

О влиянии цианобактерий, волнения и дна на коэффициент яркости воды Горьковского водохранилища

А. А. Мольков¹, Е. Н. Корчёмкина², Г. В. Лещев¹,
О. А. Даниличева¹, 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

В работе представлены результаты исследования коэффициента яркости (КЯ) воды Горьковского водохранилища по данным судовых измерений, выполненных с мая по октябрь 2018 г., применительно к задачам спутникового мониторинга качества вод внутренних водоёмов. Измерения проводились на 26 станциях, расположенных в озёрной части водохранилища с южной его стороны на площади порядка 150 км². На станциях измерялись глубина видимости диска Секки, вертикальные профили хлорофилла *a* (Хл) и окрашенного растворённого органического вещества, интегральная подводная облучённость, а также характеристики светового поля над водной поверхностью, необходимые для расчёта КЯ водной толщи. На основе полученных данных выполнен анализ изменчивости КЯ, связанной с сезонным изменением оптических свойств воды и условиями наблюдения. Установлено, что гидрооптический режим водохранилища условно делится на два этапа: весенний, характеризующийся высоким содержанием минеральной взвеси, и летний — с низким содержанием минеральной взвеси и высокими пространственно-временными вариациями концентрации Хл. Для периода наиболее интенсивного цветения сине-зелёных водорослей выполнена классификация спектров КЯ в зависимости от типов вертикальных профилей Хл, соответствующих разным ветро-волновым условиям, а также получены предварительные оценки уменьшения концентрации Хл в фотическом слое с увеличением ветрового разгона. Вместе с тем показано, что влиянием яркости дна на спектры КЯ можно пренебречь для районов водохранилища с глубинами, превышающими половину глубины видимости диска Секки. Полученные результаты будут направлены на совершенствование алгоритмов восстановления оптических свойств воды по спутниковым изображениям Горьковского водохранилища.

Ключевые слова: коэффициент яркости воды, яркость моря, диск Секки, глубина фотической зоны, вертикальные профили хлорофилла *a*, Горьковское водохранилище

Одобрена к печати: 25.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-203-212

Введение

Как известно, внутренние эвтрофные водоёмы наиболее сильно подвержены антропогенной нагрузке, что в сочетании с особенностями их гидрологии приводит к заметному ухудшению качества вод (Chorus et al., 2000). Для некоторых из них разрабатываются региональные биооптические модели оценки качества воды по спутниковым данным (Gitelson et al., 2011). Современные радиометры спутникового базирования открывают возможности для единовременного мониторинга разных водоёмов, позволяя сопоставлять их по заданному набору гидрооптических характеристик, анализировать их пространственно-временную изменчивость, а также классифицировать водоёмы по ряду признаков, как это сделано для множества европейских озёр (Ansper, Alikas, 2019; Spyros et al., 2018). На территории Российской Федерации, так же как и в Европе, расположено огромное количество внутренних водоёмов, представляющих интерес для лимнологов и требующих внимания со стороны экологов. Одним из них является Горьковское водохранилище. В 2017 г. для него была предпринята первая попытка разработки регионального биооптического алгоритма (Корчёмкина, Мольков, 2018), основанная на результатах нескольких недельных экспедиций. Исследования включали судовые измерения коэффициента яркости (КЯ) водной толщи и отбор проб

воды на трёх десятках станций с целью лабораторного определения концентрации хлорофилла *a*. На основе этих данных и использования полуэмпирической модели яркости водной толщи (Morel, Prieur, 1977) удалось построить пробный биооптический региональный алгоритм. Его точность оказалась на уровне 50 % по причине малого объёма экспедиционных данных и отсутствия знаний о ряде гидро- и биооптических характеристик воды, являющихся параметрами этой модели. Для устранения этого пробела в 2018 г. были проведены продолжительные комплексные измерения оптических свойств воды в период с мая по октябрь. Часть полученных данных была направлена на разработку статистически обоснованного регионального алгоритма восстановления концентрации хлорофилла *a* по данным судовых измерений коэффициента яркости водной толщи или спутниковым данным радиометра MSI/Sentinel-2 (Molkov et al., 2019). Другая часть была использована при исследовании изменчивости яркости водной толщи, вызванной сезонным цветением сине-зелёных водорослей (Мольков и др., 2018; Охупкин и др., 1997), их вертикальным распределением в зависимости от ветро-волновой обстановки и влиянием дна. Результатам этого исследования посвящена настоящая работа.

Методы и подходы

Измерения проводились на протяжении всего срока речной навигации, а именно с 14 мая по 27 октября 2018 г., в южной части водохранилища площадью 10×15 км (рис. 1). Маршрут следования судна проходил через 26 станций, расположенных в пойме (станции № 1, 2, 9–13, 26), на русле (станции № 3–8, 14–19, 23–25) и вблизи устьев впадающих рек (станции № 6, 20–22).

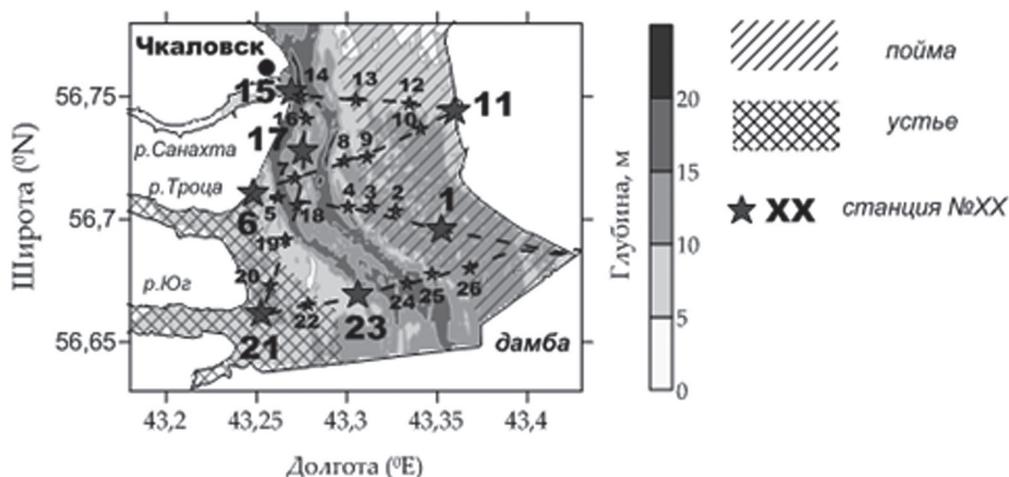


Рис. 1. Район измерений с указанием станций

На каждой из станций выполнялись измерения глубины видимости диска Секки и подводной нисходящей облучённости с помощью люксметра Мегеон-21170 для расчёта глубины фотической зоны Z_{ϕ} . Яркость водной толщи измерялась спектрометром Ocean Optics USB2000+ в диапазоне 378–780 нм с разрешением 1 нм по методике (Корчёмкина, Мольков, 2018). Спектрометр с полем зрения 20° размещался в носовой части судна и был ориентирован под зенитным углом 30° к поверхности воды в направлении движения и под азимутальным углом 45° к борту судна, что позволяло принимать сигнал из невозмущённого судном участка водной поверхности впереди него. На станциях судно ориентировалось таким образом, чтобы измерения осуществлялись с освещённого борта, а азимутальный угол между направлением визирования и Солнцем составлял 90°. После измерения яркости восходящего света L_u под объектив спектрометра подводилась заполненная водой кювета с поглощающими 98 % света стенками и дном для измерения отражённого водной поверхностью

света L_p , а затем горизонтально расположенный белый диффузно рассеивающий экран с известным коэффициентом отражения R_p , имитирующий ламбертову поверхность, в комплекте с нейтральным фильтром для оценки нисходящей облучённости $E_d(\lambda)$ через измеряемую яркость экрана L_p . Каждое измерение длилось 60 с, а весь цикл измерений занимал не более 5 мин, что позволяло считать условия освещения неизменными. Зарегистрированные временные ряды трёх яркостей усреднялись, после чего сглаживались медианным фильтром. Полученные значения L_u , L_r и L_p пересчитывались в яркость водной толщи с помощью формулы:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_u(\lambda) - L_r(\lambda)}{E_d(\lambda)},$$

где $E_d(\lambda) = \pi L_p / R_p$.

Вертикальные профили температуры воды, хлорофилла *a* и окрашенного растворённого органического вещества (ОРОВ) регистрировались флуорометром FluoroProbe III (Beutler et al., 2002). Прибор калибровался заводом-изготовителем и дополнительно авторами настоящей работы на пробах воды Горьковского водохранилища. Контроль скорости ветра и его направления осуществлялся посредством цифрового ультразвукового анемометра WindSonic. Всего за 2018 г. было выполнено 25 суточных экспедиций со средней повторяемостью один раз в две недели.

Результаты

Сезонные изменения гидрооптических характеристик

На *рис. 2* представлены временные распределения концентрации хлорофилла *a* и ОРОВ, определяющие глубины фотической зоны и видимости диска Секки (данные о взвеси в нашем распоряжении отсутствовали). Представленные характеристики вычислены посредством усреднения каждой из них по 26 станциям, при этом за ОРОВ принимались значения на глубине, превышающей Z_ϕ , значения хлорофилла *a* суммировались по Z_ϕ , а под температурой воды понималось её среднее значение по Z_ϕ .

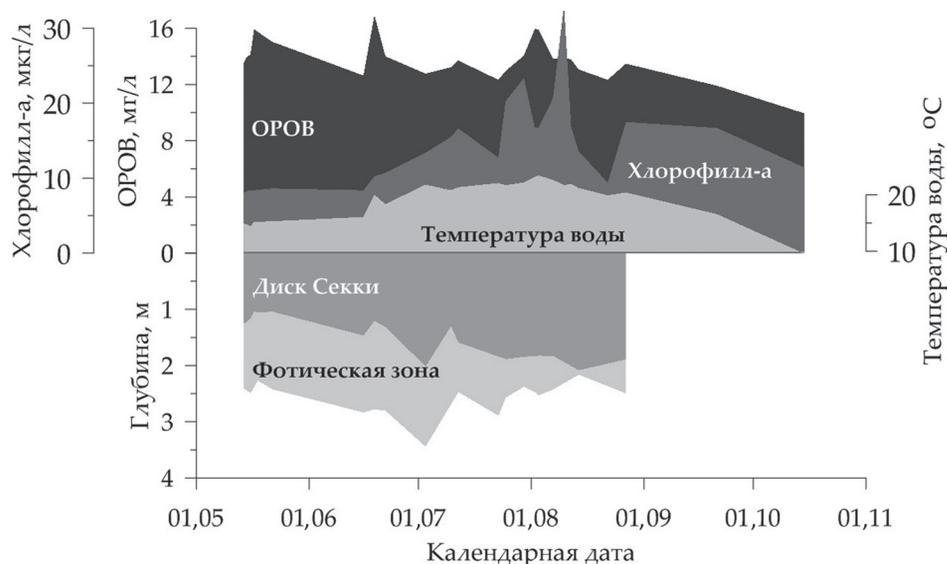


Рис. 2. Сезонное распределение гидрооптических характеристик

Как видно на *рис. 2*, с мая по август средняя по всем станциям глубина видимости диска Секки менялась от 1,0 до 2,0 м, а средняя глубина фотической зоны — от 2,2 до 3,5 м, причём увеличение обеих глубин имело место до начала июля одновременно с уменьшением ОРОВ и незначительным возрастанием хлорофилла *a*. При этом обе характеристики менялись

синхронно. Во второй половине лета глубина видимости диска Секки оставалась в среднем на уровне 2 м и испытывала небольшие колебания, коррелирующие с изменениями концентрации ОРОВ, в то время как глубина фотической зоны уменьшалась с увеличением концентрации хлорофилла *a*, возвращаясь к своему исходному весеннему значению в 2,5 м, совпадающему с осенним значением глубины видимости диска Секки.

Скачки концентрации ОРОВ относительно среднего уровня в 13 мг/л, согласно метеорологическим данным Волжской ГМО (гидрометеорологическая обсерватория) (<https://gr5.ru>), коррелировали с предшествующими за 3–5 дней до даты измерений ливнями, что приводило к стоку полевых вод и росту концентраций ОРОВ в воде. Однако эти вариации концентрации ОРОВ не оказывали заметного влияния на изменение средней концентрации хлорофилла *a* (коэффициент детерминации $R^2 = 0,02$), в то время как между хлорофиллом *a* и температурой воды в фотическом слое была установлена линейная регрессия с $R^2 = 0,66$. Так, с мая и до середины июня концентрация хлорофилла *a* была на уровне 8 мкг/л при неизменной температуре воды, после чего произошёл незначительный скачок хлорофилла *a* до 10 мкг/л при быстром прогреве воды до 20 °С. Дальнейший её прогрев сопровождался ростом концентрации хлорофилла *a* до значений 30 мкг/л (средних по водохранилищу), приходящихся на середину августа. Отдельные локальные минимумы вблизи пика цветения были связаны с «выходом» части водорослей из фотической зоны под действием развитого ветрового волнения. Сезонный спад концентраций хлорофилла *a* начался с первых чисел сентября и продолжался до конца октября синхронно с остыванием воды и уменьшением концентрации ОРОВ.

Сезонная изменчивость яркости воды

В качестве примера на *рис. 3* (см. с. 207) приведена выборка спектров КЯ по девяти датам для восьми точек водохранилища, соответствующих пойме, руслу и устью р. Юг. Согласно *рис. 3*, в середине мая яркость воды была однородна по всему исследуемому району площадью порядка 150 км². Зарегистрированные спектры оказались близки для всех точек водохранилища, за исключением станции № 26, где КЯ был монотонен в красной области, что могло быть связано с рассеянием на частицах взвеси. В целом все спектры имели одинаковую форму, характерную для водоёмов, насыщенных ОРОВ, а ярко выраженные экстремумы, соответствующие поглощению или рассеянию оптически активных компонентов воды, отсутствовали. К концу мая все КЯ незначительно «просели» по абсолютным значениям равномерно для всех длин волн, что говорит об уменьшении концентрации минеральных частиц взвеси. Через месяц, 22 июня, спектры КЯ для станций № 4 и 11 на пойме и станции № 14 на русле изменились. В них хорошо прослеживались: области поглощения пигментами фитопланктона и ОРОВ в синей области на 420–430 нм; максимумы на 560–570 нм и 710–720 нм, связанные с минимумами поглощения всеми пигментами фитопланктона и суммарным поглощением хлорофилла *a*, минеральной взвесью и водой соответственно; локальные минимумы на 620–630 нм и 670–680 нм, обусловленные поглощением фикоцианином и хлорофиллом *a* соответственно; возвышение на 640–660 нм из-за флуоресценции фикоцианина. В областях, где сине-зелёные водоросли образовывали поверхностные маты, спектры их яркости приближались к спектру зелёных растений (не показаны), характерной чертой которых являлось слабое проявление поглощения водой на длинах волн 720–760 нм. На всех других станциях в этот день яркость воды упала в два раза равномерно по всему спектру, что говорит о значительном снижении концентрации минеральной взвеси по сравнению с майскими значениями. Действительно, в экспедициях с мая и до середины июня в воде визуально наблюдалось большое количество частиц взвеси светлого оттенка, вероятно связанное с последствиями половодья и стоком береговой взвеси после зимы под действием дождей. Однако к концу июня прозрачность воды скачкообразно увеличилась, её цвет принял обычный для этого водоёма коричневатый оттенок, взвесь исчезла. Визуальное улучшение оптических свойств воды подтверждало увеличение глубины видимости диска Секки, представленное на *рис. 2*, а также результаты сопутствующих измерений первичных гидрооптических характеристик, которые не вошли в настоящую работу.

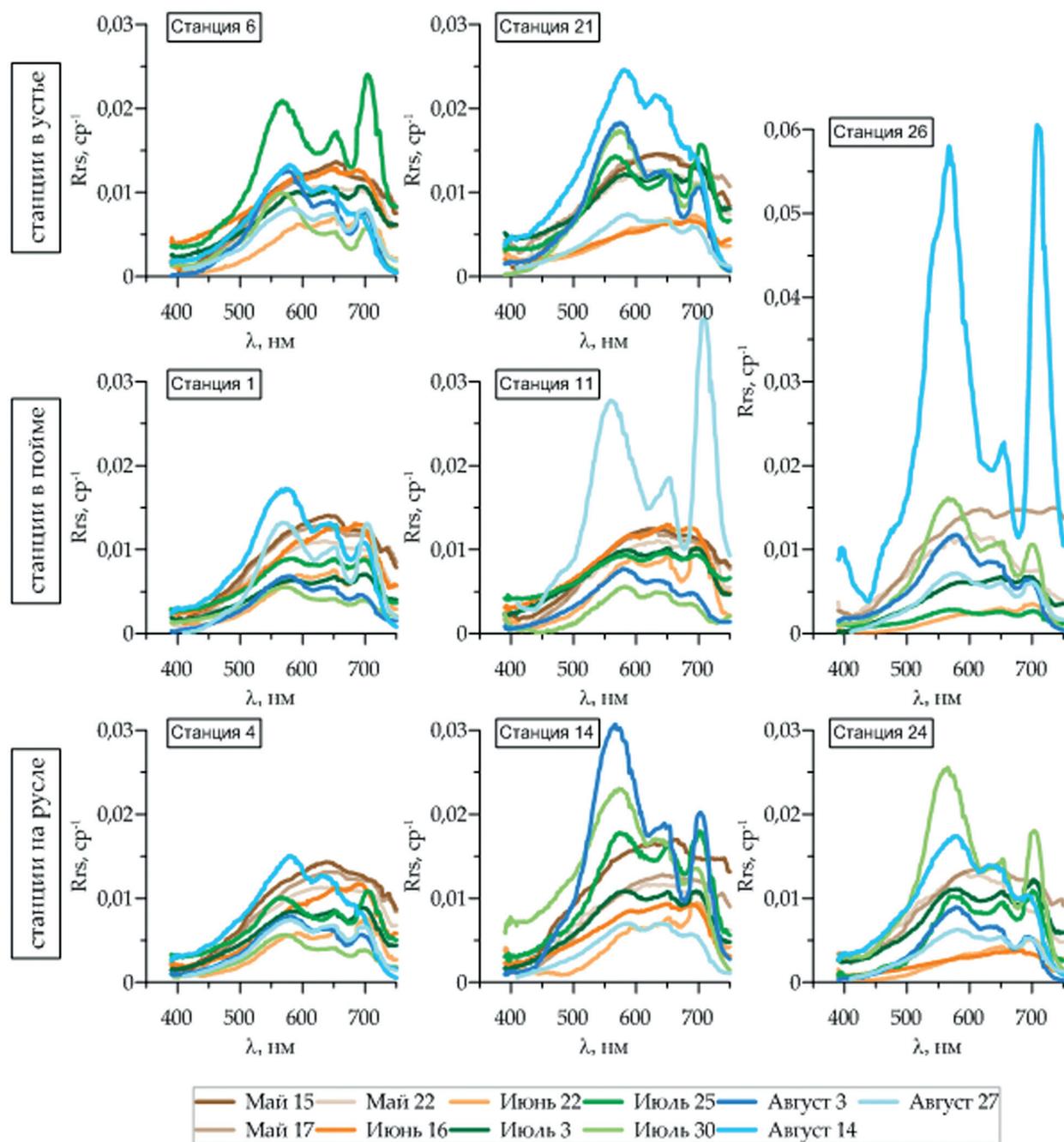


Рис. 3. Пространственно-временная изменчивость яркости воды Горьковского водохранилища в период с мая по август 2018 г.

Спустя месяц, 25 июля, интенсивное цветение цианобактерий проявилось в спектре яркости воды на всех станциях, причём наиболее сильно — для русла и устьев рек Троща и Юг, и наименее заметно — для пойменной части. При этом на 26-й станции яркость упала в 2–3 раза по сравнению с данными для любых других станций, а всего через пять дней выросла в пять раз. Похожая ситуация наблюдалась и для других станций в последующие дни измерений. Причиной стал ветровой форсинг, осуществляющий перенос значительных объёмов сине-зелёных водорослей в область поймы (к станциям № 11 и 26). Так, например, 14 августа на 26-й станции КЯ достиг максимальных значений в $0,06 \text{ cp}^{-1}$, вызванных высокой концентрацией хлорофилла *a* в 40 мкг/л, а через две недели, 27 августа, уменьшился на порядок. Вместе с тем можно заметить, что в этот день, несмотря на локальные максимумы цветения цианобактерий на отдельных станциях, спектры яркости воды на всех других станциях

оказались близки как по форме, так и по абсолютным значениям, причём последние соответствовали значениям спектров за 22 июня, когда цветение было впервые замечено. Согласно метеорологическим данным за этот день и несколько предшествующих ему, на водохранилище преобладал ветер южного направления, совпадающего с вытянутостью водоёма, что привело к ветро-волновому перемешиванию верхнего слоя равномерно по всему исследуемому району, кроме станции № 11. Последняя закрыта от южных и восточных ветров выступом берега и защищена от волнения значительной частью мелководной поймы с глубинами менее 2 м, что и объясняет высокие значения хлорофилла *a* на ней. В целом по водохранилищу в результате ветро-волнового перемешивания часть хлорофилла *a* перешла в нижние слои и оптические свойства приблизились к тем, что имели место в конце июня перед интенсивным развитием цианобактерий.

Вертикальные профили хлорофилла *a*

Для анализа взаимосвязи спектров яркости водной толщи и вертикальных профилей хлорофилла *a* были использованы данные за август, когда наблюдалось как интенсивное цветение сине-зелёных водорослей, так и регулярное ветровое волнение. На *рис. 4* приведены измененные вертикальные профили хлорофилла *a* при различных скоростях ветра *W*, осреднённых за 1 ч, и ветровых разгонах *L*. Анализ данных показал, что при незначительной скорости ветра вертикальные профили описывались обратной степенной функцией; при скоростях ветрах до 6 м/с и разгонах не более 5 км профили трансформировались в экспоненциальные, а при дальнейшем увеличении любого из параметров — в квазиоднородные.

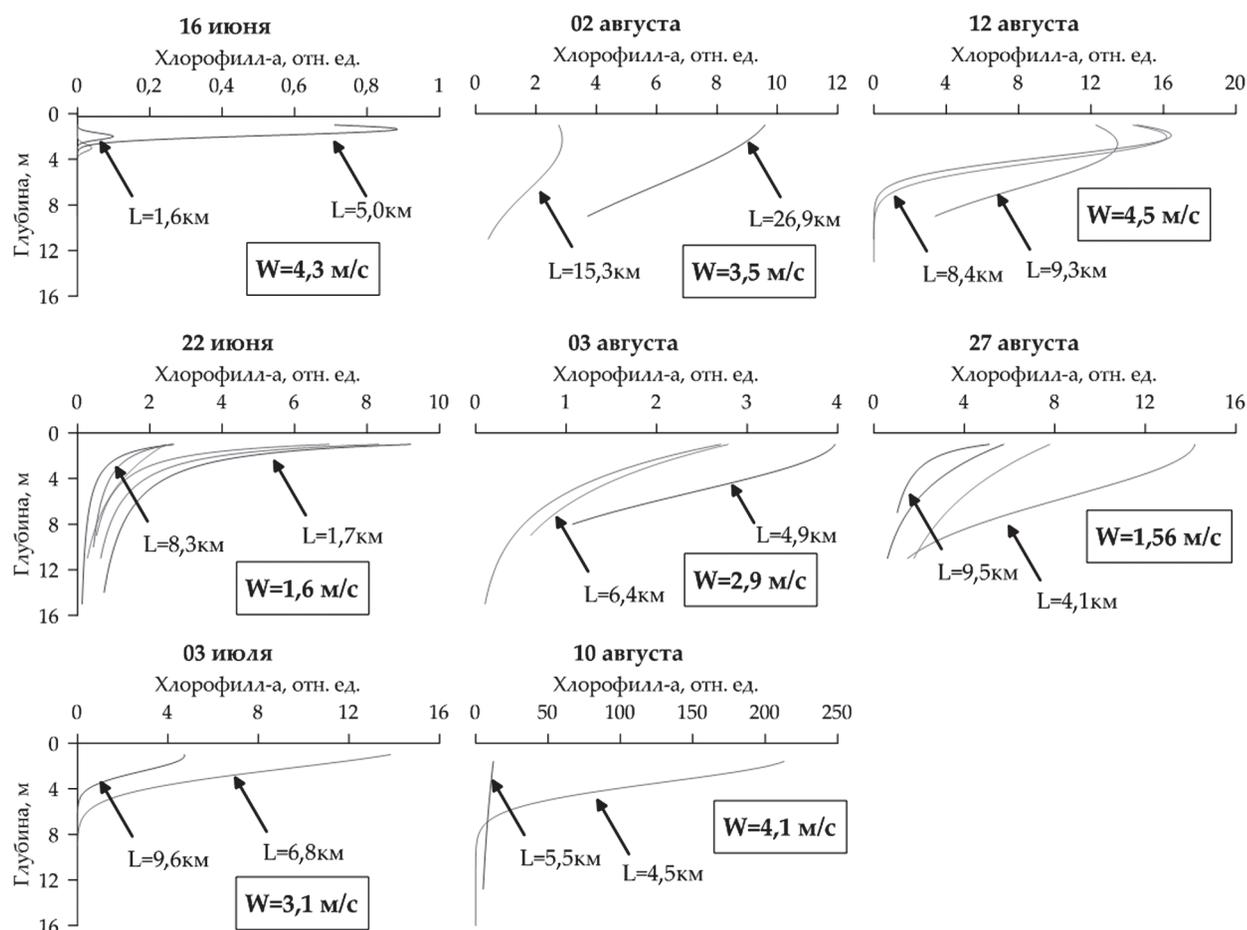


Рис. 4. Вертикальные профили хлорофилла *a* для различных календарных дат, средних скоростей ветра (*W*) и ветрового разгона (*L*)

Полученные результаты согласуются с недавним исследованием для одного из озёр Китая (Хуе et al., 2015). В нём ещё были отмечены гауссовы профили, которые на Горьковском водохранилище встречались реже, в основном весной в период формирования цветения сине-зелёных водорослей.

Качественное сопоставление трёх десятков вертикальных профилей хлорофилла *a* со спектрами яркости воды показало, что последние классифицируются лишь по двум видам, первый из которых соответствует квазиоднородному распределению фитопланктона (рис. 5, слева), а второй — вертикальным профилям, соответствующим обратной степенной и экспоненциальной функциям (рис. 5, справа).

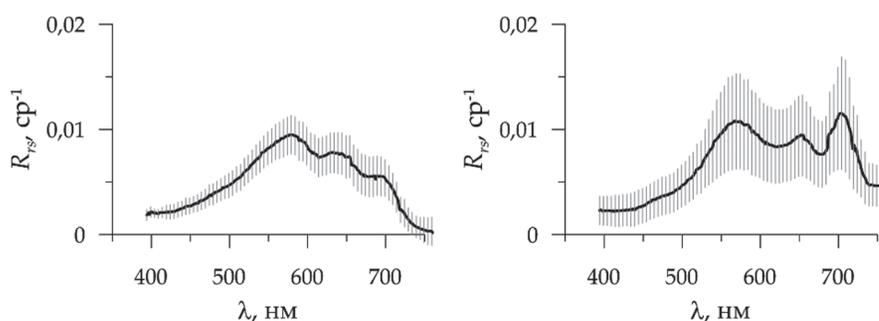


Рис. 5. Спектры яркости воды при квазиоднородном (слева), степенном и экспоненциальном (справа) вертикальных профилях хлорофилла *a*; сплошной линией обозначен средний спектр яркости, серым штрихом — среднеквадратичное отклонение

Анализ количественной связи параметров спектров с концентрацией хлорофилла *a* в фотическом слое оказался затруднён ввиду необходимости учёта сразу целого набора параметров: скорости и направления ветра, продолжительности его воздействия, разгона, концентрации других оптически активных компонентов — минеральной взвеси и ОРОВ.

Тем не менее для выборочного набора данных нам удалось проследить влияние волнения на концентрацию хлорофилла *a* путём вычисления параметра *P*, равного отношению содержания хлорофилла *a* в фотической зоне (глубина которой была известна) к содержанию хлорофилла *a* во всём водном слое для разных разгонов. Однако ввиду разности глубин на станциях измерений за максимальную была принята глубина, в три раза превосходящая среднюю глубину фотического слоя, т.е. 9 м. В качестве примера на рис. 6 слева представлены результаты зондирования в шести точках водохранилища вдоль направления ветра, демонстрирующие трансформацию профилей хлорофилла *a* из гауссового в квазиоднородное под действием ветрового волнения, а на рис. 6 справа — результаты расчёта параметра *P* как функции разгона. Совокупность таких оценок для разных скоростей ветра и разгонов может быть полезна на практике при оценке хлорофилла *a* по спутниковым данным.

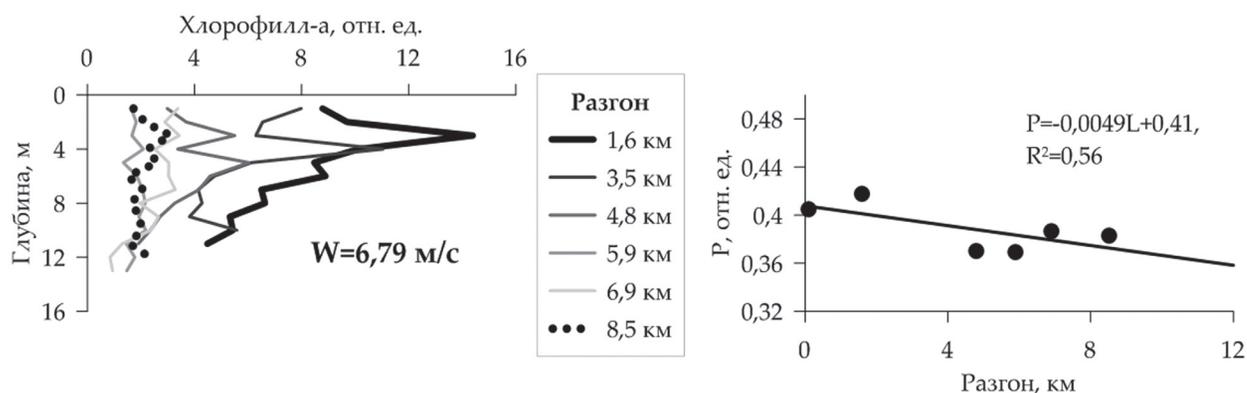


Рис. 6. Пример изменчивости вертикального профиля хлорофилла *a* под действием интенсивного ветро-волнового воздействия (слева) и расчёта параметра *P* (справа)

Влияние дна на коэффициент яркости воды

Ещё один важный фактор, который следовало бы учитывать при интерпретации спектров яркости воды, — это влияние дна. Нами был проведён эксперимент по оценке вклада яркости дна на мелководье весной в условиях средней для этого водоёма прозрачности воды (см. *рис. 1*). Измерения проводились над участком спокойной воды с песчаным дном как самым светлым из представленных на Горьковском водохранилище. Результаты измерений показаны на *рис. 7* в сравнении со спектром, полученным для значительной глубины. Видно, что рост толщины водного слоя вносит наибольший вклад в красной части спектра при одновременном уменьшении абсолютных значений КЯ. При глубине 60 см (что соответствует половине глубины видимости диска Секки) измеренные величины сопоставимы с коэффициентами яркости глубокой воды. Поэтому, если при схожих концентрациях оптически активных компонентов воды избегать глубин менее метра, регистрируемая яркость воды будет свободна от влияния отражённого дном водоёма света.

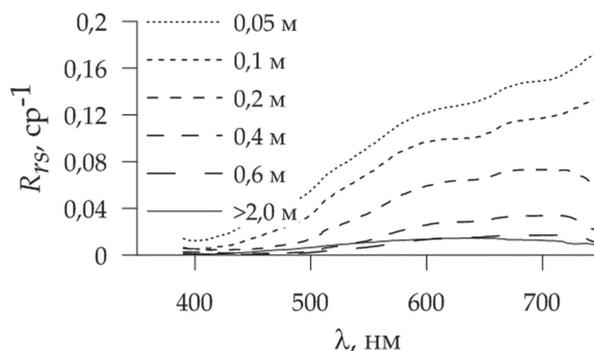


Рис. 7. Коэффициент яркости воды на мелководье различной глубины с песчаным дном

Выводы

В работе представлены результаты продолжительных судовых измерений коэффициента яркости вод Горьковского водохранилища летом 2018 г. применительно к задачам спутникового мониторинга качества вод внутренних водоёмов. Анализ собранных данных позволил оценить зависимость спектра яркости воды от концентрации оптически активных компонентов, вертикального распределения фитопланктона и влияния дна. В частности, было установлено, что гидрооптический режим водохранилища летом 2018 г. условно делился на два этапа: весенний, характеризуемый водой с высоким содержанием минеральной взвеси в конце паводка, и летний — с низким содержанием минеральной взвеси и высокими пространственно-временными вариациями концентрации хлорофилла *a*, вызванными ветровым форсингом и волновым перемешиванием (влияние гидрохимии и биологии здесь не рассматривается). На примере данных зондирования по треку судна в направлении ветра сделана оценка изменения концентрации хлорофилла *a* в фотическом слое в зависимости от ветрового разгона. Совокупность таких оценок для разных скоростей ветра и разгонов может быть полезна на практике при восстановлении концентрации хлорофилла *a* по спутниковым данным. Одновременно с этим показано, что спектры яркости воды могут быть использованы при решении обратных задач гидрооптики без учёта влияния дна для районов водохранилища с глубинами, превышающими половину глубины видимости диска Секки. Этот результат получен для песчаного дна как самого светлого из представленных на водохранилище.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-10120).

Литература

1. Корчёмкина Е. Н., Мольков А. А. Региональный биооптический алгоритм для Горьковского водохранилища: первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 184–192.

2. Мольков А.А., Капустин И.А., Шегольков Ю.Б., Воденеева Е.Л., Калашников И.Н. Об исследовании оптических свойств Горьковского водохранилища // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11. № 3. С. 26–33.
3. Оханкин А.Г., Микульчик И.А., Корнева Л.Г., Минеева Н.М. Фитопланктон Горьковского водохранилища. Тольятти: ИБВВ, 1997. 224 с.
4. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Iss. 1. P. 64–90.
5. Beutler M., Wiltshire K.H., Meyer B., Moldaenke C., Lüring C., Meyerhöfer M., Hansen U.-P., Dau H. A fluorometric method for the differentiation of algal populations in vivo and in situ // *Photosynthesis Research*. 2002. V. 72. Iss. 1. P. 39–53.
6. Chorus I., Falconer I.R., Salas H.J., Bartram J. Health risks caused by freshwater cyanobacteria in recreational waters // *J. Environmental Toxicology and Pharmacology Health. Pt. B: Critical Reviews*. 2000. V. 3. Iss. 4. P. 323–347.
7. Gitelson A.A., Gurlin D., Moses W.J., Yacobi Y.Z. Remote Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland, Estuarine, and Coastal Waters // *Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms, and Applications*. CRC Press, 2011. Ch. 18. P. 449–478.
8. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. Regional Models for High-resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSS Concentrations in Gorky Reservoir by Sentinel-2 Images // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Iss. 10. P. 1215–1241.
9. Morel A., Prieur L. Analysis of Variations in Ocean Color // *Limnology and Oceanography*. 1977. V. 22. P. 709–722.
10. Spyraeos E., O'Donnell R., Hunter P., Miller C., Scott M., Simis S., Neil C., Barbosa C., Binding C., Bradt S., Bresciani M., Dall'Olmo G., Giardino C., Gitelson A., Kutser T., Li L., Matsushita B., Martinez-Vicente V., Matthews M., Ogashawara I., Ruiz-Verdú A., Schalles J., Tebbs E., Zhang Yu., Tyler A. Optical types of inland and coastal waters // *Limnology and Oceanography*. 2018. V. 63. Iss. 2. P. 846–870.
11. Xue K., Zhang Yu., Duan H., Ma R., Loisel S., Zhang M. A Remote Sensing Approach to Estimate Vertical Profile Classes of Phytoplankton in a Eutrophic Lake // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. Iss. 11. P. 14403–14427.

On the influence of cyanobacteria, surface roughness, and bottom radiance on the remote sensing reflectance of the Gorky Reservoir

A. A. Molkov¹, E. N. Korchemkina^{2,1}, G. V. Leshchev¹,
O. A. Danilicheva¹, 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

This paper presents the results of the remote sensing reflectance (R_{rs}) measurements in the Gorky Reservoir during 2018 summer season in relation to the task of satellite monitoring of inland waters. Ship measurements were carried out at 26 stations located in the lake part of the reservoir from its southern side on an area of about 150 square kilometers. Secchi depth, vertical profiles of chlorophyll *a* (Chl-*a*) and colored dissolved organic matter, integral underwater irradiance, as well as some apparent optical properties, necessary to retrieve of R_{rs} , were measured at these stations. On the basis of the obtained data, the analysis of R_{rs} variability associated with seasonal changes of the water optical properties and the observation conditions has been carried out. It was established that hydro-optical regime of the reservoir was conventionally divided into two stages: spring that characterized by a high content of mineral suspension in water, and summer with a low content of mineral suspension and high spatial-temporal variations of Chl-*a* concentration. For the period of the most intense of blue-green algal bloom, the obtained R_{rs} spectra were classified by two types of Chl-*a* vertical profiles corresponding to different wind-wave conditions. Also, preliminary estimates of the Chl-*a* decrease in the euphotic layer with increase of fetch were obtained. At the same time, it was shown that the influence of the

bottom radiance on the R_{rs} spectra can be neglected for areas where depths exceeding half of the Secchi depth. These results are aimed at improving the algorithms for retrieval of the water optical properties by satellite images of the Gorky Reservoir.

Keywords: remote sensing reflectance, Secchi depth, euphotic zone depth, chlorophyll *a* vertical profiles, Gorky Reservoir

Accepted: 25.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-203-212

References

1. Korchemkina E. N., Molkov A. A., Regional'nyi bioopticheskii algoritm dlya Gor'kovskogo vodokhranilishcha: pervye rezul'taty (Regional bio-optical algorithm for Gorky reservoir: first results), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 184–192.
2. Molkov A. A., Kapustin I. A., Shchegolkov Yu. B., Vodeneeva E. L., Kalashnikov I. N., On correlation between inherent optical properties at 650 nm, Secchi depth and blue-green algal abundance for the Gorky reservoir, *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2018, Vol. 11, No. 3, pp. 26–33.
3. Okhapkin A. G., Mikul'chik I. A., Korneva L. G., Mineeva N. M., *Fitoplankton Gor'kovskogo vodokhranilishcha* (Phytoplankton of the Gorky Reservoir), Tolyatti: IBIW, 1997, 224 p.
4. Ansper A., Alikas K., Retrieval of Chlorophyll *a* from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purpose, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 1, Issue 1, pp. 64–90.
5. Beutler M., Wiltshire K. H., Meyer B., Moldaenke C., Lüring C., Meyerhöfer M., Hansen U.-P., Dau H., A fluorometric method for the differentiation of algal populations in vivo and in situ, *Photosynthesis Research*, 2002, Vol. 72, Issue 1, pp. 39–53.
6. Chorus I., Falconer I. R., Salas H. J., Bartram J., Health risks caused by freshwater cyanobacteria in recreational waters, *J. Environmental Toxicology and Pharmacology Health. Part B: Critical Reviews*, 2000, Vol. 3, Issue 4, pp. 323–347.
7. Gitelson A. A., Gurlin D., Moses W. J., Yacobi Y. Z., Remote Estimation of Chlorophyll-*a* Concentration in Inland, Estuarine, and Coastal Waters, In: *Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms, and Applications*, CRC Press, 2011, Chapter 18, pp. 449–478.
8. Molkov A. A., Fedorov S. V., Pelevin V. V., Korchemkina E. N., Regional Models for High-resolution Retrieval of Chlorophyll *a* and TSS Concentrations in Gorky Reservoir by Sentinel-2 Images, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Issue 10, pp. 1215–1241.
9. Morel A., Prieur L., Analysis of Variations in Ocean Color, *Limnology and Oceanography*, 1977, V. 22, pp. 709–722.
10. Spyarakos E., O'Donnell R., Hunter P., Miller C., Scott M., Simis S., Neil C., Barbosa C., Binding C., Bradt S., Bresciani M., Dall'Olmo G., Giardino C., Gitelson A., Kutser T., Li L., Matsushita B., Martinez-Vicente V., Matthews M., Ogashawara I., Ruiz-Verdú A., Schalles J., Tebbs E., Zhang Yu., Tyler A., Optical types of inland and coastal waters, *Limnology and Oceanography*, 2018, Vol. 63, No. 2, pp. 846–870.
11. Xue K., Zhang Yu., Duan H., Ma R., Loiselle S., Zhang M., A Remote Sensing Approach to Estimate Vertical Profile Classes of Phytoplankton in a Eutrophic Lake, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, Issue 11, pp. 14403–14427.