

Региональный биооптический алгоритм для Горьковского водохранилища: первые результаты

Е. Н. Корчёмкина¹, А. А. Мольков²

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь 299011, Россия
E-mail: korchemkina@mhi-ras.ru*

² *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: a.molkov@inbox.ru*

Определение концентраций естественных примесей в водах пресноводных водоёмов по спутниковым данным требует решения целого ряда задач, одной из которых является создание регионального биооптического алгоритма. Такого рода работы активно ведутся для открытых районов океанов и морей, а также для прибрежных морских зон. В настоящей работе предложено использовать существующий «черноморский» полуаналитический алгоритм (Ли и др., 2015) с целью его адаптации под пресные эвтрофные воды Горьковского водохранилища. Алгоритм основан на использовании данных коэффициента яркости морской воды и позволяет рассчитывать концентрации оптически значимых примесей (хлорофилла *a*, растворённого органического вещества и минеральной взвеси).

В работе представлены результаты адаптации оптических моделей поглощения неживой органикой и пигментами фитопланктона к биооптическим особенностям исследуемого водоёма за счёт использования данных натурных наблюдений. На их основе выявлены спектральные особенности поглощения и диапазоны спектра с доминирующими оптическими свойствами каждого компонента воды. Такой подход позволил добиться положительных результатов в части быстродействия и точности алгоритма.

Апробация алгоритма и верификация результатов его работы выполнена с использованием данных натурных измерений коэффициента яркости водной толщи и результатов лабораторного анализа проб воды на содержание оптически активных примесей.

Ключевые слова: Горьковское водохранилище, эвтрофные водоёмы, коэффициент яркости воды, биооптическая модель, региональный полуаналитический алгоритм, хлорофилл *a*, минеральная взвесь, POB

Одобрена к печати: 29.01.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-184-192

Введение

Разработка региональных алгоритмов дистанционной оценки содержания примесей в природных водоёмах представляет собой актуальную проблему, однако в основном подобные алгоритмы создаются для различных районов моря — шельфовых, прибрежных и приустьевых зон (Копелевич и др., 2006; Лаврова и др., 2014). Для пресноводных водоёмов задача является актуальной ввиду малого числа подобных работ (Kutser, 2009; Mishra et al., 2017; Odermatt et al., 2012), а также в силу того, что в каждом внутреннем водоёме создаётся особый биооптический режим, обусловленный выносами минеральной взвеси и органических веществ, в частности удобрений, промышленных и бытовых стоков. При этом спутниковый мониторинг как способ регулярного охвата больших площадей акваторий испытывает серьёзные сложности при оценке биопродуктивности внутренних пресноводных водоёмов, характеризующихся слабым русловым течением и большим количеством мелководных прогреваемых участков (Лаврова и др., 2014). В данной работе предлагается подход к решению одной из проблем дистанционного зондирования внутренних водоёмов, а именно к созданию регионального биооптического алгоритма для решения обратной задачи определения концентраций оптически активных примесей в воде на примере Горьковского водохранилища.

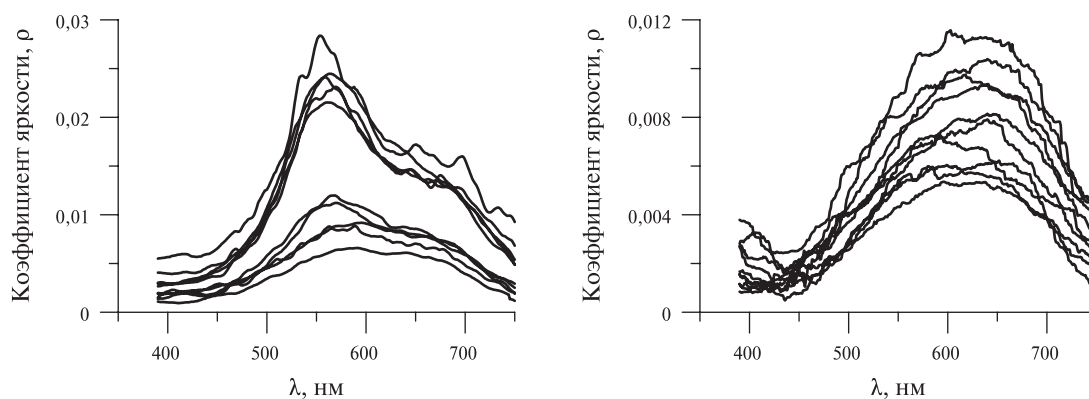


Рис. 1. Спектры коэффициента яркости воды в южной части Горьковского водохранилища: *a* — 01.08.2016–06.08.2016; *b* — 27.06.2017–29.06.2017, соответствующие по времени отобранным пробам на хлорофилл

Методы и подходы

Первым шагом на пути к решению поставленной задачи было выполнение натурных измерений коэффициента яркости (КЯ) водной толщи, поскольку в литературе такие данные для выбранного водоёма отсутствуют. Для этого использовался разработанный в отделе оптики моря МГИ РАН (Ли, Мартынов, 2000) спектрофотометр, измеряющий спектр восходящей яркости водоёма под углом $30\text{--}45^\circ$, нормированной на падающую облучённость. Измерения проводились с борта судна при различной ветро-волновой обстановке в южной части водохранилища (южнее 57° с. ш. в 2016 г. и южнее $56,75^\circ$ с. ш. в 2017 г.) на неравномерной сетке. В результате полевых измерений было получено около 150 спектров КЯ в диапазоне длин волн $390\text{--}750$ нм с разрешением 1 нм и с погрешностью в среднем по спектру 3 %. В качестве примера на рис. 1 приведён набор спектров КЯ, наиболее полно демонстрирующий их вариации. В августе 2016 г. присутствует разделение всех спектров на две группы, заметно отличающиеся вкладом взвеси и неживой органики в восходящую яркость: чем выше КЯ во всём спектральном диапазоне, 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. Низкие значения КЯ в июне 2017 г., а также заметный провал в области 440 нм показывают, что основными оптически значимыми компонентами в этот период являлись неживое органическое вещество и пигменты фитопланктона.

Одновременно с измерениями КЯ было отобрано 20 проб воды с глубины $0,1\text{--}0,2$ м для последующего лабораторного анализа с целью определения концентраций хлорофилла *a* спектрофотометрическим методом. На основании этих данных позже была проведена верификация результатов предложенного в настоящей работе регионального биооптического алгоритма.

Биооптический алгоритм

Для обработки данных КЯ был адаптирован разработанный ранее авторами для вод Чёрного моря региональный полуаналитический алгоритм (Ли и др., 2015), позволяющий рассчитывать концентрации пигментов фитопланктона, поглощение растворённым и неживым взвешенным органическим веществом и обратное рассеяние назад минеральной взвесью. Алгоритм успешно применялся для обработки спутниковых и контактных данных при исследовании вод Чёрного моря. При применении к спутниковым данным восходящей яркости биооптический алгоритм позволяет получить значения концентрации хлорофилла, которые

лучше согласуются с данными непосредственных измерений, чем стандартные спутниковые продукты (Корчёмкина, Ли, 2015).

На предварительном этапе адаптация алгоритма заключалась в выборе участков спектра, подходящих для определения каждого неизвестного параметра, а также входных параметров, соответствующих биооптическим свойствам исследуемого водоёма. В дальнейшем будет учтена нелинейность биооптической модели коэффициента яркости, флюоресценция и другие факторы.

В алгоритме использована аппроксимация КЯ формулой из работы (Morel, Prieur, 1977):

$$\rho(\lambda) = k \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)}, \tag{1}$$

где $a(\lambda)$ и $b_b(\lambda)$ — показатели поглощения и рассеяния назад соответственно, k — коэффициент, зависящий от углового распределения яркости и особенностей индикатрисы рассеяния в заднюю полусферу. Точность математического описания оптических свойств морской воды невысока вследствие влияния большого количества факторов и их природной изменчивости. Поскольку пределы этой изменчивости широки, увеличение числа параметров не поможет повысить точность модельного описания. В качестве параметров, одновременно информативных и достаточно общих, выбраны концентрация пигментов фитопланктона, поглощение неживым органическим веществом (сумма поглощения растворённым органическим веществом (РОВ) и детритом) и его спектральный наклон, а также обратное рассеяние минеральной взвесью.

Упомянутые параметры поглощения входят в модель спектрального показателя поглощения следующим образом:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + C_{chl} a_{chl}^*(\lambda) + C_{dom} e^{-a(\lambda-\lambda_0)},$$

где $a_w(\lambda)$ — поглощение чистой водой (Pore, Fry, 1997); C_{chl} и $a_{chl}^*(\lambda)$ — концентрация и удельное поглощение пигментов фитопланктона; C_{dom} — поглощение неживым органическим веществом на длине волны $\lambda_0 = 440$ нм; α — спектральный наклон поглощения неживой органики. В настоящей работе в качестве удельного поглощения пигментов были использованы уточнённые данные (Paavel et al., 2016; Stæhr, Markager, 2004) для пресноводных водоёмов, которые также зависят от концентрации хлорофилла $a C_{chl}$:

$$a_{chl}^*(\lambda) = A(\lambda) C_{chl}^{-B(\lambda)}.$$

Аналогичным образом записывается параметризация для показателя обратного рассеяния:

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^\nu,$$

где $b_{bw}(\lambda)$ — показатель обратного рассеяния чистой воды; b_{bp} — показатель обратного рассеяния взвешенных минеральных частиц на длине волны 550 нм; ν — спектральный наклон обратного рассеяния, $\nu = 0,5$ (Маньковский, 1996). Рассеянием органическими частицами на первой стадии адаптации алгоритма было решено пренебречь, как это обычно делается для морской воды.

Таким образом, спектр КЯ описывался формулой:

$$\rho(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp} (550) (\lambda_0/\lambda)^\nu}{a_w(\lambda) + A(\lambda) C_{chl}^{1-B(\lambda)} + C_{dom} (440) e^{-\alpha(\lambda-440)}}, \tag{2}$$

где коэффициент k принимался равным 0,15 (Шибанов, 2005), что соответствовало измерениям КЯ в натурном эксперименте под углами 35–45°, а неизвестные параметры $b_{bp}(550)$, C_{chl} , $C_{dom}(440)$ и α вычислялись в итерационной процедуре, описанной далее.

С математической точки зрения вычисление параметров модельного спектра ρ_m по экспериментальным данным ρ_e состоит в нахождении минимума функционала $f = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\rho_e(\lambda) - \rho_m(\lambda)]^2$ как функции $b_{bp}(\lambda_0)$, C_{dom} и C_{chl} во всём спектральном диапазоне (390–750 нм). Вычисление параметра α пока здесь не рассматривается. Для этого необходимо решить систему трёх уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{dom})}{\partial b_{bp}} = 0, \\ \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{dom})}{\partial C_{chl}} = 0, \\ \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{dom})}{\partial C_{dom}} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Минимизируя отклонение модельного спектра от экспериментальных данных, можно устранить только случайную ошибку эксперимента, при этом модельные представления считаются абсолютно надёжными. Однако модель не описывает и в принципе не может описать все возможные особенности поглощения и рассеяния компонентами водной среды.

Проблема состоит в том, что вследствие перекрытия спектральных диапазонов влияния поглощения и рассеяния различных компонентов вариации одного компонента могут быть приписаны другому. Поэтому в данном алгоритме выделяются участки спектра, в которых наибольшим образом, по сравнению с остальными диапазонами, проявляется влияние каждого неизвестного параметра модели. Математически это выглядит как разделение системы уравнений (3) на три отдельных уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{dom})}{\partial b_{bp}} \Big|_{\lambda_5}^{\lambda_6} &= 0, \\ \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{dom})}{\partial C_{chl}} \Big|_{\lambda_3}^{\lambda_4} &= 0, \\ \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{dom})}{\partial C_{dom}} \Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2} &= 0, \end{aligned}$$

где λ_i — границы выделенных спектральных участков. В каждом спектральном участке выполняется минимизация по одному параметру, остальные же считаются постоянными. Такой метод позволяет упростить вычисления и стабилизировать решение обратной задачи.

В региональном алгоритме для Горьковского водохранилища предлагается учесть характерную форму спектров КЯ путём выбора соответствующих спектральных участков, в которых наиболее выгодно рассчитывать каждый из параметров модели. Для этого были проведены численные эксперименты на синтезированных данных. Спектры рассчитывались с помощью формулы (2) для нескольких наборов фиксированных параметров $b_{bp}(\lambda_0)$, C_{dom} и C_{chl} . В каждом эксперименте ко всем синтезированным спектрам добавлялся случайный шум с максимальной амплитудой, пропорциональной удельному поглощению либо рассеянию исследуемого компонента среды. Например, в эксперименте по определению участка для пигментов использовался КЯ, рассчитанный по формуле:

$$\rho(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550)(\lambda_0/\lambda)^v}{a_w(\lambda) + C_{chl}A(\lambda)(C_{chl}^{-B(\lambda)} + N(0,1)) + C_{dom}(440)e^{-\alpha(\lambda-440)}}$$

где $N(0,1)$ — нормально распределённое случайное число с нулевым математическим ожиданием и СКО, равным 0,1. Таким образом, мы считаем, что удельное поглощение пигментов описывается моделью с относительной погрешностью 10 %.

Затем проводился многократный расчёт неизвестных параметров по вышеописанной итерационной процедуре с перебором различных участков спектра. На *рис. 2* представлен пример распределения невязки $(C_{chl} - C_{chl0})^2$ в пространстве (λ_1, λ_2) , где λ_1 и λ_2 — нижняя и верхняя границы спектрального участка для расчёта концентрации пигментов. Минимум невязки (показан красным) соответствует $\lambda_1 = 670$ нм, $\lambda_2 = 740$ нм. В этот диапазон попадает красный максимум поглощения хлорофилла с пиком на $\lambda_0 = 680$ нм, поэтому полученный результат представляется вполне закономерным. Аналогичным образом были определены участки для неживой органики (390–550 нм) и взвеси (550–670 нм).

Использование для расчёта хлорофилла основного максимума поглощения на длине волны 440 нм, как это обычно делается при исследовании КЯ моря, в данном случае затруднено вследствие сильных вариаций поглощения растворённой органикой и детритом в этой области. Вместе с тем вариации концентрации пигментов также оказывают негативное влияние на возможность восстановления истинного поглощения неживой органикой. Поэтому был проведён дополнительный эксперимент, по результатам которого из диапазона для неживой органики был исключён участок 420–460 нм.

Параметр спектрального наклона поглощения неживой органикой α оказывает существенное влияние на восстанавливаемые концентрации пигментов и поглощение неживой органикой, и его правильный выбор очень важен для работоспособности модели. Для его определения необходимо проводить измерения спектров поглощения в пробах неживой органики. По причине отсутствия данных подобных измерений для эвтрофных пресных вод он был включён в число неизвестных параметров модели.

В итоге шаг итерационной вычислительной процедуры стал выглядеть следующим образом. На первом этапе вычисляется концентрация пигментов C_{chl} в диапазоне 670–740 нм путём минимизации по одному параметру, остальные же параметры имеют ненулевые начальные значения. Затем определяется $b_{bp}(550)$ в диапазоне 550–670 нм с учётом найденной концентрации пигментов. На последнем этапе вычисляются C_{dom} и α в участках 390–420 и 460–550 нм путём минимизации по двум параметрам. На последующих шагах используются значения параметров, полученные в предыдущем шаге. Для достижения условия остановки

$|C_{chl}^i - C_{chl}^{i-1}| < 0,001$ требуется около 10 итераций.

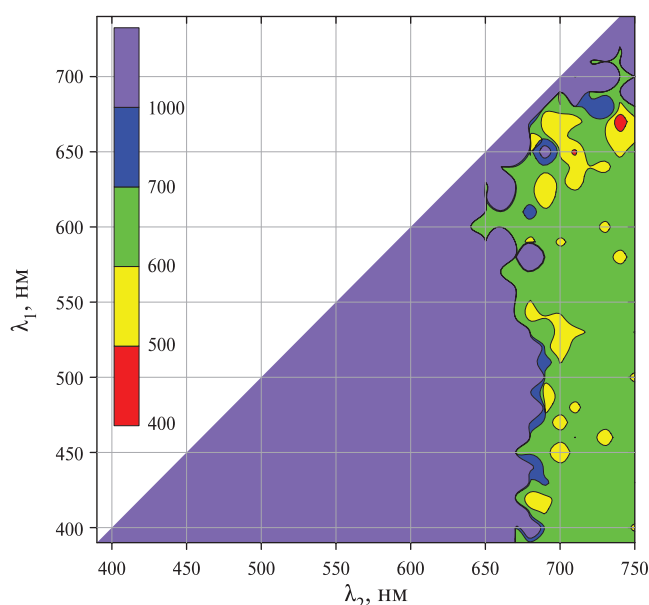


Рис. 2. Карта распределения невязки в $(\text{мг}/\text{м}^3)^2$ при расчёте концентрации пигментов

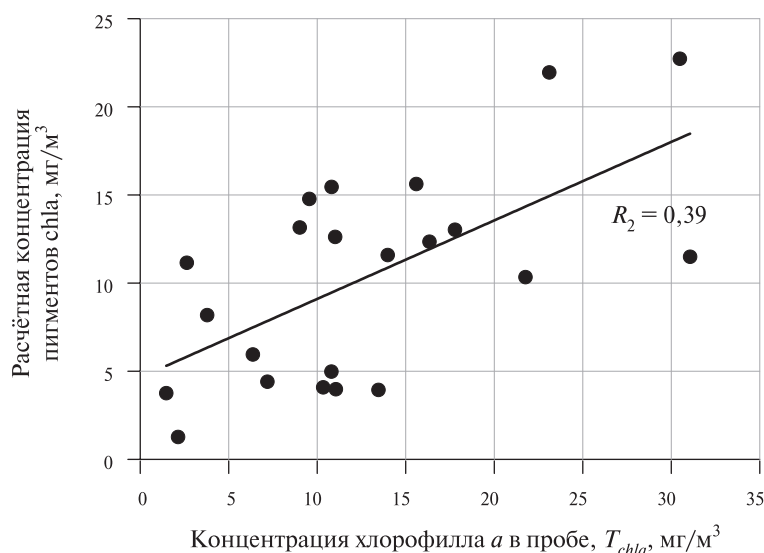


Рис. 3. Сопоставление концентрации хлорофилла по данным определения в пробах и по модельным расчётам за оба периода исследований

Результаты

С применением модифицированного алгоритма были рассчитаны концентрации пигментов фитопланктона, поглощение неживой органикой и рассеяние взвесью. Полученные значения концентраций хлорофилла *a* были сопоставлены с результатами их определений в пробах (рис. 3). В данный момент погрешность восстановления концентрации пигментов составляет 50 %.

Слабая корреляция объясняется не только несовершенством алгоритма, но и условиями перемешивания. Поскольку пробы отбирались с малой глубины, они могли содержать большие или меньшие концентрации пигментов, чем средняя по глубине (эффективная) концентрация в фотической зоне, от которой зависит коэффициент яркости. Систематическое занижение высоких значений обусловлено, по всей вероятности, несовершенством биооптической модели, не учитывающей эффект упаковки и адсорбцию органики на поверхности частиц взвеси.

Вместе с тем благодаря большому диапазону изменчивости значений концентрации хлорофилла по пробам (1–30 мг/м³) можно пронаблюдать изменение формы спектра коэффициента яркости и рассчитываемых значений неизвестных параметров. Получение большего количества данных для разных сезонов одновременно с дальнейшей модификацией биооптической модели и совершенствованием работы алгоритма и измерительной аппаратуры позволит получить более значимые корреляции натуральных и модельных данных.

Выводы

Предложенный в настоящей работе региональный биооптический алгоритм для вод Горьковского водохранилища является первой, грубой, но успешной итерацией на пути к решению задачи. Плюс алгоритма в том, что, с одной стороны, он базируется на математической модели, а с другой — апробируется и верифицируется результатами лабораторного анализа проб воды на содержание оптически активных примесей. При этом текущая погрешность алгоритма, протестированного на 20 пробах воды, оказывается порядка 50 %.

Вместе с тем понятны и пути повышения точности предложенного алгоритма. Помимо дальнейшей оптимизации математических подходов, заложенных в алгоритм, требуются натурные наблюдения параметров среды, которые используются в алгоритме. К числу таковых

в первую очередь относятся знания о спектральных показателях поглощения и рассеяния назад, характерных для примесей выбранного водоёма, а также вертикальные профили их распределения в зависимости от ветро-волновой обстановки. Внедрение указанных поправок в региональный алгоритм относится к ближайшим задачам авторов.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 17-77-10120 (адаптация модели коэффициента яркости водной толщи для Горьковского водохранилища на основе актуальных полевых данных о биооптических свойствах воды, разработка регионального биооптического алгоритма).

Литература

1. *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. 2. С. 99–105.
2. *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.
3. *Лаверова 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.
4. *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: МГИ НАН Украины, 2000. С. 163–173.
5. *Ли М. Е., Шибанов Е. Б., Корчёмкина Е. Н., Мартынов О. В.* Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 17–33.
6. *Маньковский В. И.* Основы оптики океана. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1996. 119 с.
7. *Шибанов Е. Б.* Численный метод решения уравнения переноса. Коэффициенты отражения и пропускания оптически тонкого плоскопараллельного слоя // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 3. С. 62–71.
8. *Kutser T.* Passive optical remote sensing of cyanobacteria and other intense phytoplankton blooms in coastal and inland waters // *Intern. J. Remote Sensing*. 2009. V. 30. P. 4401–4425.
9. *Mishra D. R., Ogashawara I., Gitelson A. A.* Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters. Elsevier, 2017. 324 p.
10. *Morel A., Prieur L.* Analysis of variations in ocean color // *Limnology and Oceanography*. 1977. V. 22. P. 709–722.
11. *Odermatt D., Gitelson A., Brando V. E., Schaepman M.* Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 118. P. 116–126.
12. *Paavel B., Kangro K., Arst H., Reinart A., Kutser T., Noges T.* Parameterization of chlorophyll-specific phytoplankton absorption coefficients for productive lake waters // *J. Limnology*. 2016. V. 75. No. 3. P. 423–438.
13. *Pope R. M., Fry E. S.* Absorption spectrum 380–700 nm of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Applied Optics*. 1997. V. 36. No. 33. P. 8710–8723.
14. *Stæhr P. A., Markager S.* Parameterization of the chlorophyll-a specific in vivo light absorption coefficient covering estuarine, coastal and oceanic waters // *Intern. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25. No. 22. P. 5117–5130.

Regional bio-optical algorithm for Gorky Reservoir: first results

E. N. Korchemkina¹, A. A. Molkov²

¹ Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mail: korchemkina@mhi-ras.ru

² Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: a.molkov@inbox.ru

Determination of natural impurities concentrations in freshwater from satellite data requires solving a number of problems, one of which is the creation of a regional bio-optical algorithm. Such research is active for open seas and oceans, as well as for coastal marine areas. In this paper, we propose to adapt the existing semi-analytical algorithm for the Black Sea (Lee et al., 2015) to the fresh eutrophic waters of the Gorky Reservoir. The algorithm uses spectral reflectance data and allows calculating the concentrations of optically significant impurities (chlorophyll *a*, dissolved organic matter and mineral suspension).

The results of adaptation of optical models for absorption by nonliving organics and phytoplankton pigments to bio-optical features of the investigated reservoir are presented. For this purpose, the data of field observations and literature sources were used. On their basis, the spectral features of absorption and spectral ranges with dominant optical properties of each water component were obtained. This approach allowed achieving positive results in terms of speed and accuracy.

Approbation of the algorithm and verification of the results were performed using in situ measurements of spectral reflectance coefficient of water column and the results of a laboratory analysis of water samples for the content of optically active impurities.

Keywords: Gorky Reservoir, eutrophic reservoirs, water reflectance coefficient, bio-optical model, regional semi-analytical algorithm, chlorophyll *a*, mineral suspension, DOM

Accepted: 29.01.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-184-192

References

1. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Sheberstov S. V., Razrabotka i ispol'zovaniye regional'nykh algoritmov dlya rascheta bioopticheskikh kharakteristik morey Rossii po dannym sputnikovyykh skanerov tsвета (Development and use of regional algorithms for calculating the bio-optical characteristics of Russian seas from satellite color data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 2, pp. 99–105.
2. Korchemkina E. N., Lee M. E., Anomal'nye opticheskie kharakteristiki pribrezhnykh vod Chernogo morya v iyule 2012 g. i ikh svyaz' s kontsentratsiei mineral'noi 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.
3. Lavrova O. Yu., Solov'ev D. M., Strochkov A. Ya., Shendrik B. D., Sputnikovyy monitoring intensivnogo tsveteniya vodoroslei v Rybinskom vodokhranilishche (Satellite monitoring of intensive algae blooms in the Rybinsk Reservoir), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 54–72.
4. Lee M. E., Martynov O. V., Izmeritel' koeffitsiyentov yarkosti dlya podsputnikovykh izmerenii bioopticheskikh parametrov vod (Reflectance meter for sub-satellite measurements of bio-optical parameters of water), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoye ispol'zovanie resursov shel'fa*, Sevastopol: MHI NASU, 2000, pp. 163–173.
5. Lee M. E., Shybanov E. B., Korchemkina E. N., Martynov O. V., Opredelenie kontsentratsii primesei v morskoi vode po spektru yarkosti voskhodyashchego izlucheniya (Determination of the concentration of impurities in sea water from the spectrum of downwelling radiation), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2015, No. 6, pp. 17–33.
6. Man'kovsky B. I., *Osnovy optiki okeana* (Fundamentals of ocean optics), Sevastopol: MHI NASU, 1996, 119 p.

7. Shybanov E. B., Chislennyi metod resheniya uravneniya perenosy. Koeffitsienty otrazheniya i propuskaniya opticheski tonkogo ploskoparallel'nogo sloya (A numerical method for solving the radiation transport equation. Reflection and transmission coefficients of an optically thin plane-parallel layer), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2005, No. 3, pp. 62–71.
8. Kutser T., Passive optical remote sensing of cyanobacteria and other intense phytoplankton blooms in coastal and inland waters, *Int. J. Remote Sens.*, 2009, Vol. 30, pp. 4401–4425.
9. Mishra D. R., Ogashawara I., Gitelson A. A., *Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters*, Elsevier, 2017, 324 p.
10. Morel A., Prieur L., Analysis of variations in ocean color, *Limnol. Oceanogr.*, 1977, Vol. 22, pp. 709–722.
11. Odermatt D., Gitelson A., Brando V. E., Schaepman M., Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 118, pp. 116–126.
12. Paavel B., Kangro K., Arst H., Reinart A., Kutser T., Noges T., Parameterization of chlorophyll-specific phytoplankton absorption coefficients for productive lake waters, *J. Limnol.*, 2016, Vol. 75, No. 3, pp. 423–438.
13. Pope R. M., Fry E. S., Absorption spectrum 380–700 nm of pure water. II. Integrating cavity measurements, *Appl. Opt.*, 1997, Vol. 36, No. 33, pp. 8710–8723.
14. Stæhr P. A., Markager S., Parameterization of the chlorophyll-a specific in vivo light absorption coefficient covering estuarine, coastal and oceanic waters, *Int. J. Remote Sens.*, 2004, Vol. 25, No. 22, pp. 5117–5130.