

Пространственно-временная изменчивость коэффициента яркости толщи вод Горьковского водохранилища по результатам экспедиций 2016–2017 гг.

А. А. Мольков¹, Е. Н. Корчёмкина², Д. В. Калининская², И. А. Капустин¹

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: a.molkov@inbox.ru*

² *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: korchemkina@mhi-ras.ru*

Работа посвящена анализу пространственно-временной изменчивости коэффициента яркости вод Горьковского водохранилища, расположенного на главной водной артерии Центральной России — р. Волга и являющегося ярким примером внутреннего пресноводного водоёма, характеризующегося обильным цветением сине-зелёных водорослей. В статье приводятся результаты экспедиционных работ за два года, в рамках которых были выполнены судовые измерения коэффициента яркости водной толщи водоёма, прозрачности атмосферы и сопутствующие измерения гидрологических и биооптических характеристик, необходимые для верификации и интерпретации результатов. Выполнена атмосферная коррекция нескольких спутниковых изображений MODIS и установлено удовлетворительное соответствие между спектрами коэффициента яркости, измеренными двумя способами. Сделаны выводы о причинах расхождения и способах их устранения. Указаны перспективы дальнейших исследований с целью формирования регионального биооптического алгоритма для мониторинга биопродуктивности вод Горьковского водохранилища с помощью космических сканеров цвета.

Ключевые слова: Горьковское водохранилище, коэффициент яркости воды, региональный биооптический алгоритм, фитопланктон, хлорофилл «а», сине-зелёные водоросли, взвешенное вещество, растворённое органическое вещество

Одобрена к печати: 19.03.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-201-210

Введение

Освоение и рациональное использование Мирового океана напрямую сопряжено с необходимостью сохранения его экологического состояния. Во многом оно определяется антропогенной деятельностью, последствия которой, нарастая и аккумулируясь, переносятся при движении водных масс от внутренних водоёмов (рек, озёр и водохранилищ) к морям и океанам. Постоянный поток воды несёт в себе огромные массы взвешенных частиц минерального и органического происхождения, растворённые химические соединения и бытовой мусор. Совокупный вклад их продолжительного воздействия на водную среду одновременно с особенностями гидрологии внутренних водоёмов (малые глубины, высокая температура воды, слабые течения) приводит к значительному ухудшению качества воды с точки зрения гидрохимии, а также к формированию благоприятных условий для обильного цветения воды, сопровождаемого выделением опасных токсинов.

Число внутренних водоёмов, важных для сохранения экологии, флоры и фауны, а также охраны здоровья населения прибрежных районов, огромно. Их размеры разнообразны, а пространственно-временное распределение биооптических характеристик их вод обладает высокой изменчивостью. Поэтому организовать регулярный мониторинг внутренних водоёмов контактными или дистанционными средствами с палубы судна или авианосителя затруднительно и технически, и финансово. Решить обозначенную проблему можно с помощью космических сканеров цвета, являющихся на сегодняшний день самым востребованным инструментом оценки биопродуктивности водоёмов, обеспечивающим регулярное покрытие огромных площадей (с поправкой на характерные для региона условия облачности). Успех такой оценки зависит от качества выполнения двух задач: атмосферной коррекции

и биооптического алгоритма, обладающего ярко выраженной региональностью (Копелевич и др., 2006). Стандартные подходы решения этих задач изложены в работах (Wang, 2010) и (Lee, 2006) соответственно. На их основе возможно достоверное определение концентраций хлорофилла «а», растворённого органического вещества (РОВ) и минеральной взвеси только для вод открытого океана (воды типа 1). При использовании этих же алгоритмов для вод типа 2 обычно наблюдается относительно низкая точность восстановления концентраций оптически активных компонентов (Лаврова и др., 2014; Korelevich et al., 2004). Исследованию возможностей применения спутниковых методов мониторинга пресных эвтрофных вод на примере р. Волга и Горьковского водохранилища, в частности, посвящена данная работа.

Методы и подходы

Известно, что ключевой характеристикой, на основе которой строится решение обратной задачи спутникового мониторинга водоёмов, является спектральный коэффициент яркости (КЯ) водной толщи. Яркость выходящего из водной толщи излучения в основном формируется в фотическом слое и зависит от концентрации взвешенных частиц (минеральная взвесь, клетки фитопланктона, детрит) и РОВ. Соотношение вклада этих веществ в суммарное поглощение и рассеяние определяет не только величины КЯ, но и форму его спектра (рис. 1). Например, в чистых водах Средиземного моря (Sancak et al., 2005) рассеяние и поглощение чистой водой обуславливают резкое уменьшение КЯ с ростом длины волны, а влияние поглощения органическими примесями, вследствие малого их количества, проявляется только в ближней УФ-области. С увеличением продуктивности воды, т.е. с появлением большего количества фитопланктона и продуктов его жизнедеятельности (РОВ), максимум спектра будет смещаться в сторону более длинных волн, как это видно на спектрах для Чёрного моря (Ли и др., 2015) и Горьковского водохранилища (Мольков и др., 2017а). При этом, поскольку спектр поглощения неживой органики (РОВ и детрита) представляется монотонно убывающей функцией, а спектр поглощения пигментами имеет максимумы и минимумы, то вследствие различного соотношения данных компонентов форма спектра КЯ может существенно измениться. Наличие в воде неживой органики вызывает более сильный монотонный спад КЯ в сторону коротких волн, тогда как большие концентрации пигментов фитопланктона приводят к появлению провала в области 440 нм. С другой стороны, повышение содержания минеральной взвеси приводит к практически равномерному росту значений КЯ без изменения формы, что можно наблюдать при сравнении спектров для Чёрного моря. Спектр, измеренный в июле 2012 г., получен во время сильного цветения микроводорослей кокколи-тофорид (Корчёмкина, Ли, 2015), приводящего к росту количества минеральной взвеси в воде.

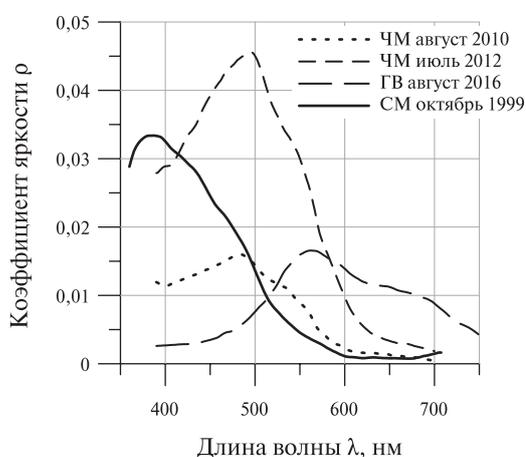


Рис. 1. Примеры измеренных спектров коэффициента яркости: Чёрное море (ЧМ), Средиземное море (СМ), Горьковское водохранилище (ГВ)

Таким образом, исследование влияния указанных факторов на изменчивость КЯ является довольно сложной задачей, решение которой требует выполнения множества прямых измерений на полигоне с большими вариациями оптических свойств воды. Примером таких работ могут служить экспедиции, выполненные авторами в периоды с 1 по 6 августа 2016 г. и с 23 по 30 июня 2017 г. на озёрной части Горьковского водохранилища.

Эксперимент

Выбор акватории в нашей работе обусловлен целым рядом причин. Во-первых, водохранилище расположено на главной водной артерии центральной России — р. Волга, экологическое состояние которой сейчас находится под пристальным вниманием надзорных организаций и общественности. Во-вторых, геометрические размеры водоёма таковы, что его можно исследовать как спутниковыми методами, так и контактными или дистанционными средствами судового базирования. В-третьих, в акватории наблюдается интенсивное цветение доминантных сине-зелёных водорослей, приводящее к сезонному изменению их концентрации на три порядка, что предоставляет условия для наблюдения оптических характеристик воды в широком диапазоне их вариаций. И в-четвёртых, вследствие географической близости к исследователям из ИПФ РАН, водохранилище представляет собой удобный полигон для регулярного сбора натурных данных и создания методологии разработки региональных биооптических алгоритмов для других водохранилищ Волжского каскада. Подробную информацию о водоёме, истории исследовательских работ и измеряемых характеристиках можно почерпнуть в работе (Мольков и др., 2017а) и процитированной в ней литературе. Здесь же стоит отметить, что прямых и одновременных измерений тех параметров воды и атмосферы, которые фигурируют в задачах спутникового мониторинга, до настоящего момента на водохранилище не проводилось, поэтому в литературе нет данных, достаточных для успешного решения поставленной задачи.

Особенности спектральной зависимости КЯ водной толщи водохранилища исследовались впервые. Для этого использовался разработанный в отделе оптики моря МГИ РАН (Ли, Мартынов, 2000) спектрофотометр, измеряющий спектр восходящей яркости водоёма под углом 30–45°, нормированной на падающую облучённость. Благодаря этому прибор не нуждался в абсолютной калибровке. Спектрофотометр устанавливался у кромки носовой палубы на высоте порядка 1,5 м над поверхностью воды. Под ним с борта на глубину 0,2 м вывешивался STD-зонд YSI 6600 v2 с оптическими датчиками численности сине-зелёных водорослей и мутности. Для контроля параметров течений и ветра с целью оценки пространственно-временных масштабов переноса оптически значимых компонентов воды (минеральной взвеси, фитопланктона, РОВ) в районе проведения экспедиции использовались акустический доплеровский профилограф ADCP WorkHorse Sentinel 1200 kHz и ультразвуковой анемометр WindSonic.

Маршрут следования судна в двух экспедициях показан на *рис. 2* (см. с. 204). Первая экспедиция охватила примерно половину озёрного участка водохранилища площадью порядка 40×10 км и была направлена на сбор данных с больших площадей с целью изучения пространственных вариаций биооптических характеристик. Вторая экспедиция строилась на ежедневном повторении одного и того же маршрута с целью изучения их пространственно-временной динамики. Разнесение экспедиций по месяцам было привязано к типичному циклу цветения воды на водохранилище (Мольков и др., 2017б), с тем чтобы застать как «чистую воду» в начале лета, так и пик цветения (июль — август).

Маркерами на карте отмечены путевые точки, в которых производились измерения КЯ, глубины видимости диска Секки и прозрачности атмосферы с помощью солнечного фотометра SPM (Калинская, Мольков, 2017), а также отбирались пробы воды с глубины порядка 0,1–0,2 м с целью определения концентраций хлорофилла «а», РОВ и взвеси в лаборатории. Сопутствующие измерения велись непрерывно, а отбор проб воды был выборочный и основывался на показаниях зонда о мутности и концентрации клеток водорослей.

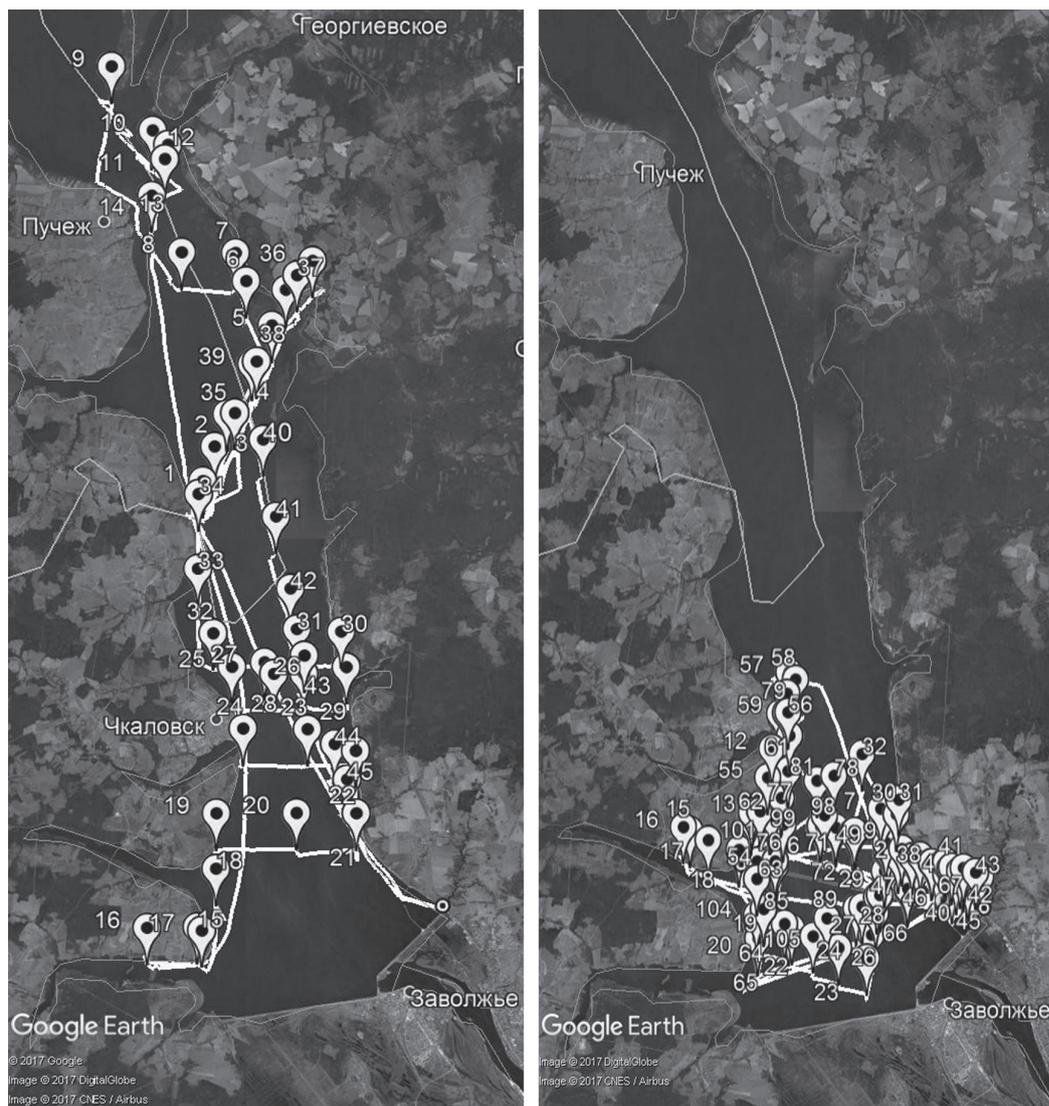


Рис. 2. Пространственный масштаб экспедиционных работ на Горьковском водохранилище в 2016 г. (слева) и 2017 г. (справа)

Это позволило получить точные значения концентраций оптически активных примесей в широком диапазоне их концентраций для верификации модели КЯ и результатов обработки спутниковых изображений.

Результаты

В результате полевых измерений было получено около 150 спектров КЯ в диапазоне длин волн 390–750 нм с разрешением 1 нм и с погрешностью в среднем по спектру 3%. В качестве примера на рис. 3 (см. с. 205) приведён набор спектров КЯ, наиболее полно демонстрирующий их вариации. При этом в августе 2016 г. присутствует разделение всех спектров на две группы, заметно отличающиеся вкладом взвеси в восходящую яркость (чем выше КЯ, тем большее влияние оказывает обратное рассеяние взвесью). Спектры с низкими значениями получены вблизи берегов, там доминирующим компонентом является неживая органика, а группа спектров с более высокими значениями — вдали от берега. В целом, исходя из особенностей формы спектров, можно сказать, что в августе 2016 г. основное влияние на восходящую яркость оказывали неживое органическое вещество и минеральная взвесь, а в июне 2017 г. — неживое органическое вещество и пигменты фитопланктона.

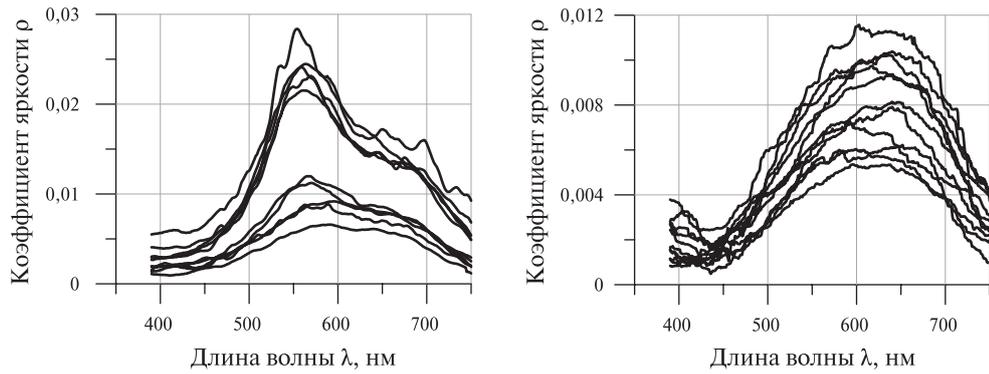


Рис. 3. Примеры спектров коэффициента яркости воды в южной части Горьковского водохранилища: 01.08.2016–06.08.2016 (слева), 27.06.2017–29.06.2017 (справа)

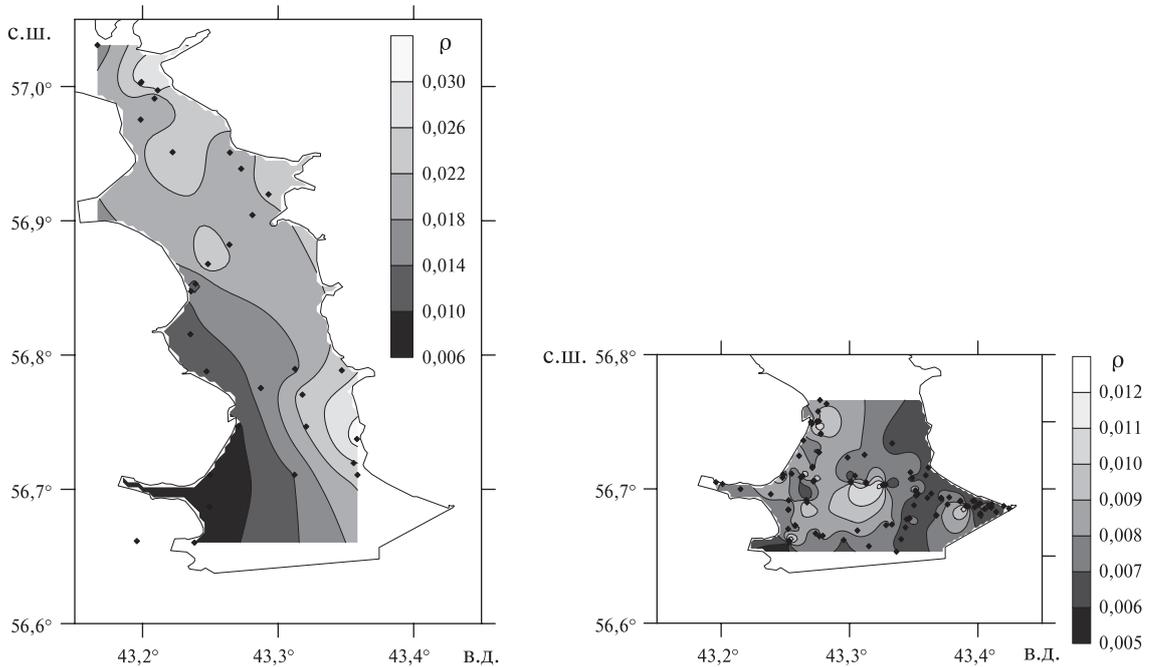


Рис. 4. Максимальные значения коэффициента яркости: а — 02.08.2016–06.08.2016; б — 23.06.2017–30.06.2017. Точками показано расположение станций

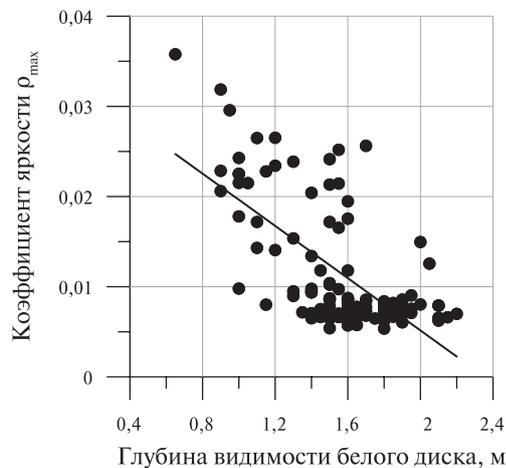


Рис. 5. Связь максимальных значений коэффициента яркости с глубиной видимости белого диска

Интересно отметить, что в августе концентрация хлорофилла «а», как правило, в несколько раз превосходит её значения в июне (у нас нет достоверных данных по факту, только среднемноголетние), но при этом провала в спектре КЯ на длине волны 440 нм не наблюдалось. В силу отсутствия лабораторных данных по концентрации РОВ и взвеси мы можем лишь с некой вероятностью утверждать, что здесь имеет место преобладание других, указанных выше, компонентов среды.

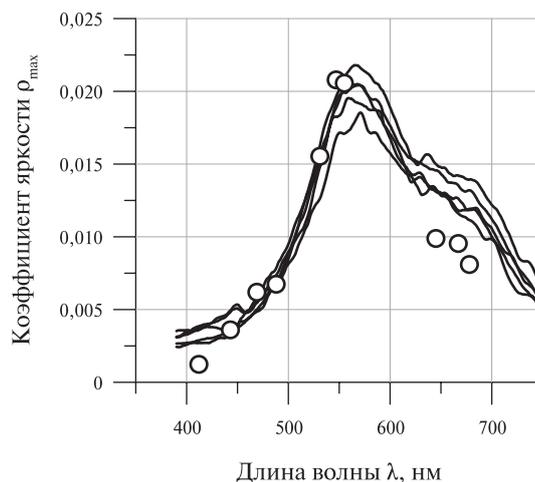
Для того чтобы оценить вариации спектра на интервале нескольких суток, в июне 2017 г. одни и те же разрезы были выполнены 3–4 раза при постоянной ветро-волновой обстановке (западный ветер порядка 6 м/с). В работе (Капустин и др., 2017) показано, что при таких условиях в районе проведения экспедиций наблюдаются стационарные стоковые течения со скоростью порядка 10 см/с, при этом на основании анализа данных ADCP можно заключить, что верхний слой толщиной порядка 3 м оказывается однородно перемешанным. Этот факт в сумме с выполненными в одних и тех же путевых точках сопутствующими измерениями позволяет утверждать, что на протяжении 3–5 дней оптические свойства воды в исследованном районе водохранилища практически не испытывали изменчивости, что, в свою очередь, может служить обоснованием использования спутниковых данных с существенным смещением по времени. Однако при тихой и жаркой погоде в период активного цветения водорослей последнее утверждение будет неверно.

В качестве примера пространственно-временной изменчивости коэффициента яркости водной толщи на *рис. 4* (см. с. 205) приведены распределения его максимальных значений за дни экспедиций 2016 и 2017 гг. С одной стороны, видно, что наименее прозрачные воды приносятся наиболее крупными притоками Волги, в них основным оптически значимым компонентом является РОВ и фитопланктон, что согласуется с результатами лидарных измерений (Пелевин и др., 2017). В остальной части бассейна КЯ определяется как РОВ, так и взвешенным веществом. Однако под левым берегом водохранилища, т. е. справа на картах, наблюдаются малые глубины (3 м и менее) с песчаным дном, что также может давать вклад в абсолютные значения КЯ (учёт этого эффекта находится за рамками настоящей работы). С другой стороны, представленная на *рис. 4а* картина хорошо коррелирует с многолетними измерениями мутности и численности сине-зелёных водорослей, выполненными сотрудниками ИПФ РАН в тихую погоду, когда отсутствует ветро-волновое перемешивание. Поэтому представленное распределение можно с высокой степенью вероятности считать регулярным. Однако при развитии ветровом волнении наблюдается ветровой дрейф примеси (в частности, фитопланктона), что наглядно демонстрирует *рис. 4б*. Здесь в течение всей экспедиции преобладал свежий западный ветер, осуществивший перенос взвеси от правого берега к левому (слева направо).

Сопоставление глубины видимости белого диска и максимальных значений КЯ за два периода исследований (*рис. 5*, см. с. 205) показывает обратную зависимость, что является типичным случаем. Тот факт, что зависимость не очень ярко выражена, объясняется неравномерностью распределения взвешенного вещества в водной толще. В зависимости от ветро-волновой ситуации может наблюдаться как равномерное распределение взвеси по толще воды, так и скопление её у поверхности. В последнем случае использование глубины видимости белого диска как характеристики всей толщи является неоправданным.

Ещё одним интересным результатом настоящей работы является исследование возможностей применения космических сканеров цвета для оценки биопродуктивности вод Горьковского водохранилища. В период измерений в августе 2016 г. были получены три спутниковых снимка Горьковского водохранилища сканерами MODIS-Aqua и Terra. Изображение водохранилища имеет всего 2–3 пикселя в ширину, при этом данные находятся под сильным влиянием береговой засветки и погрешностей атмосферной коррекции (отмечены флагом «Ошибка атмосферной коррекции»). Совпадение по координате до 0,01 градуса и до 1 часа по времени с данными контактных измерений было получено только 02.08.2016 и 05.08.2016. Однако имеющиеся измерения оптической толщины атмосферы в спектральном интервале 340–870 нм позволили определить спектральный ход поправочного слагаемого в разработанной ранее автором методике (Корчёмкина и др., 2009) и выполнить дополнительную коррекцию.

Рис. 6. Сравнение натуральных измерений коэффициента яркости (кривые) и данных MODIS-Aqua за 02.08.2016 после коррекции (точки)



Средний показатель Ангстрема, входящий в стандартные продукты MODIS и определяемый по данным в красной и ближней ИК-области, был равен 1,7, тогда как показатель Ангстрема по данным непосредственного измерения спектров оптической толщины в видимой области составлял 1,3. В результате коррекции спектр КЯ, полученный по спутниковым данным, показывает удовлетворительное совпадение с измеренным с поверхности спектром (рис. 6), расхождения объяснимы как погрешностями стандартной коррекции, так и допущениями, сделанными при дополнительной коррекции.

Выводы

Создание методов спутникового мониторинга качества вод внутренних водоёмов является актуальной и перспективной, но вместе с тем и трудно решаемой задачей современной океанологии. Причин тому множество, однако среди основных можно выделить следующие: уникальность гидрологического режима водоёма и атмосферы над ним; отсутствие статистических данных по ключевым параметрам, определяющим пространственно-временную изменчивость характеристик атмосферы и гидросферы; необходимость создания региональных биооптических алгоритмов и т.д. Поэтому очевидно, что для успешного решения поставленной задачи в первую очередь требуется выполнение множества прямых измерений на полигоне с большими вариациями оптических свойств воды с последующей их систематизацией и статистической обработкой.

Изложенные в работе результаты дают первое представление о биооптическом режиме Горьковского водохранилища и его изменчивости, а также о возможности применения космических сканеров цвета на примере MODIS для мониторинга качества его вод. Вместе с тем стало очевидным, что не все спектры коэффициента яркости водной толщи интерпретируются однозначно. Помочь в устранении данной проблемы должны прямые измерения спектральных показателей поглощения и рассеяния назад, которые планируется реализовать в следующем сезоне.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 17-77-10120).

Литература

1. Калинин Д. В., Мольков А. А. Исследование характеристик атмосферного аэрозоля над Горьковским водохранилищем в летние сезоны 2016 и 2017 года // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. 2017. С. 180.
2. Капустин И. А., Ермаков С. А., Мольков А. А., Ерина О. Н., Соколов Д. И., Терешина М. А., Вилимович Е. А. Натурные исследования вихревых структур и вариаций гидрохимических показателей в Горьковском водохранилище // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. 2017. С. 257.
3. Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2006. Т. 6. № 2. С. 99–105.

4. Корчёмкина Е. Н., Ли М. Е. Аномальные оптические характеристики прибрежных вод Черного моря в июле 2012 г. и их связь с концентрацией минеральной взвеси в воде // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2015. Т. 10. № 1. С. 39–43.
5. Корчёмкина Е. Н., Шибанов Е. Б., Ли М. Е. Усовершенствование методики атмосферной коррекции для дистанционных исследований прибрежных вод Черного моря // *Исследование Земли из космоса*. 2009. № 5. С. 1–7.
6. Лаврова О. Ю., Соловьев Д. М., Строчков А. Я., Шендрик В. Д. Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 3. С. 54–72.
7. Ли М. Е., Мартынов О. В. Измеритель коэффициентов яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. С. 163–173.
8. Ли М. Е., Шибанов Е. Б., Корчёмкина Е. Н., Мартынов О. В. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // *Морской гидрофиз. журн.* 2015. № 6. С. 17–33.
9. Мольков А. А., Калинин Д. В., Капустин И. А., Корчёмкина Е. Н., Осокина В. А., Пелевин В. В. (2017а) О перспективах дистанционной оценки гидробиооптических характеристик вод внутренних пресных водоемов по результатам экспедиций на Горьковском водохранилище в 2016 г. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2017. № 2. С. 59–67.
10. Мольков А. А., Капустин И. А., Щегольков Ю. Б. (2017б) О связях гидро- и биооптических характеристик Горьковского водохранилища // *Труды 9-й Всероссийской конф. «Современные проблемы оптики естественных вод» (ONW'2017)*. Санкт-Петербург, 2017. С. 52–57.
11. Пелевин В. В., Мольков А. А., Осокина В. А., Кременецкий В. В. Мелкомасштабная пространственная изменчивость содержания хлорофилла «а», общего органического углерода и взвеси в верхнем слое Горьковского водохранилища в летний период 2016 и 2017 гг. по данным дистанционного лазерного зондирования // *15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*: сб. тез. Москва, 2017. С. 283.
12. 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. V. 51. P. 1063–1091.
13. Lee Z. P. Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications // *IOCCG Reports*. 2006. IOCCG Report Number 5. 122 p.
14. Sancak S., Besiktepe S. T., Yilmaz A., Lee M., Frouin R. Evaluation of SeaWiFS chlorophyll-a in the Black and Mediterranean Seas // *Intern. J. Remote Sens.* 2005. V. 26. No. 10. P. 2045–2060.
15. Wang M. Atmospheric Correction for Remotely-Sensed Ocean-Colour Products // *IOCCG Reports*. 2010. IOCCG Report Number 10. 83 p.

Spatial and temporal variability of reflectance coefficient of Gorky Reservoir waters: results of 2016–2017 expeditions

A. A. Molkov¹, E. N. Korchemkina², D. V. Kalinskaya², I. A. Kapustin¹

¹ *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: a.molkov@inbox.ru

² *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*
E-mail: korchemkina@mhi-ras.ru

The aim of this work is to analyze the spatial and temporal variability of spectral reflectance coefficient in waters of Gorky Reservoir located on Volga, the main waterway of Central Russia. The Reservoir represents an example of internal freshwater body characterized by regular blue-green algae blooms. The article presents the results of field measurements conducted in summer seasons of 2016–2017

including ship measurements of water column reflectance coefficient, the transparency of the atmosphere and the accompanying measurements of the hydrological and biooptical characteristics necessary for the verification and interpretation of the results. The atmospheric correction of several MODIS satellite images was performed and a satisfactory correspondence between remote and contact measurements of reflectance coefficient spectra was established. Reasons for the discrepancy and the ways of its elimination are discussed. The prospects for further research in order to develop a regional bio-optical algorithm for monitoring the bioproductivity of Gorky reservoir waters using space color scanners are shown.

Keywords: Gorky Reservoir, water reflectance coefficient, regional biooptical algorithm, phytoplankton, chlorophyll-a, blue-green algae, suspended matter, dissolved organic matter

Accepted: 19.03.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-201-210

References

1. Kalinskaya D. V., Molkov A. A., Issledovanie kharakteristik atmosfernogo aerolya nad Gor'kovskim vodokhranilishchem v letnie sezony 2016 i 2017 goda (Investigation of the characteristics of atmospheric aerosol over the Gorky reservoir in summer seasons 2016 and 2017), *XV Vserossiyskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (XV All-Russia Conference "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2017, p. 180.
2. Kapustin I. A., Ermakov S. A., Molkov A. A., Erina O. N., Sokolov D. I., Tereshina M. A., Vilimovich E. A., Naturnye issledovaniya vikhrevykh struktur i variatsiy gidrokhimicheskikh pokazateley v Gor'kovskom vodokhranilishche (Field studies of vortex structures and variations of hydrochemical indicators in the Gorky reservoir), *XV Vserossiyskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (XV All-Russia Conference "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2017, p. 257.
3. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Sheberstov S. V., Razrabotka i ispol'zovanie regional'nykh algoritmov dlya rascheta bioopticheskikh kharakteristik morey Rossii po dannym sputnikovykh skanerov tsvetta (Development and use of regional algorithms for calculating the bio-optical characteristics of Russian seas from satellite color data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 2, pp. 99–105.
4. Korchemkina E. N., Lee M. E., Anomal'nye opticheskie kharakteristiki pribrezhnykh vod Chernogo morya v iyule 2012 g. i ikh svyaz' s kontsentratsiyey mineral'noy vzvesi v vode (Anomalous optical characteristics of the coastal waters of the Black Sea in July 2012 and their relationship to the suspended matter concentration in water), *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2015, Vol. 10, No. 1, pp. 39–43.
5. Korchemkina E. N., Shybanov E. B., Lee M. E., Uovershenstvovanie metodiki atmosferno korrektsii dlya distantsionnykh issledovaniy pribrezhnykh vod Chernogo morya (Improved method of atmospheric correction for remote studies of the Black Sea coastal waters), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 5, pp. 1–7.
6. Lavrova O. Yu., Solov'ev D. M., Strochkov A. Ya., Shendrik B. D., Sputnikovyi monitoring intensivnogo tsveteniya vodoroslei v Rybinskom vodokhranilishche (Satellite monitoring of intensive algae blooms in the Rybinsk Reservoir), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 54–72.
7. Lee M. E., Martynov O. V., Izmeritel' koeffitsientov yarkosti dlya podsputnikovykh izmerenii bioopticheskikh parametrov vod (Reflectance meter for sub-satellite measurements of bio-optical parameters of water), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoye ispol'zovaniye resursov shel'fa*, Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2000, pp. 163–173.
8. Lee M. E., Shybanov E. B., Korchemkina E. N., Martynov O. V., Opredelenie kontsentratsii primesey v morskoy vode po spektru yarkosti voskhodyashchego izlucheniya (Determination of the concentration of impurities in sea water from the spectrum of downwelling radiation), *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2015, No. 6, pp. 17–33.
9. Molkov A. A., Kalinskaya D. V., Kapustin I. A., Korchemkina E. N., Osokina V. A., Pelevin B. B., (2017a) O perspektivakh distantsionnoy otsenki gidrobioopticheskikh kharakteristik vod vnutrennikh presnykh vodoyemov po rezul'tatam ekspeditsii na Gor'kovskom vodokhranilishche v 2016 g. (On the prospects of remote evaluation of hydrobiooptical characteristics of inland fresh water bodies based on the results of

- expeditions to the Gorky reservoir in 2016), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoye ispol'zovaniye resursov shel'fa*, Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2017, No. 2, pp. 59–67.
10. Molkov A. A., Kapustin I. A., Shchegolkov Yu. B., (2017b) O svyazyakh gidro- i bioopticheskikh kharakteristik Gor'kovskogo vodokhranilishcha (Relations of hydro- and biooptical characteristics of the Gorky reservoir), *Trudy IX Vserossiyskoy konferentsii "Sovremennye problemy optiki yestestvennykh vod" (ONW'2017)* (Proc. IX All-Russia Conf. "Modern problems of the optics of natural waters" (ONW'2017)), Saint Petersburg, 2017, pp. 52–57.
 11. Pelevin V. V., Molkov A. A., Osokina V. A., Kremenetsky V. V., Melkomasshtabnaya prostranstvennaya izmenchivost' sodержaniya khlorofilla "a", obshchego organicheskogo ugleroda i vzvesi v verkhnem sloye Gor'kovskogo vodokhranilishcha v letnii period 2016 i 2017 gg. po dannym distantsionnogo lazernogo zondirovaniya (Small-scale spatial variability of chlorophyll "a", dissolved organic carbon and suspended matter in the upper layer of the Gorky reservoir in the summer period of 2016 and 2017 years according to remote laser sensing data), *XV Vserossiyskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (XV All-Russia Conference "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space")*, Book of Abstracts, Moscow, 2017, p. 283.
 12. 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, pp. 1063–1091.
 13. Lee Z. P., Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications, *IOCCG Report Number 5*, 2006, 122 p.
 14. Sancak S., Besiktepe S. T., Yilmaz A., Lee M., Frouin R., Evaluation of SeaWiFS chlorophyll-a in the Black and Mediterranean Seas, *Int. J. Remote Sens.*, 2005, Vol. 26, No. 10, pp. 2045–2060.
 15. Wang M., Atmospheric Correction for Remotely-Sensed Ocean-Colour Products, *IOCCG Report Number 10*, 2010, 83 p.