

Биооптические алгоритмы для восстановления концентрации хлорофилла *a* в Волгоградском водохранилище по данным снимков Sentinel-3 OLCI

С. В. Федоров^{1,2}, А. А. Мольков^{1,3,4}, И. А. Капустин^{1,3,4}, А. В. Ермошкин^{1,3},
Г. В. Лещев^{1,3}, Д. В. Доброхотова^{1,3}, Е. С. Кольцова¹, Б. В. Коновалов^{1,5},
А. М. Чушнякова^{1,5}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
Нижегород, 603022, Россия
E-mail: molkov@ipfran.ru

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия

³ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия

⁴ Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, 603950, Россия

⁵ Институт океанологии им. П. П. Shirshova РАН, Москва, 117997, Россия

Внутренние водоёмы, включая водохранилища, представляют собой оптически сложные среды, для которых стандартные спутниковые алгоритмы оценки концентрации хлорофилла *a* оказываются малоприменимыми без адаптации и валидации. В настоящей работе реализован полный цикл анализа: от натурных измерений и валидации различных алгоритмов атмосферной коррекции до калибровки биооптических алгоритмов, адаптированных к условиям одного из волжских водохранилищ, а именно Волгоградского. В 2024 г. на этом водоёме были проведены две экспедиции с целью сбора натурных данных, включая измерения спектральных коэффициентов яркости воды, содержания хлорофилла *a* и прозрачности атмосферы. Обнаружена значительная пространственно-временная изменчивость оптических свойств вод, что отражается в спектрах коэффициента яркости водной толщи и концентрации оптически активных компонентов воды. Валидация атмосферной коррекции снимков Sentinel-3 OLCI (англ. Ocean and Land Colour Instrument) показала достаточно высокую точность спутниковых коэффициентов яркости, коэффициент корреляции составил 0,9–1 для большинства спектральных каналов. Некоторое ухудшение точности наблюдалось в синей области спектра — коэффициент корреляции примерно 0,7. Сравнение оценок концентрации хлорофилла *a* по алгоритму NASA (англ. National Aeronautics and Space Administration) OC4 (англ. Ocean Color) с измерениями данного параметра показало их невысокую точность. Предложены двухканальные алгоритмы для восстановления концентрации хлорофилла *a*, для которых коэффициент детерминации составляет 0,7–0,8.

Ключевые слова: Волгоградское водохранилище, натурные измерения, атмосферная коррекция, Sentinel-3 OLCI, биооптические алгоритмы, концентрация хлорофилла *a*

Одобрена к печати: 29.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-38-50

Введение

До недавнего времени пространственно-временное разрешение спутниковых сканеров цвета океана в основном позволяло проводить исследования для больших водных объектов. Появление таких оптических сканеров высокого разрешения, как Landsat-8, -9 OLI (англ. Operational Land Imager) и Sentinel-2 MSI (англ. Multispectral Instrument), а также радиометра среднего разрешения Sentinel-3 OLCI (англ. Ocean and Land Colour Instrument), дало толчок к изучению более мелких, но не менее важных водных объектов — внутренних пресноводных водоёмов (Binding et al., 2021; Chen et al., 2017; Le et al., 2009; Pahlevan et al., 2021; Xue et al., 2019). Однако внимание уделяется в основном крупным объектам, в то время как исследованиям рек и водохранилищ посвящено мало работ, несмотря на то что они также являются

важными источниками питьевой воды, объектами рекреации, рыболовства, ирригации, судоходными каналами.

На территории России расположены десятки крупных рек протяжённостью более 1000 км. Вдоль них сконцентрировано множество крупных городов и небольших населённых пунктов. Для снабжения населения водой и электроэнергией, а также для обеспечения судоходства на них сооружены комплексные гидротехнические сооружения, оказывающие значительное влияние на гидрологию и качество вод. На р. Волге расположен каскад из девяти водохранилищ, общая площадь которых превышает 20 тыс. км². Водоохранилища играют ключевую роль в обеспечении региона водой и энергией, каждое из них уникально по своему гидрологическому режиму и гидрооптическим свойствам. Учитывая эти особенности, а также значительную удалённость водохранилищ друг от друга, для изучения их современного состояния требуется развитие обширной наблюдательной сети и использование возможностей спутниковых методов исследований.

Гидрооптические и гидрохимические исследования на р. Волге выполняются как в рамках Государственной наблюдательной сети Росгидромета, так и независимыми организациями в различных районах реки (Минеева и др., 2020, 2022; Смирнова и др., 2017; Черногаева и др., 2023). Авторами отмечается неудовлетворительное качество вод во всех водохранилищах и дальнейшее его ухудшение, связанное с ежегодно увеличивающейся антропогенной нагрузкой, а также необходимость проведения мониторинговых мероприятий за текущим состоянием и по контролю сбросов сточных вод. Современные спутниковые сканеры цветности океана имеют достаточно высокое пространственное разрешение для исследований оптических свойств вод даже небольших по ширине рек и водохранилищ, а высокая периодичность съёмки позволяет выполнять не только мониторинг загрязнений, но и изучать пространственные изменения качества вод. Существующие и новые гидрооптические измерения могут быть использованы для получения достоверных оценок о гидрооптических характеристиках вод, о содержании в них основных оптически активных компонентов по спутниковым данным, которые существенно бы дополнили существующие наблюдения.

Проект «Волжские биооптические алгоритмы» (Российский научный фонд, № 23-17-00071) направлен на изучение современного состояния оптико-биологического состояния волжских водохранилищ, и в частности, на разработку и усовершенствование методов судовых измерений биооптических характеристик вод, включая разработку спутниковых алгоритмов для оценки концентрации хлорофилла *a* (Chl-*a*). В настоящей работе приведены результаты гидрооптических измерений, проведённых на Волгоградском вдхр. в 2024 г., результаты валидации атмосферной коррекции (АК) спутниковых снимков Sentinel-3 OLCI, а также полученные алгоритмы для восстановления концентрации хлорофилла *a* в данном водохранилище.

Область и методы исследований

Район измерений

В 2024 г. были проведены две экспедиции на Волгоградском вдхр. Первая экспедиция состоялась в начале лета (29 мая — 7 июня), когда вода была ещё свободна от цветения синезелёных водорослей, вторая — в конце лета (15—23 августа), когда наблюдалось их интенсивное цветение. Район работ включал центральную часть Волгоградского вдхр., а именно 100-км участок от с. Оленье до с. Нижняя Добринка, расположенного напротив крупного притока — р. Еруслан (рис. 1, см. с. 40). Измерения проводились на поперечных и продольных разрезах, охватывая русло, пойму и устья притоков, преимущественно на удалении не менее 100 м от берега, чтобы уменьшить или исключить их влияние на яркость водной поверхности в спутниковых изображениях. Метеоусловия были разнообразны.

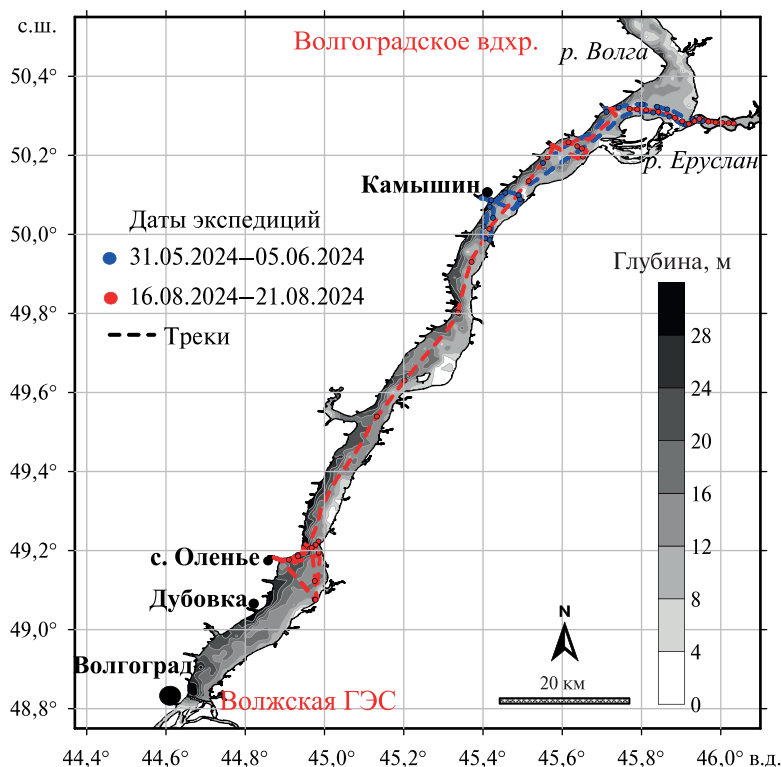


Рис. 1. Районы работ на Волгоградском вдхр. в двух экспедициях в 2024 г.
Точками отмечены станции пробоотбора воды, пунктирами — треки

Методика измерений

Основная цель натурных измерений заключалась в одновременном получении пар «концентрация гидрооптических компонентов – коэффициент яркости воды». Для этого на носу судна был размещён спектрометр Ocean Optics HDX, совмещённый с набором из трёх световодов. Спектрометр находился в герметичном боксе на палубе, а световоды выводились на специально изготовленный держатель выше носовых палубных конструкций (рис. 2). Держатель фиксировался в портативном трёхосевом стабилизаторе DJI Ronin S в наивысшей точке. Первый световод с собирающей линзой с полем зрения 7° был ориентирован вниз под углом 30° от вертикали для измерения восходящей яркости L_w , второй, аналогичный, на зеркальную точку неба — L_{sky} , а третий, оснащённый косинусным корректором, был ориентирован вертикально вверх для измерения нисходящей облучённости E_d .



Рис. 2. Фотография размещения измерительного оборудования на борту судна

Стабилизатор обеспечивал постоянство геометрии наблюдения, позволял установить необходимый азимутальный угол в 110–135° относительно Солнца, согласно Ocean Color Protocols (Mueller et al., 2003), и обеспечивал автоматическую коррекцию угла при изменении курса судна и положения Солнца в течение дня. Управляющая электроника и питание стабилизатора размещались в герметичном боксе на палубе вместе со спектрометром.

Базовый спектрометр, имеющий один выход, был соединён со световодом, измеряющим восходящую от водной поверхности яркость непрерывно с частотой в 2–3 Гц. Измерения яркости неба и освещённости осуществлялись в начале и в конце измерений, а также каждые полчаса для контроля условий освещения. Для этого выход спектрометра механически и последовательно соединялся с двумя оставшимися световодами. Время измерений составляло несколько минут. Полученные значения яркости зеркальной точки неба и освещённости аппроксимировались на весь период измерений в течение дня, что позволило получить данные с той же временной дискретностью, что и выше рассмотренные. Спектральный коэффициент яркости воды для каждого момента времени рассчитывался по известной формуле:

$$R_{sr} = (L_u - r \cdot L_{sky}) / E_d,$$

где r — коэффициент отражения Френеля, определяемый с учётом волнения (Mobley, 1999).

Содержание хлорофилла a регистрировалось синхронно с измерениями цвета воды в точной системе, оснащённой зондом YSI EXO 3. Для пересчёта сигнала флуоресценции в весовую концентрацию на всём маршруте с помощью ведра была отобрана 101 проба воды из верхнего слоя толщиной 0–30 см. Для охвата максимально широкого диапазона вариаций измеряемых характеристик пробы отбирались там, где наблюдались значительные изменения сигналов или визуальные изменения цвета воды. Пробы воды объёмом 1,5 л фильтровались через фильтры Whatman GF/F 0,7 мкм под малым давлением (0,2 бар) в течение 3 ч от момента отбора. Хранение и транспортировка осуществлялись в морозильной камере при температуре –16 °С. Позднее фильтры использовались в лаборатории для определения концентрации хлорофилла a по методике (Коновалов и др., 2014).

По окончании работ все данные проходили фильтрацию, приведение к единому временному разрешению в 1 Гц и привязку к GPS-координатам (*англ.* Global Positioning System) и времени. Соответствующий массив данных впоследствии использовался для сопоставления со спутниковыми данными.

Одновременно с измерениями биооптических характеристик воды каждые 30–60 мин с берега проводились измерения прозрачности атмосферы с помощью солнечного фотометра SPM в 10 спектральных каналах: 339 нм, 373, 439, 499, 673, 871, 939, 1044, 1555 и 2139 нм (Sakerin et al., 2013). Применительно к настоящей работе спектральные измерения использовались для определения аэрозольной оптической толщины AOD(λ) (*англ.* Aerosol Optical Depth) на длине волны λ , необходимой для валидации алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых снимков.

Обработка спутниковых снимков

Для валидации атмосферной коррекции и калибровки биооптических моделей было отобрано семь снимков Sentinel-3 OLCI, совпадающих с датами проведения экспедиций в районе Волгоградского вдхр. Краткая характеристика снимков приведена в *таблице*.

Атмосферная коррекция выполнялась с помощью программы ACOLITE (Vanhellemont, 2020; Vanhellemont, Ruddick, 2021). Применялись два варианта АК: алгоритм DSF (*англ.* dark spectrum fitting) с коррекцией солнечного блика (далее обозначается default); алгоритм DSF с фиксированной оптической толщиной аэрозоля и коррекцией солнечного блика (далее обозначается fixed-aod). В первом алгоритме, являющимся алгоритмом по умолчанию в ACOLITE, аэрозольная составляющая излучения определяется по множеству тёмных пикселей на снимке (Vanhellemont, 2020). Во втором — установление аэрозольной составляющей выполняется на основе измеренной входе экспедиции AOD, считающейся постоян-

ной над областью исследований. Так как неверное определение аэрозольной составляющей становится основным источником ошибок при вычислении спектральных коэффициентов яркости (КЯ) по спутниковым снимкам, использование в атмосферной коррекции измеренных значений AOD, особенно в условиях оптически сложных вод внутренних пресноводных водоёмов, позволяет получать более точные оценки коэффициентов яркости (Molkov et al., 2022).

Снимки Sentinel-3 OLCI, используемые для валидации атмосферной коррекции и калибровки биооптических алгоритмов

Дата съёмки	Расчётный вариант ¹	AOD550 (AOD550 измерения) ²	Валидация АК	Биооптические алгоритмы
31.05.2024	fixed-aod	0,1978 (0,1460)	+	—
03.06.2024	default	0,1722 (0,1489)	+	+
17.08.2024	default	0,1132 (0,0508)	—	+
18.08.2024	fixed-aod	0,1393 (0,0624)	+	+
19.08.2024	fixed-aod	0,2350 (0,0971)	+	—
20.08.2024	default	0,2358 (0,2230)	+	+
21.08.2024	fixed-aod	0,2730 (0,2757)	+	+

¹ Расчётный вариант АК, использовавшийся для валидации спутниковых снимков и калибровки биооптических моделей. default — алгоритм DSF с коррекцией солнечного блика; fixed-aod — алгоритм DSF с коррекцией солнечного блика, в котором расчёт аэрозольной составляющей яркости производится по измеренной AOD.

² AOD550 — оптическая толщина аэрозоля на длине волны 550 нм, полученная в результате атмосферной коррекции. В скобках указана измеренная среднесуточная AOD на 550 нм.

Отбор спутниковых КЯ для валидации АК и калибровки биооптических алгоритмов осуществлялся из пикселей снимка с координатами станции измерений для каждого варианта АК. В условиях неоднородности оптических свойств вод такой подход обеспечивает более высокую точность валидации по сравнению с методикой сравнения со средними значениями в ячейке 5×5 пикселей, охватывающей координату станции, широко распространённой в случаях пространственной однородности оптических свойств вод (Molkov et al., 2022; Vanhellemont, Ruddick, 2021).

Оценка точности АК выполнялась по набору статистических метрик (коэффициенты линейной регрессии, коэффициент корреляции, среднеквадратичное отклонение, смещение) традиционно используемых в подобного рода валидациях и вычисляемых по хорошо известным соотношениям (Müller et al., 2015; Seegers et al., 2018). Вариант АК с более высокими коэффициентом регрессии и коэффициентом корреляции и более низкими среднеквадратичным отклонением и смещением считался более точным и далее использовался для калибровки биооптических алгоритмов. Оптимальные варианты АК для каждого снимка указаны в *таблице*. Кроме того, вычислялся спектральный угол SAM (*англ.* Spectral Angle Mapper), который в отличие от других метрик, оценивающих точность АК на каждом спектральном канале отдельно, оценивает точность восстановления спектра КЯ в целом. Параметр SAM представляет собой угол между двумя векторами, компоненты которых состоят из измеренных и спутниковых КЯ на каждом спектральном канале Sentinel-3 OLCI, и вычисляется по известной формуле линейной алгебры.

В связи с тем, что синхронные измерения спектрометра и зонда YSI EXO 3 было трудно выполнить в течение всех экспедиционных дат, для валидации АК и калибровки биооптических алгоритмов использовались различные спутниковые снимки, в зависимости от наличия измерений соответствующего прибора. Так, для валидации АК использовалось шесть снимков, а для калибровки биооптических алгоритмов — пять (обозначены знаком «плюс» в *таблице*).

Результаты

Результаты валидации атмосферной коррекции

На рис. 3 представлены примеры измеренных и спутниковых спектров КЯ для экспедиций в Волгоградском вдхр. в 2024 г. На них обозначено общее количество спектров (N), отобранных для валидации атмосферной коррекции снимков Sentinel-3 OLCI, а также приведены SAM.

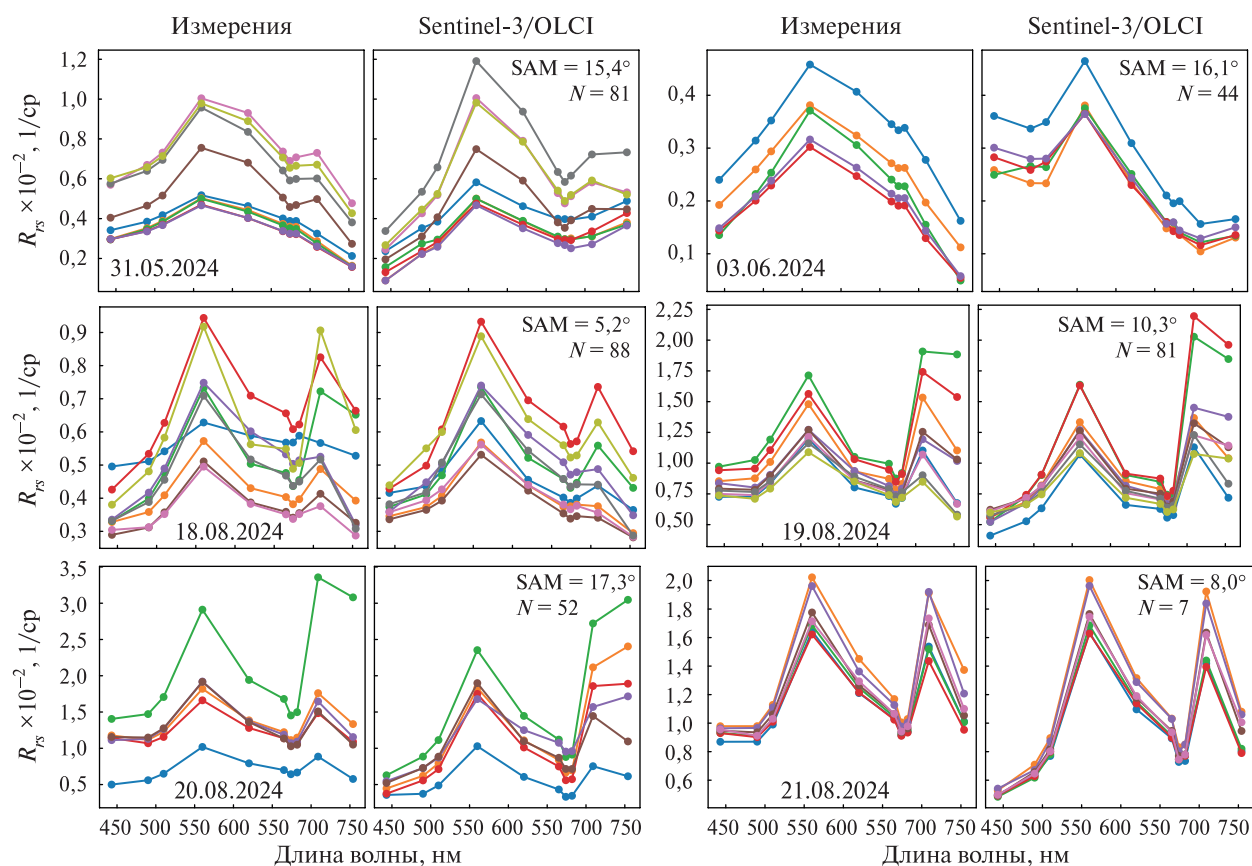


Рис. 3. Измеренные и спутниковые спектральные коэффициенты яркости R_{rs} , полученные в ходе экспедиций в Волгоградском вдхр. в 2024 г.

Во время летней экспедиционной кампании 2024 г. оптические свойства вод в Волгоградском вдхр. изменялись в широком диапазоне (см. рис. 3). В мае – июне (участок водохранилища в районе г. Камышин) преобладали «рассеивающие» воды с преобладанием неорганической взвеси и только вблизи устья р. Еруслан наблюдалось повышенное содержание фитопланктона. Вдали от берегов наблюдалась относительно чистая вода с максимальными значениями КЯ около $0,004 \text{ cp}^{-1}$ на длине волны 560 нм. По мере прогревания воды в августе в составе начинает преобладать фитопланктон на всём протяжении участка водохранилища от г. Дубовка до г. Камышин. Судя по локальным уменьшениям в гиперспектральных измерениях КЯ в районе 615 и 650 нм, соответствующим максимумам поглощения фикоцианина и аллофикоцианина соответственно, можно предположить о доминировании цианобактерий (синезелёных водорослей) и/или красных водорослей в составе фитопланктона. В штиль и маловетренную погоду (скорость ветра до 3 м/с) фитопланктон всплывал и местами начинал образовывать плотные скопления — маты, что заметно по ряду спектров 19–20 августа. По мере увеличения скорости ветра фитопланктон менял свою плавучесть и оказывался в приповерхностном слое, что отразилось на спектрах КЯ с двумя выраженными практически равными по величине максимумами на 560 и 709 нм (21 августа).

Выполненная с помощью ACOLITE атмосферная коррекция позволила с достаточно высокой точностью восстановить R_{rs} по снимкам Sentinel-3 OLCI для всех наблюдаемых ситуаций (рис. 4). Метрики точности заметно варьируются в спектральных каналах спутника и ухудшаются в синих и красных каналах спутникового сканера. В частности, коэффициент линейной корреляции составил 0,73; 0,69; 0,67 (не показано на рис. 4) для каналов на 400, 412 и 443 нм. Спутниковые КЯ на каналах 490 и 754 нм характеризуются более высоким коэффициентом корреляции — около 0,9, но более высокой дисперсией и, соответственно, средней ошибкой. На других каналах точность восстановления КЯ очень высокая — коэффициенты корреляции близки к единице.

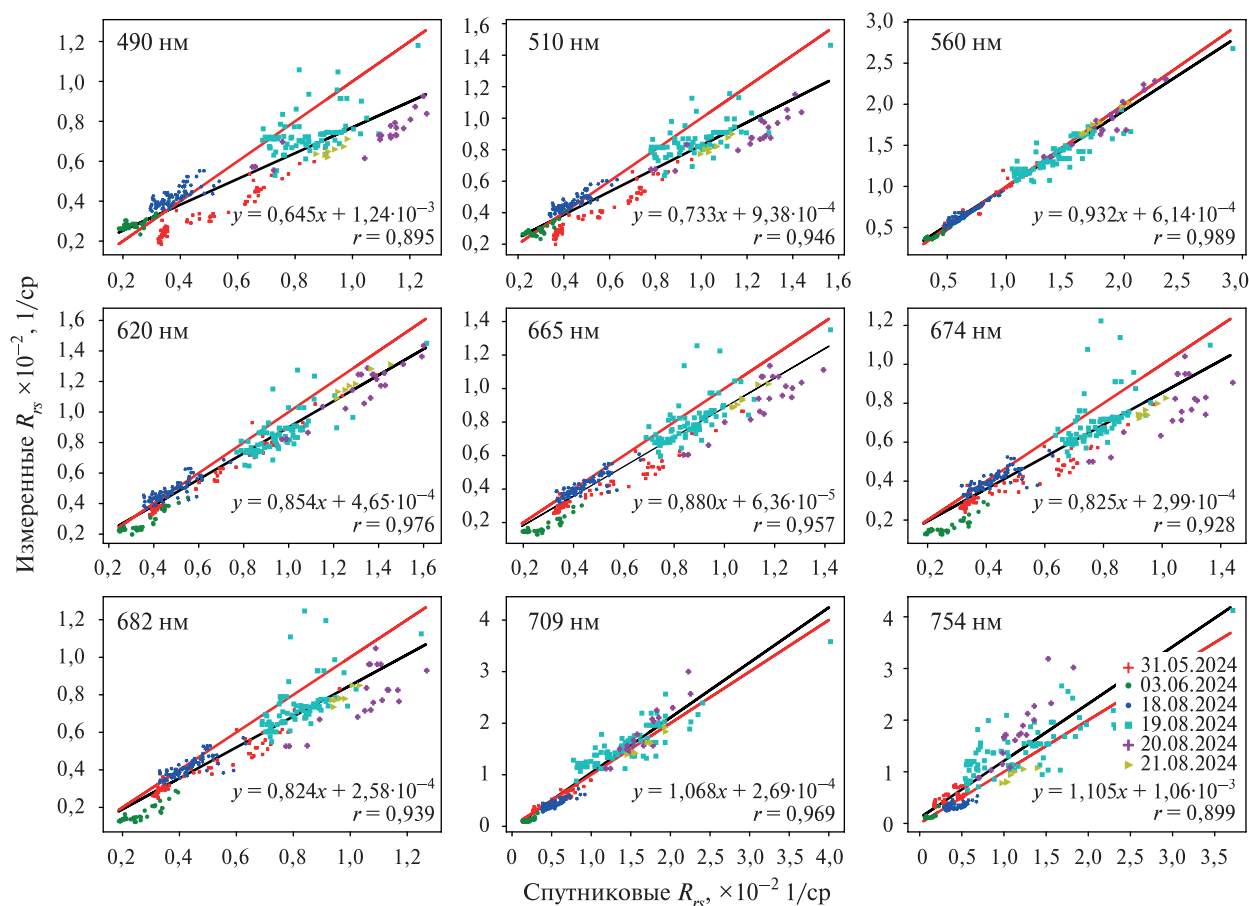


Рис. 4. Диаграммы рассеяния измеренных КЯ от спутниковых КЯ на спектральных каналах Sentinel-3 OLCI. Красная линия — линия равных значений, чёрная — линия регрессии (зд. r — коэффициент корреляции)

Подобная ситуация, когда точность АК ухудшается в синих каналах, характерна для всех алгоритмов АК (Doxani et al., 2018; Hieronymi et al., 2023; Pahlevan et al., 2021). В нашем случае ситуация усугубляется также наличием эффектов смежности, когда отражённое солнечное излучение от растительности, расположенной на берегах, попадает в область зрения оптического сканера спутника. Как отмечается в комплексном исследовании (Pahlevan et al., 2021), данная проблема характерна для всех внутренних водоёмов. Её решение может служить одним из путей дальнейшего развития АК для подобного рода водных объектов. В последних версиях ACOLITE внедрена методика устранения эффектов смежности (Castagna, Vanhellemont, 2025), однако она ограничена углами обзора 15° . Для всех использованных спутниковых снимков зенитный угол сканирования составлял $26\text{--}48^\circ$, что не позволило учесть этот эффект при их обработке и, возможно, получить более точные оценки R_{rs} в синих и красных каналах.

Оценки точности восстановления формы спектра КЯ по SAM (см. рис. 3) оказались самыми высокими для 18, 19 и 21 августа — дни, в которые небо было безоблачным, а скорость ветра не превышала 3–4 м/с. 31 мая и 3 июня наблюдается уменьшение точности вследствие присутствия на снимках солнечного блика, оказывающего на результаты обработки спутниковых снимков большое влияние. Несмотря на то, что радиометр OLCI расположен на подвижной платформе, угол которой регулируется таким образом, чтобы избежать попадания на датчики прямого отражённого солнечного света, а ACOLITE имеет опции коррекции остаточного солнечного блика, полностью устранить этот эффект не всегда получалось, вплоть до признания непригодности снимка для анализа. Восстановленные спектры КЯ 31 мая выглядят немного повёрнутыми против часовой стрелки. Такая форма спектров часто встречается на снимках Sentinel-3 OLCI, подверженных солнечному блику. 3 июня корректировка остаточного солнечного блика привела к занижению КЯ в красном диапазоне.

Ухудшение точности восстановления 20 августа, на наш взгляд, связано с пространственной неоднородностью оптических характеристик вод и их динамикой, характерных для внутренних водоёмов. Вследствие этих факторов измерения и спутниковая съёмка, сделанные даже с разницей в один час, фиксируют существенно отличающиеся по составу воды. В частности, 20 августа спектры (четыре спектра, обозначенные красным, оранжевым, фиолетовым и коричневым цветом) характерны для вод с высокой концентрацией фитопланктона в приповерхностной области в момент измерений, а в момент пролёта спутника в тех же координатах наблюдаются спектры, характерные для плавающих водорослей.

В целом, несмотря на описанные отличия, результаты АК продемонстрировали достаточно высокую точность и наличие линейной связи с измеренными КЯ на большинстве каналов, что позволяет использовать их для калибровки биооптических алгоритмов для оценки концентрации хлорофилла *a*.

Биооптические алгоритмы для определения концентрации хлорофилла *a*

В исследованиях для получения сведений о концентрации хлорофилла *a* часто используют данные второго уровня обработки, не принимая во внимание отличия в условиях, для которых были разработаны алгоритмы, и не оценивая их точность. Особенно актуальной эта проблема становится при исследовании внутренних водоёмов, где состав оптически активных компонентов существенно отличается от морских условий, для которых разрабатывались и калибровались «стандартные» алгоритмы на основе многолетних океанографических наблюдений.

На рис. 5а (см. с. 46) приведены результаты сопоставления концентрации хлорофилла, измеренной в ходе экспедиций в Волгоградском вдхр., с оценками по данным второго уровня (Hu et al., 2012, 2019; O'Reilly, Werdell, 2019). Для простоты мы использовали только оценки по алгоритму OCx (англ. Ocean Color), представляющему собой полином четвёртой степени от максимального отношения яркости MBR (англ. maximum band ratio). Для спектров яркости Sentinel-3 OLCI в Волгоградском вдхр. MBR соответствует отношению КЯ на каналах 560 и 510 нм (алгоритм OC4). Кривая OC4, соответствующая калибровке NASA (англ. National Aeronautics and Space Administration), изображена красной линией (стандартный алгоритм), а чёрной — полином, откалиброванный по данным наших измерений. Можно отметить, что только измерения 3 июня и 17 августа, а также часть измерений 18 августа в диапазоне концентрации хлорофилла *a* 1–10 мг/м³ находятся вблизи стандартной зависимости, а значения более 10 мг/м³ проходят значительно ниже. Корень квадратный среднеквадратического отклонения измерений RMSE (англ. Root Mean Square Error) от алгоритма NASA и абсолютная средняя ошибка MAPE (англ. Mean Absolute Percentage Error) составили 17,4 мг/м³ и 79,7 % соответственно. Форма регрессионной кривой в виде полинома четвёртой степени, полученная по нашим данным, кажется неудачной из-за своей сложной кривизны и наличия практически горизонтального участка в интервале $R_{rs}(510)/R_{rs}(560)$ от 0,6 до 0,8, в пределах которого концентрация хлорофилла *a* практически постоянная.

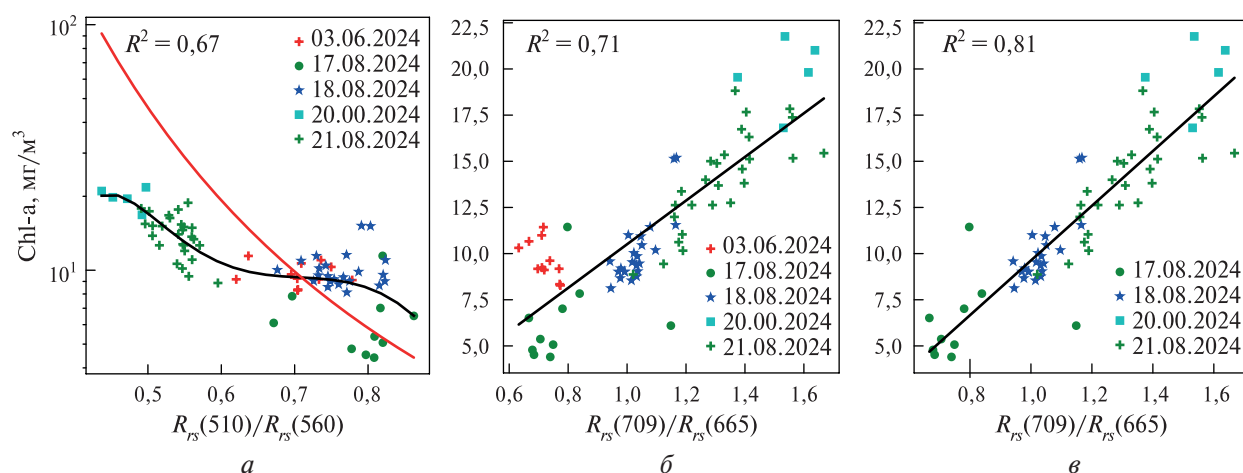


Рис. 5. Биооптические алгоритмы для определения концентрации хлорофилла *a* по снимкам Sentinel-3 OLCI: *a* — алгоритм OC4 (красная линия — калибровка NASA, чёрная — калибровка по экспедиционным данным в Волгоградском вдхр. в 2024 г.); *б*, *в* — двухканальный алгоритм «на границе красного диапазона» для разных комбинаций дат

На рис. 5б показаны результаты калибровки алгоритма для восстановления концентрации хлорофилла *a* в зависимости от отношения КЯ на двух спектральных каналах, расположенных на границе красного диапазона электромагнитного излучения. Для Sentinel-3 OLCI использованы каналы 709 и 665 нм. При применении всех измерений получена линейная зависимость с коэффициентами $a_1 = 11,82$ и $a_0 = -1,32$ и коэффициентом детерминации 0,71. Значения RMSE и MAPE составили 2,1 мг/м³ и 17,2 % соответственно. Данный двухканальный алгоритм часто используется для высокопродуктивных внутренних вод, поэтому его точность падает, если в спектре яркости пик в районе 709 нм мало выражен или отсутствует. Такие спектры наблюдались 3 июня. Именно данные о концентрации хлорофилла *a* за эту дату (красные крестики на рис. 5б) несколько выбиваются из общей зависимости.

Чтобы уточнить полученную зависимость, мы рассмотрели только августовские экспедиции, во время которых наблюдались спектры, характерные для высокопродуктивных вод. Полученная зависимость с коэффициентами регрессии $a_1 = 17,10$ и $a_0 = -7,44$ (см. рис. 5в) имеет более высокий коэффициент детерминации 0,81 и может быть использована в качестве рабочего алгоритма. Значения RMSE и MAPE для этой зависимости составили 1,8 мг/м³ и 11,5 %.

Обсуждение и выводы

Гидрооптические свойства вод в Волгоградском вдхр. во время летней экспедиционной кампании 2024 г. изменялись в достаточно широком диапазоне. В начале лета преобладали относительно чистые воды с небольшим содержанием органики и минеральной взвеси. По мере прогревания вод наблюдалось резкое увеличение концентрации водорослей, которые с установлением тихой безветренной погоды часто образовывали поверхностные маты, начинающие гнить в застойных областях со слабой циркуляцией вод. Это явление, влияющее на уменьшение фотического слоя и снижение содержания кислорода, — одна из причин существенного ухудшения качества вод.

Даже в летнее время в 2024 г. количество облачных дней оказалось относительно велико. Так, для валидации спутниковых продуктов использовались только данные 6 экспедиций из 12. Конечно, кроме облачности, большое влияние на качество спутниковых данных оказало наличие солнечного блика, в результате которого снимок был непригоден или спектр коэффициентов яркости заметно отличался от измеренного. В таких условиях проведение измерений в течение 9–10 дней оказалось правильной стратегией для получения натурных данных. По тем же причинам желание использовать снимки высокого пространственного

разрешения Sentinel-2 MSI оказалось трудновыполнимым. Использование данных радиометра Sentinel-3 OLCI с более низким разрешением (300 м), но с частотой съёмки раз в сутки, оказалось рациональнее и продуктивнее, так как упростило планирование экспедиционных исследований и позволило получить больше данных для валидации спутниковых продуктов.

Атмосферная коррекция для внутренних пресноводных водоёмов является критическим элементом обработки спутниковых снимков для получения достоверных оценок о таком вторичном гидрооптическом параметре, как спектральный коэффициент яркости. Как отмечается в исследовании точности различных процессоров АК для условий пресноводных водоёмов и прибрежных зон (Pahlevan et al., 2021), большое влияние на восстанавливаемые спутниковые коэффициенты яркости оказывают близость берегов и атмосферные аэрозоли, отличающиеся по своему составу и свойствам от морских. В настоящем исследовании для АК снимков Sentinel-3 OLCI использовался процессор ACOLITE, в котором определение аэрозольной составляющей излучения (оптической толщины аэрозоля на 550 нм) выполняется по множеству тёмных пикселей сцены без априорного задания спектральных каналов, а свойства аэрозоля выбираются из двух источников его происхождения: континентального и морского. Кроме того, в нём имеется возможность выполнять коррекцию остаточного солнечного блика и эффектов смежности. Хотя последний вид коррекции в данном исследовании не выполнялся из-за ограничения метода по зенитному углу обзора в 15° при значениях $26\text{--}48^\circ$ для Волгоградского вдхр. в использованных снимках. Немаловажной особенностью ACOLITE стало выполнение АК по известной оптической толщине аэрозоля. Как видно из таблицы, разница между определённой по снимку и измеренной AOD может составлять 150 %. Поэтому контроль этого параметра, который играет определяющую роль в АК, и его корректировка представляются крайне важным. Все эти особенности ACOLITE позволили восстановить спутниковые коэффициенты яркости с высокой точностью: коэффициент корреляции составил 0,9–1, кроме трёх спектральных каналов 400, 412 и 443 нм, где он был значительно ниже 0,6–0,7, что, вероятно, может объясняться наличием близости берегов и отражением от береговой растительности излучения в область зрения спутника (эффект смежности). При этом достаточно высокая точность наблюдалась не только на индивидуальных каналах, но и при восстановлении всей формы спектра КЯ — SAM равен $5\text{--}17^\circ$, хотя небольшие искажения наблюдались из-за наличия солнечного блика и его коррекции.

Концентрация хлорофилла *a*, полученная по алгоритму OC4, плохо согласуется с измерениями в Волгоградском вдхр. Значения RMSE и MAPE для этого алгоритма составили 17,4 мг/м³ и 79,7 %. Это, в свою очередь, показывает, что без валидации к использованию стандартных продуктов для оптически сложных вод следует подходить осторожно. Для получения более точных оценок концентрации хлорофилла *a* был откалиброван двухканальный алгоритм $\text{Chl-}a = 17,10R_{rs}(709)/R_{rs}(665) - 7,44$, который рекомендуется использовать в условиях активного «цветения» водорослей, а в иных ситуациях — $\text{Chl-}a = 11,821R_{rs}(709)/R_{rs}(665) - 1,32$. Корень квадратный среднеквадратической ошибки измерений от этих алгоритмов составил 1,8 и 2,1 мг/м³, а абсолютная средняя ошибка — 11,5 и 17,2 % соответственно. Вместе с тем следует отметить, что измерения приходились в основном на области с высоким содержанием фитопланктона, а изменения в водах с доминированием минеральной взвеси составляли небольшую долю от общего количества. Поэтому для получения более точных зависимостей для таких типов вод требуется проведение более детальных исследований.

Работы по разработке биооптических алгоритмов выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-17-00071 («Волжские биооптические алгоритмы»), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>.

Литература

1. Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н. Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 704–711. DOI: 10.7868/S0030157414040066.

2. Минеева Н. М., Семадени И. В., Макарова О. С. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ р. Волги (2017–2018 гг.) // Биология внутренних вод. 2020. Т. 2. С. 205–208. DOI: 10.31857/S0320965220020102.
3. Минеева Н. М., Семадени И. В., Соловьева В. В., Макарова О. С. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ р. Волги (2019, 2020 гг.) // Биология внутренних вод. 2022. № 4. С. 367–371. DOI: 10.31857/S0320965222040210.
4. Смирнова М. В., Чебан Е. Ю., Володченко Е. В., Бердникова Е. Ю., Солина Е. С. Гидроэкологические исследования участков Горьковского и Чебоксарского водохранилищ с притоками в летний период 2017 года // Вестн. ВГАВТ. 2017. Т. 53. № 4. С. 98–108.
5. Черногаева Г. М., Журавлева Л. Р., Малеванов Ю. А. Интегральная оценка качества воды в бассейне Волги по данным мониторинга в XXI в. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 6. С. 875–884. <https://doi.org/10.31857/S2587556623060043>.
6. Binding C. E., Pizzolato L., Zeng C. EOLakeWatch; delivering a comprehensive suite of remote sensing algal bloom indices for enhanced monitoring of Canadian eutrophic lakes // Ecological Indicators. 2021. V. 121. Article 106999. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106999>.
7. Castagna A., Vanhellemont Q. A generalized physics-based correction for adjacency effects // Applied Optics. 2025. V. 64. P. 2719–2743. <https://doi.org/10.1364/AO.546766>.
8. Chen J., Zhu W., Tian Y. Q. et al. Remote estimation of colored dissolved organic matter and chlorophyll-a in Lake Huron using Sentinel-2 measurements // J. Applied Remote Sensing. 2017. V. 11. No. 3. Article 036007. DOI: 10.1117/1.JRS.11.036007.
9. Doxani G., Vermote E., Roger J.-C. et al. Atmospheric correction inter-comparison exercise // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 2. Article 352. <https://doi.org/10.3390/rs10020352>.
10. Hieronymi M., Bi S., Müller D. et al. Ocean color atmospheric correction methods in view of usability for different optical water types // Frontiers in Marine Science. 2023. V. 10. Article 1129876. DOI: 10.3389/fmars.2023.1129876.
11. Hu C., Lee Z., Franz B. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference // J. Geophysical Research: Oceans. 2012. V. 117. No. C1. Article C01011. <https://doi.org/10.1029/2011JC007395>.
12. Hu C., Feng L., Lee Z et al. Improving satellite global chlorophyll a data products through algorithm refinement and data recovery // J. Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. No. 3. P. 1524–1543. <https://doi.org/10.1029/2019JC014941>.
13. Le C., Li Y., Zha Y. et al. A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. P. 1175–1182. DOI: 10.1016/j.rse.2009.02.005.
14. Mobley C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // Applied Optics. 1999. V. 38. P. 7442–7455.
15. Molkov A., Fedorov S., Pelevin V. Toward atmospheric correction algorithms for Sentinel-3/OLCI images of productive waters // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 15. Article 3663. <https://doi.org/10.3390/rs14153663>.
16. 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, V. II: Instrument Specifications, Characterization and Calibration. Greenbelt, MD, USA: NASA's Goddard Space Flight Center, 2003. 57 p.
17. Müller D., Krasemann H., Brewin R. J. W. et al. The Ocean Colour Climate Change Initiative: I. A methodology for assessing atmospheric correction processors based on in-situ measurements // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 162. P. 242–256. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.11.026>.
18. O'Reilly J. E., Werdell P. J. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors — OC4, OC5 and OC6 // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 229. P. 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021>.
19. Pahlevan N., Mangin A., Balasubramanian S. V. et al. ACIX-aqua: A global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 258. Article 112366. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112366>.
20. Sakerin S. M., Kabanov D. M., Rostov A. P. et al. Sun photometers for measuring spectral air transparency in stationary and mobile conditions // Atmospheric and Oceanic Optics. 2013. V. 26. No. 4. P. 352–356. <https://doi.org/10.1134/S102485601304012X>.
21. Seegers B. N., Stumpf R. P., Schaeffer B. A. et al. Performance metrics for the assessment of satellite data products: an ocean color case study // Optics Express. 2018. V. 26. No. 6. P. 7404–7422. DOI: 10.1364/OE.26.007404.
22. Vanhellemont Q. Sensitivity analysis of the dark spectrum fitting atmospheric correction for metre- and decametre-scale satellite imagery using autonomous hyperspectral radiometry // Optics Express. 2020. V. 28. No. 20. P. 29948–29965. <https://doi.org/10.1364/OE.397456>.

23. Vanhellemont Q., Ruddic K. Atmospheric correction of Sentinel-3/OLCI data for mapping of suspended particulate matter and chlorophyll-a concentration in Belgian turbid coastal waters // *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 256. Article 112284. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112284>.
24. Xue K., Ma R., Wang D., Shen M. Optical classification of the remote sensing reflectance and its application in deriving the specific phytoplankton absorption in optically complex lakes // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 2. Article 184. DOI: 10.3390/rs11020184.

Bio-optical algorithms for restoring chlorophyll *a* concentration in the Volgograd Reservoir using Sentinel-3 OLCI images

S. V. Fedorov^{1,2}, A. A. Molkov^{1,3,4}, I. A. Kapustin^{1,3,4}, A. V. Ermoshkin^{1,3},
G. V. Leshev^{1,3}, D. V. Dobrokhotova^{1,3}, E. S. Koltsova¹, B. V. Konovalov^{1,5},
A. M. Chushnyakova^{1,5}

¹ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603022, Russia
E-mail: molkov@ipfran.ru

² Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia

³ Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia

⁴ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603950, Russia

⁵ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia

Inland water bodies, including reservoirs, are optically complex environments for which standard satellite algorithms for estimating chlorophyll *a* concentrations are of little use without adaptation and validation. In this work, a full cycle of analysis is implemented: from field measurements and validation of various algorithms of atmospheric correction to calibration of bio-optical algorithms adapted to the Volgograd Reservoir. In 2024, two expeditions were carried out at this reservoir to collect field data, including measurements of water reflectance, chlorophyll *a* concentration and atmospheric transparency. Significant spatial and temporal variability of optical properties of waters was found, which was reflected in the spectra of remote sensing reflectance and concentrations of optically active components of water. Validation of atmospheric correction of Sentinel-3 OLCI images showed a fairly high accuracy of satellite remote sensing reflectance. The correlation coefficient was 0.9–1 for most spectral bands. Some deterioration in accuracy was observed in the blue region of the spectrum. The correlation coefficient was approximately 0.7. A comparison of estimates of chlorophyll *a* concentration according to the NASA OC4 algorithm with measurements of this parameter showed their low accuracy. Two-band red-edge algorithms are proposed for restoring chlorophyll *a* concentration with a coefficient of determination of 0.7–0.8.

Keywords: Volgograd Reservoir, field measurements, atmospheric correction, Sentinel-3 OLCI, bio-optical algorithms, chlorophyll *a* concentration

Accepted: 29.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-38-50

References

1. Konovalov B. V., Kravchishina M. D., Belyaev N. A., Novigatsky A. N., Determination of the concentration of mineral particles and suspended organic substance based on their spectral absorption, *Oceanology*, 2014, V. 54, No. 5, pp. 660–667, DOI: 10.1134/S0001437014040067.
2. Mineeva N. M., Semadeny I. V., Makarova O. S., Chlorophyll content and the modern trophic state of the Volga River reservoirs (2017–2018), *Inland Water Biology*, 2020, V. 13, No. 2, pp. 327–330, DOI: 10.1134/S199508292002008X.
3. Mineeva N. M., Semadeny I. V., Soloviova V. V., Makarova O. S., Chlorophyll Content and the Modern Trophic State of the Volga River Reservoirs (2019–2020), *Inland Water Biology*, 2022, No. 4, pp. 367–371, (in Russian), DOI: 10.31857/S0320965222040210.

4. Smirnova M. V., Cheban E. Yu., Volodchenko E. V., Berdnikova E. Yu., Solina E. S., Hydro-ecological research of the Gorky and Cheboksary reservoirs sites and their tributaries in summer of 2017, *Vestnik Volzhskoi Gosudarstvennoi Akademii Vodnogo Transporta*, 2017, V. 53, No. 4, pp. 98–108 (in Russian).
5. Chernogaeva G. M., Zhuravleva L. R., Malevanov Yu. A., Integral assessment of water quality in the Volga River basin according to monitoring data in the 21st century, *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Ser. geograficheskaya*, 2023, V. 87, No. 6, pp. 875–884 (in Russian), <https://doi.org/10.31857/S2587556623060043>.
6. Binding C. E., Pizzolato L., Zeng C., EOLakeWatch; delivering a comprehensive suite of remote sensing algal bloom indices for enhanced monitoring of Canadian eutrophic lakes, *Ecological Indicators*, 2021, V. 121, Article 106999, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106999>.
7. Castagna A., Vanhellemont Q., A generalized physics-based correction for adjacency effects, *Applied Optics*, 2025, V. 64, pp. 2719–2743, <https://doi.org/10.1364/AO.546766>.
8. Chen J., Zhu W., Tian Y. Q. et al., Remote estimation of colored dissolved organic matter and chlorophyll-a in Lake Huron using Sentinel-2 measurements, *J. Applied Remote Sensing*, 2017, V. 11, No. 3, Article 036007, DOI: 10.1117/1.JRS.11.036007.
9. Doxani G., Vermote E., Roger J.-C. et al., Atmospheric correction inter-comparison exercise, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 2, Article 352, <https://doi.org/10.3390/rs10020352>.
10. Hieronymi M., Bi S., Müller D. et al., Ocean color atmospheric correction methods in view of usability for different optical water types, *Frontiers in Marine Science*, 2023, V. 10, Article 1129876, DOI: 10.3389/fmars.2023.1129876.
11. Hu C., Lee Z., Franz B., Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2012, V. 117, No. C1, Article C01011, <https://doi.org/10.1029/2011JC007395>.
12. Hu C., Feng L., Lee Z. et al., Improving satellite global chlorophyll a data products through algorithm refinement and data recovery, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, V. 124, No. 3, pp. 1524–1543, <https://doi.org/10.1029/2019JC014941>.
13. Le C., Li Y., Zha Y. et al., A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China, *Remote Sensing of Environment*, 2009, V. 113, pp. 1175–1182, DOI: 10.1016/j.rse.2009.02.005.
14. Mobley C. D., Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements, *Applied Optics*, 1999, V. 38, pp. 7442–7455.
15. Molkov A., Fedorov S., Pelevin V., Toward atmospheric correction algorithms for Sentinel-3/OLCI images of productive waters, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 15, Article 3663, <https://doi.org/10.3390/rs14153663>.
16. 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, V. II: Instrument Specifications, Characterization and Calibration*, Greenbelt, MD, USA: NASA's Goddard Space Flight Center, 2003, 57 p.
17. Müller D., Krasemann H., Brewin R. J. W. et al., The Ocean Colour Climate Change Initiative: I. A methodology for assessing atmospheric correction processors based on in-situ measurements, *Remote Sensing of Environment*, 2015, V. 162, pp. 242–256, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.11.026>.
18. O'Reilly J. E., Werdell P. J., Chlorophyll algorithms for ocean color sensors — OC4, OC5 and OC6, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 229, pp. 32–47, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021>.
19. Pahlevan N., Mangin A., Balasubramanian S. V. et al., ACIX-aqua: A global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters, *Remote Sensing of Environment*, 2021, V. 258, Article 112366, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112366>.
20. Sakerin S. M., Kabanov D. M., Rostov A. P. et al., Sun photometers for measuring spectral air transparency in stationary and mobile conditions, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2013, V. 26, No. 4, pp. 352–356, <https://doi.org/10.1134/S102485601304012X>.
21. Seegers B. N., Stumpf R. P., Schaeffer B. A. et al., Performance metrics for the assessment of satellite data products: an ocean color case study, *Optics Express*, 2018, V. 26, No. 6, pp. 7404–7422, DOI: 10.1364/OE.26.007404.
22. Vanhellemont Q., Sensitivity analysis of the dark spectrum fitting atmospheric correction for metre- and decametre-scale satellite imagery using autonomous hyperspectral radiometry, *Optics Express*, 2020, V. 28, No. 20, pp. 29948–29965, <https://doi.org/10.1364/OE.397456>.
23. Vanhellemont Q., Ruddick K., Atmospheric correction of Sentinel-3/OLCI data for mapping of suspended particulate matter and chlorophyll-a concentration in Belgian turbid coastal waters, *Remote Sensing of Environment*, 2021, V. 256, Article 112284, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112284>.
24. Xue K., Ma R., Wang D., Shen M., Optical classification of the remote sensing reflectance and its application in deriving the specific phytoplankton absorption in optically complex lakes, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 2, Article 184, DOI: 10.3390/rs11020184.