В 2-х т. / Отв. ред. А. С. Монин.* М: Наука, 1983. 372 с.
- [Faroq, 2011] *Faroq S.* Spectral Reflectance of Land Covers / Department Geology, Aligahr Museum University. 2011. URL: <http://www.cps-amu.org/sf/notes/mlr-1-8.htm>.
- [Han, 1997] *Han L.* Spectral Reflectance with Varying Suspended Sediment Concentration in Clear and Algae-Laden Waters // Photogrammetric Engineering and Remote sensing. 1997. V. 6. No. 6. P. 701–705.
- [Yoder et al., 2001] *Yoder J. A., O'Reily J. E., Barnard A. H., Moore T. S., Ruhsam C. M.* Variability in Coastal Zone Scanner (CZCS) Chlorophyll Imagery of Ocean Margin Waters off the US East Coast: Continental Shelf Research // Pergamon. 2001. V. 21. P. 1191–1218.