



УДК 535.3+556.044

ОСОБЕННОСТИ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ХЛОРОФИЛЛА А В ЭВТРОФНЫХ ВОДОЕМАХ НА ПРИМЕРЕ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Мольков Александр Андреевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник отдела радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН, старший научный сотрудник кафедры ГТК и ЭБС ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

Федоров Сергей Вячеславович, к.т.н., старший научный сотрудник отдела дистанционных методов исследования

Морской гидрофизический институт

299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2,

Пелевин Вадим Вадимович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36

Работа выполнена при поддержке гранта РГО (проект № 07/2020-Р), госзадания №0035-2019-0006 и Минобрнауки РФ (тема №0149-2019-0003 и Соглашение 14.W03.31-0006).

Аннотация. Представленная работа освещает основные трудности создания региональных алгоритмов восстановления концентраций оптически активных компонентов воды (в частности, хлорофилла а) по спутниковым изображениям применительно к внутренним эвтрофным водоемам со значительной пространственно-временной неоднородностью оптических свойств воды и пути их решения на примере Горьковского водохранилища.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковый мониторинг, цвет моря, региональный алгоритм, атмосферная коррекция, хлорофилла а, Горьковское водохранилище.

Введение

Спутниковый мониторинг водоемов различных типов и масштабов является сегодня самым востребованным и динамически развивающимся инструментом дистанционного зондирования [1]. Оптические сенсоры космического базирования обеспечивают научное сообщество информацией, приемлемой по качеству, наполнению и

регулярности. Вместе с тем, современные сенсоры, такие как Sentinel-2/MSI и Sentinel-3/OLCI, имеют пространственное разрешение, вполне пригодное для мониторинга небольших, но экологически и экономически важных внутренних водоемов. В связи с этим, в литературе отмечается все большее количество публикаций, предлагающих региональные алгоритмы восстановления концентраций оптически активных компонентов (ОАК) вод по спутниковым изображениям этих водоемов (см., например, [2] и процитированную литературу). Вместе с тем, есть и определенные трудности, осложняющие их разработку по сравнению с алгоритмами для открытых районов морей и океанов. Рассмотрению этих трудностей и путей их решения на примере озерной части Горьковского водохранилища (далее Горьковского водохранилища) посвящена настоящая работа.

Объект исследований

Горьковское водохранилище – эвтрофный водоем, воды которого по гидрооптической классификации относятся к оптически сложным водам или водам второго типа [3], поскольку их цвет определяется содержанием трех оптически активных компонентов: фитопланктона, окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) и взвеси. Изменения состава компонентов и соотношения между их концентрациями приводят к значительному изменению цвета воды. Анализ данных 2018 года, когда натурные измерения проводились в течение всего теплого сезона, с мая по октябрь, позволил провести условное разделение гидрооптического режима водохранилища на два этапа: весенний и летне-осенний. Весенний этап наблюдался до середины июня и характеризовался паводковыми водами с высоким содержанием минеральной взвеси и значительными концентрациями диатомовых водорослей, что придавало воде светло-коричневатую или сероватую окраску (рис. 1, слева). Летне-осенний этап имел место с середины июня до октября включительно и отличался низким содержанием минеральной взвеси и высокими концентрациями доминантных сине-зеленых водорослей [4]. Цвет воды в это время варьировался между темно коричневым (в июне) за счет высокого содержания ОРОВ и зеленым в областях интенсивного цветения водорослей в августе-сентябре (рис. 1, справа). Из представленного рисунка, нетрудно видеть, что такие области существенно неоднородны в пространстве и во многом определяются гидрологическими особенностями водоема (наличием глубоководного проточного русла и мелководных застойных пойм, выносом взвеси впадающими реками, расходом воды через ГЭС и др.) и метеорологическими факторами (в первую очередь, ветровым форсингом). Согласно [5] расход воды через дамбу оказывает значительное влияние на структуру течения. Так при расходе $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ среднее стоковое течение вдоль русла Волги имеет скорость порядка 3-6 см/с, а в местах сужения водохранилища наблюдается скорости потока до 10-15 см/с. При расходе $1300 \text{ м}^3/\text{с}$ скорость потока значительно возрастает, достигая скоростей 25 см/с перед дамбой. Указанные расходы воды являются типичными для лета, но могут возрасти в несколько раз после интенсивных дождей, еще более значительно меняя структуру течений в водохранилище и формируя пространственно неоднородные распределения фитопланктона и взвеси. Значительное влияние на перераспределение фитопланктона оказывает и ветровой форсинг, затрагивающий, в том числе, и мелководные слабопроточные районы с хорошо прогретой водой и интенсивным цветением фитопланктона.

Резюмируя изложенное выше, становится очевидным, что для корректной интерпретации спутниковых данных о цвете воды Горьковского водохранилища и восстановления ОАК, требуется создание особых алгоритмов ассимиляции спутниковых данных, учитывающих пространственно-временные особенности водоема и атмосферы над ним. Важно отметить, что для внутренних водоемов, наиболее “рентабельными” по трудозатратам являются эмпирические региональные алгоритмы, устанавливающие связь между комбинациями яркости воды на разных длинах волн с концентрацией ОАК. Создание таких алгоритмов невозможно без выполнения подспутниковых судовых

измерений указанных характеристик воды, а в идеальном случае должно включать и синхронные измерения параметров атмосферы.

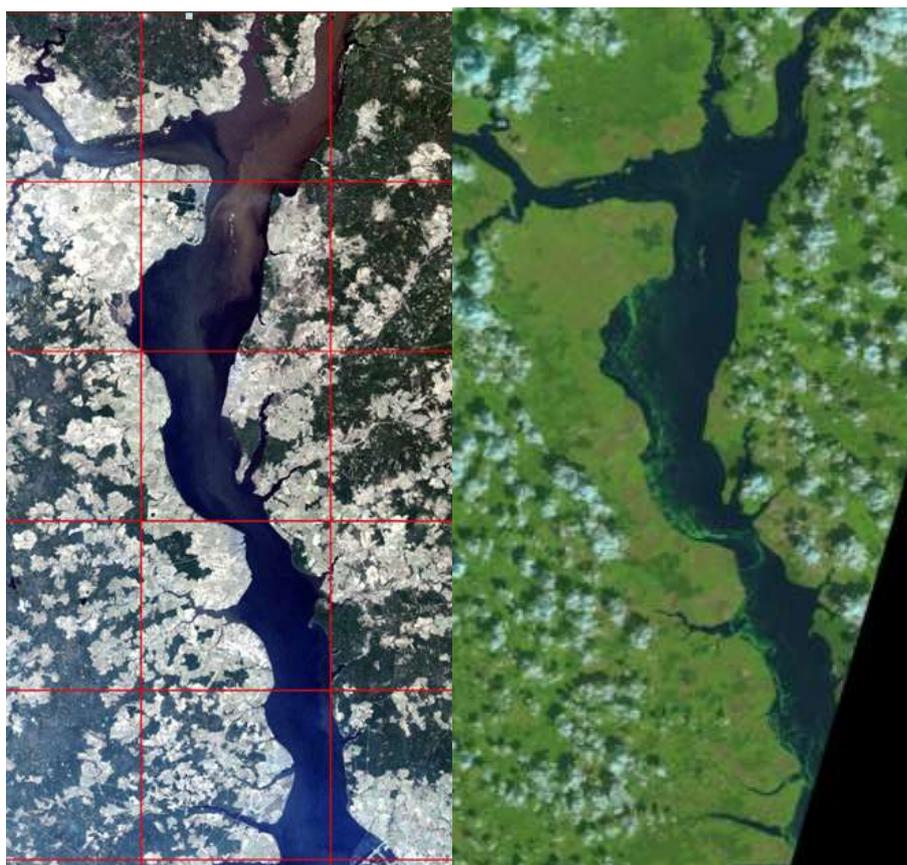


Рис.1. RGB- изображения озерной части Горьковского водохранилища: Sentinel-2 от 09.05.16 (слева) и Landsat-7 от 24.07.16 (справа)

Методика подспутниковых измерений

Ввиду отсутствия общепризнанных нормативных документов, регламентирующих методику выполнения подспутниковых измерений на внутренних водоемах, последние проводятся в соответствие с протоколами NASA [6]. Эти протоколы разработаны для открытых районов морей и океанов, и определяют методику отбора и анализа проб воды для восстановления концентраций ОАК, а также методику выполнения спектрофотометрических измерений (спектральной яркости воды) на станциях. Эти методики применимы для разных водоемов, однако возникают вопросы к условиям их применения. Так, для эвтрофных водоемов ввиду резкой пространственно-временной изменчивости оптических свойств воды остается открытым ряд важных вопросов: выбор глубины отбора проб воды (поверхность или слой), допустимое время расхождения между спутниковой съемкой и подспутниковыми измерениями (по NASA – ± 3 часа от момента спутниковой съемки), оптимальность выбора спутникового сенсора для регулярного мониторинга водоема, исходя из его технических характеристик и периодичности съемки, обоснование экстраполяции результатов измерений на удаленные районы водоема и др. Наиболее подробный ответ на некоторые из этих вопросов дан в работе [7] на примере продолжительных стационарных измерений на озерах олиготрофного и эвтрофного типов. Более узкие, качественные, оценки, но применительно к Горьковскому водохранилищу, предложены в [8]. Согласно им, для типичной скорости потока 3 см/с допустимое время расходимости должно определяться десятком минут, 3 и 5 часами в случае использования спутниковых изображений высокого (Sentinel-2/MSI), среднего (Sentinel-3/OLCI) и

низкого (MODIS) разрешения, соответственно. В случае сонаправленного с течением ветра или при больших расходах воды через ГЭС указанные временные интервалы будут многократно сокращаться. В этом случае традиционные стационарные измерения теряют смысл. Альтернативными вариантами могут служить подспутниковые измерения, выполняемые непрерывно по ходу следования судна с помощью проточных флуориметров или флуоресцентных лидаров, предварительно откалиброванных по достаточному массиву точек пробоотбора, в свою очередь, проанализированных лабораторными стандартизированными методами. Так исследования с привлечением проточного флуориметра с борта водоизмещающего научно-исследовательского судна в эстуариях рек Обь и Енисей освещены, например, в работе [9]. А наиболее значимые результаты практического применения лидарных измерений с борта скоростной моторной яхты для разработки регионального алгоритма по восстановлению основного пигмента водорослей, а именно хлорофилла-а, подсенсор высокого разрешения Sentinel-2/MSI представлены в работе [10]. В последней работе в течение одного подспутникового измерения удалось собрать массив данных в тысячи раз превосходящий объемы стационарных измерений. При этом одна часть массива была использована для разработки региональных алгоритмов, а вторая - для их валидации, что позволило получить статистически обоснованный результат, так как измерения проводились квазинепрерывно с частотой 2 Гц. Здесь стоит отметить, что в отличие от стационарных измерений такой результат достижим даже в случае разрывной облачности, поскольку часть трека гарантированно окажется все зоны облачности на спутниковом снимке, в то время как единичные станции могут оказаться под облаком или в области тени, что исключит их применимость при решении обратных задач.

Спутниковые сенсоры

Согласно [11], среди спутников, наиболее подходящих для дистанционного мониторинга внутренних водоемов выделяют Sentinel-2 и Sentinel-3, поскольку упоминаемый выше спутник MODIS не обеспечивает достаточного разрешения (1000 м) при работе с малыми водоемами, а спутники Landsat-7,8 имеют низкую периодичность съемки (16 суток).

Два спутника Sentinel-2A/2B, запущенные в 2015 и 2017 годах, задумывались для глобального мониторинга суши. Однако, публикуемые в последние годы работы, успешно демонстрируют возможности их практического использования для оценки качества вод внутренних водоемов. Оптические сенсоры MultiSpectral Instrument (MSI), установленные на спутниках Sentinel-2, выполняют измерения яркости воды в 13 спектральных каналах в диапазоне длин волн 443-2190 нм с радиометрическим разрешением 12 бити повторяемостью при съемке двумя спутниками примерно 5 дней. Четыре канала в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне имеют пространственное разрешение 10 м, шесть каналов на границе красного и SWIR диапазонов — 20 м, и три канала для атмосферной коррекции и картирования облачности — 60 м. По причине столь высокого разрешения спутники Sentinel-2 представляют собой перспективный инструмент для исследования водоемов небольших размеров с неоднородными оптическими свойствами.

Спутники Sentinel-3A/3B изначально задумывались для мониторинга водоемов. Сенсоры Ocean and Land Color Instruments (OLCI), установленные на их борту, имеют большее количество спектральных каналов (21), соответствующих спектральным линиям оптически активных компонентов (например, линии поглощения хлорофилла *a* на 660 нм), но уступают по пространственному разрешению (300 м). Принимая во внимание то, что спутники Sentinel-3A/3B функционирует с 2016 и 2018 годов, в литературе встречается не так много работ, посвященных исследованию реальных его возможностей для оценки мониторинга качества вод внутренних водоемов (смотри, например, [11-15]).

Влияние атмосферы

Независимо от выбора спутника особую роль в обработке спутниковых изображений занимает атмосферная коррекция (АК), призванная исключить из полного сигнала, принимаемого оптическим сенсором, сигнал, связанный с влиянием атмосферы, тем самым выделив полезный сигнал от водной толщи. В чистых водах, последний не превосходит 7% от полного сигнала в синей области спектра и 1-2% в зеленой и красной областях, т.е. очень мал. Для вод открытых районов океанов и морей, потребитель спутниковой информации может воспользоваться данными второго уровня, прошедшими атмосферную коррекцию по стандартным алгоритмам. Для внутренних водоемов такой подход не возможен в виду уникальности гидрооптического режима каждого исследуемого водоема и, возможно, атмосферы над ним. Это, в свою очередь, требует разработки региональных алгоритмов атмосферной коррекции. Такие работы на основе данных Sentinel-2/MSI были проведены в целом ряде исследований для разных вод. Среди них можно отметить исследования [16-18], выполненные для вод озер Амазонки и Германии. Аналогичные исследования с использованием данных Sentinel-3/OLCI в настоящий момент представлены единичными работами, например, [19].

Используя данные собственных судовых высокоразрешающих измерений коэффициента яркости воды (т.е. той характеристики, которую выделяют по спутниковым изображениям после атмосферной коррекции), и концентраций хлорофилла *a*, мы установили, что все стандартные алгоритмы АК недооценивают яркость воды в ближнем ИК, переоценивая вклад атмосферы. Это происходит по причине того, что районы с интенсивным цветением цианобактерий воспринимаются стандартными алгоритмами за рассеяние на атмосферном аэрозоле. В результате коэффициент яркости воды восстанавливается заниженным или даже отрицательным во всем видимом диапазоне и дальнейшее восстановление концентраций ОАК оказывается невозможным. Обойти эту ситуацию оказалось возможным за счет применения алгоритма атмосферной коррекции с фиксированной аэрозольной оптической толщиной (АОТ), постоянной в пределах рабочего полигона (подобно [20]). Предложенный алгоритм АК [8] позволил достаточно точно восстановить спектры коэффициента яркости в широком диапазоне вариаций хлорофилла *a* (16-135 мг/м³) с коэффициентом детерминации, близким к 1 практически во всех спектральных каналах. Несмотря на то, что допущение о постоянстве оптических свойств аэрозоля является достаточно условным, возможные источники ошибок, связанные с этим допущением оказались малы по сравнению с ошибками при определении свойств аэрозоля и восходящего из воды излучения в ближних ИК каналах по стандартной методике.

Региональные алгоритмы

В зависимости от доминирования тех или иных оптически активных компонентов воды, исследователи используют разные алгоритмы для связи индекса яркости (комбинации коэффициентов яркости в спектральных каналах) с концентрациями доминантных ОАК. Применительно к Горьковскому водохранилищу, наилучшие результаты восстановления хлорофилла *a* (коэффициент детерминации 0.76-0.85) дали двухволновый индекс 2В и Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI). Несмотря на это, описать с высокой точностью изменение концентрации хлорофилла *a* в широком диапазоне значений с помощью одной регрессионной зависимости оказалось сложным, т.к. с увеличением концентрации изменения таких зависимостей происходят по разным законам: до 40 мг/м³ калибровочные точки расположены достаточно близко относительно регрессионных кривых, от 40 до 60 мг/м³ значения распределяются практически прямолинейно под углом около 45 градусов, а после 60 мг/м³ зависимость хлорофилла *a* от индекса цвета становится близкой к экспоненциальной. Такое распределение может свидетельствовать о большой вариативности оптических свойств в Горьковском водохранилище в условиях интенсивного цветения цианобактерий. Поэтому использование одного алгоритма может быть источником значительных ошибок при определении концентрации хлорофилла *a*. Возможным путем развития может быть

разработка кусочно-заданного алгоритма, учитывающего изменчивость оптических свойств воды в широком диапазоне значений.

В качестве демонстрации успешного выполнения изложенных выше шагов, на рис. 2,3 приведены карты распределения концентраций хлорофилла *a* (верхний ряд) по спутниковым изображениям Sentinel-2/MSI и Sentinel-3/OLCI (нижний ряд), различающимся в 1 сутки.



Рис.2. RGB-изображения озерной части Горьковского водохранилища: Sentinel-2/MSI от 21.09.2018 (а) и Sentinel-3/OLCI от 22.09.2018 (б)

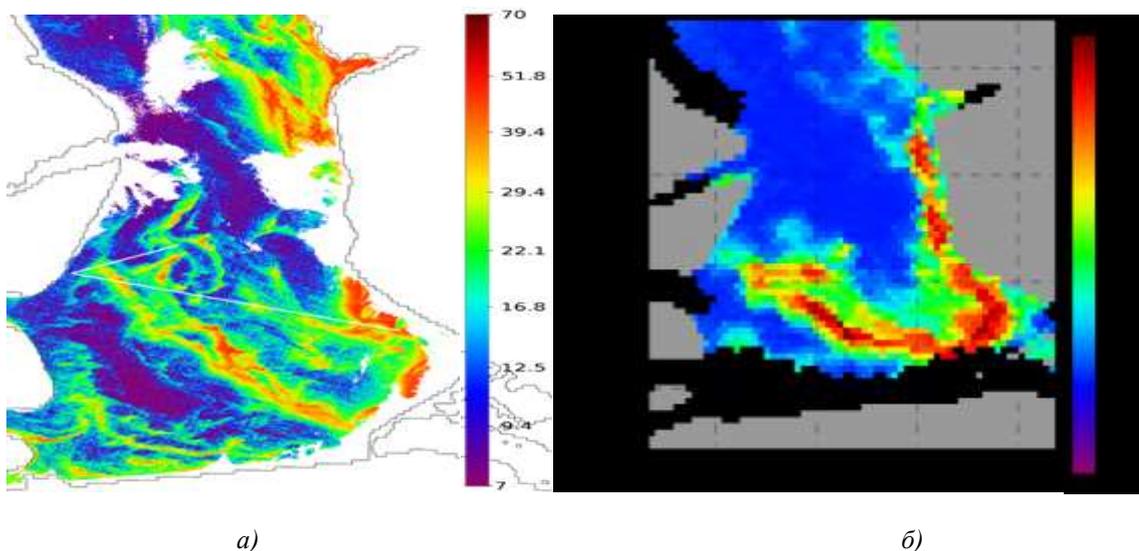


Рис.3. Карты концентрации хлорофилла *a* ($\text{мг}/\text{м}^3$), восстановленные по изображениям Sentinel-2/MSI от 21.09.2018 (а) и Sentinel-3/OLCI от 22.09.2018 (б).

Выводы

В работе рассмотрены основные трудности создания спутниковых региональных алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла *a* в эвтрофных водоемах со значительной пространственно-временной изменчивостью оптических свойств воды в период интенсивного цветения цианобактерий на примере Горьковского водохранилища. Эта изменчивость оказывает значительное влияние не только на выбор методики и инструментов проведения подспутниковых измерений, но и сводит на нет применимость стандартных алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых данных. Предложенный подход разрешения этой проблемы позволил достаточно точно восстановить спектры коэффициента яркости в широком диапазоне вариаций хлорофилла *a* ($16\text{-}135 \text{ мг}/\text{м}^3$) с коэффициентом детерминации, близким к 1 практически во всех спектральных каналах, и, как результат, предложить соответствующие алгоритмы восстановления концентраций

хлорофилла *a* по спутниковым изображениям высокого и среднего разрешения (Sentinel-2/MSI и Sentinel-3/OLCI). Предложенные сегодня алгоритмы статистически обоснованы и применимы в период интенсивного цветения сине-зеленых водорослей для южной части Горьковского водохранилища, где осуществлялись подспутниковые измерения. Тем не менее, предварительные оценки показали, что применение этих алгоритмов даже для северной части водохранилища приводит к неверным результатам по причине иного гидрооптического режима и, вероятно, иных характеристик атмосферы. Поэтому для создания полноценных валидированных региональных алгоритмов восстановления концентраций оптически активных компонентов воды требуется не только выполнение судовых подспутниковых измерений в течение всего сезона и на масштабах всего исследуемого водоема, но и синхронные с ними измерения оптических характеристик атмосферы.

Список литературы:

1. Palmer S.C.J., Kutser T., Hunter P.D. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions// *Remote Sens. Environ.* – 2015. –V. 157.– P. 1–8.
2. Pahlevan N., Smith B., Schalles J., Binding C., Cao Z., Ma R., Alikas K., Kangro K., Gurlin D., Nguyễn Hà, N., et al. Seamless retrievals of chlorophyll- a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach // *Remote Sens. Environ.* – 2020. – V. 240.– P. 111604.
3. Wozniak B., Dera J. Light Absorption in Sea Water // *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library: Springer.* – 2007. – V.33. – 454 p.
4. Мольков А.А., Корчёмкина Е.Н., Лещев Г.В., Даниличева О.А., Капустин И.А. О влиянии цианобактерий, волнения и дна на коэффициент яркости воды Горьковского водохранилища // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2019. – Т. 16. – №. 4. – С. 203–212.
5. Капустин И.А., Мольков А.А. Структура течений и глубины в озерной части Горьковского водохранилища // *Метеорология и гидрология.* – 2019. – №. 7. – С.110-117.
6. Mueller J. L., Pietras C., Hooker S. B., Austin R.W., Miller M., Knobelspiesse K. D., Frouin R., Holben B., Voss K. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume II: Instrument Specifications, Characterization and Calibration // *Greenbelt, MD. Goddard Space Flight Space Center, (NASA/TM-2003-21621/Rev-Vol II).* – 2003.– P. 1-56.
7. Hansen C.H., Burian S.J., Dennison P.E., Williams G.P. Spatiotemporal Variability of LakeWater Quality in the Context of Remote Sensing Models // *Remote Sens.*– 2017. –V. 9. – P. 409.
8. Molkov A.A., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. Approach of non-station-based in situ measurements for high resolution satellite remote sensing of productive and highly changeable inland waters // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* – 2020. – Т.13.– №. 2. – С. 60-68.
9. Глуховец Д.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Салинг И.В. Биооптические характеристики Арктических морей России // *ТрудыVIII Международной конференции “Современные проблемы оптики естественных вод”* – 2019. – С.25-30.
10. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. On Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery // *Remote Sens.*– 2019. – V. 10.– №. 11. – P.1215-1241.
11. Soomets T., Uudeberg K., Jakovels D., Zagars M., Reinart A., Brauns A., Kutser T. Comparison of Lake Optical Water Types Derived from Sentinel-2 and Sentinel-3 // *Remote Sens.* – 2019. – V. 11. –P. 2883.
12. Alikas K., Anskol, Vabson V., Anspers A., Kangro K., Uudeberg K., Ligi M. Consistency of Radiometric Satellite Data over Lakes and Coastal Waters with Local Field Measurements// *Remote Sens.* – 2020. – V. 12. –P. 616.

13. Toming K., Kutser T., Uiboupin R., Arikas A., Vahter K., Paavel B. Mapping Water Quality Parameters with Sentinel-3 Ocean and Land Colour Instrument imagery in the Baltic Sea// Remote Sens. – 2017. – V. 9. – P. 1070.
14. Kravitz J., Matthews M., Bernard S., Griffith D. Application of Sentinel 3 OLCI for chl-a retrieval over small inland water targets: Successes and challenges// Remote Sens. Environ. – 2020. – V. 237. – P. 111562.
15. Blix K., Pálffy K., Tóth V., Eltoft T. Remote Sensing of Water Quality Parameters over Lake Balaton by Using Sentinel-3 OLCI // Water. – 2018. – V. 10. –P. 1428.
16. Pahlevan N., Sarkar S., Franz B.A., Balasubramanian S.V., He J. Sentinel-2 multispectral instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: demonstrations and validations // Remote Sens. Environ. – 2017. – V. 201. – P. 47–56.
17. Martins V.S., Barbosa C.C.F., de Carvalho L.A.S., Jorge D.S.F., Lobo F.d.L., Novo E.M.L. Assessment of atmospheric correction methods for sentinel-2 MSI images applied to amazon floodplain lakes // Remote Sens. – 2017.– V. 9.– P. 322.
18. Dörnhöfer K., Göritz A., Gege P., Pflug B., Oppelt N. Water constituents and water depth retrieval from Sentinel-2a– a first evaluation in an oligotrophic lake // Remote Sens. – 2016. – V. 8. –P. 941.
19. Mognane M.A., Jamet C., Loisel H., Vantrepotte V., Mériaux X., Cauvin A. Evaluation of Five Atmospheric Correction Algorithms over French Optically-Complex Waters for the Sentinel-3A OLCI Ocean Color Sensor // Remote Sens. – 2019. – V. 11. – P. 668.
20. Anspaer A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes // Remote Sens. – 2019.– V. 11. – P. 64.

SPECIFIC FEATURES OF SATELLITE MONITORING OF CHLOROPHYLL A IN EUTROPHIC INLAND WATERS ON EXAMPLE OF GORKY RESERVOIR

Aleksandr A. Molkov, Sergey V. Fedorov, Vadim V. Pelevin

Abstract. The presented paper highlights the main difficulties in creating regional algorithms for water constituent retrieval (in particular, chlorophyll a) by satellite images of internal eutrophic waters with significant spatio-temporal inhomogeneity of the water optical properties on the example of the Gorky Reservoir.

Keywords: remote sensing, satellite, ocean color, regional algorithm, atmospheric correction, chlorophyll a, Gorky Reservoir