Информативность мультиспектральных (OLCI) и гиперспектральных данных при оценке состояния пресноводных экосистем на примере Цимлянского водохранилища

Б. Л. Сухоруков^{1,2}, Н. В. Решетняк², В. В. Сапрыгин³

¹ Институт водных проблем РАН, Ростов-на-Дону, 344090, Россия E-mail: bls-phys@yandex.ru ² Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, 344090, Россия E-mail: nvr-phys@yandex.ru ³ Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский

³ Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр, Ростов-на-Дону, 344000, Россия E-mail: vlad_rostov@inbox.ru

Приведены данные дистанционных спектрометрических измерений в рамках многоуровневого синхронного эксперимента на Приплотинном плёсе Цимлянского вдхр., проведённого в августе 2020 г. Концентрацию хлорофилла *a* фитопланктона ($C_{xn a}$) определяли по измерениям, выполненным на трёх уровнях. Данные верхнего, спутникового уровня получены с сайта Европейской организации спутниковой метеорологии (EUMETSAT) мультиспектральным сканером OLCI (Sentinel-3). С борта судна, с высоты около 2 м, проводили дистанционную съёмку спектрометром S41 (фирмы Laser LS). Спектральный диапазон портативного прибора — 389–808 нм, спектральное разрешение — 1,8 нм. На этом уровне $C_{xn a}$ определяли по ранее построенным биооптическим моделям. На этом же уровне синхронно со спектрометрической съёмкой отбирали пробы воды для последующего аналитического определения $C_{xn a}$ в лабораторных условиях. Сопоставление результатов, полученных на различных уровнях, выявило ряд несоответствий в оценке $C_{xn a}$ для выбранного водного объекта, находящегося в гиперэвтрофном состоянии. Результаты оценок $C_{xn a}$ различаются в несколько раз. Обсуждены возможные причины отмеченных несоответствий. Показана недостаточная информативность мультиспектральных данных для оценки трофического статуса подобных водных объектов.

Ключевые слова: многоуровневый эксперимент, дистанционная спектрометрия, коэффициент спектральной яркости (КСЯ), хлорофилл *а* фитопланктона

Одобрена к печати: 22.02.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-239-252

Введение

Достижения науки в области мониторинга глобальных, крупномасштабных процессов, происходящих на Земле при изменениях климата, атмосферы Земли, состояния Мирового океана очевидны. При изучении этих «объектов» на первый план выходят такие возможности спутникового мониторинга, как глобальность и одновременное попадание в кадр больших площадей подстилающей поверхности при невысоком пространственном и спектральном разрешении используемой аппаратуры. Не так очевидны достижения в области мониторинга менее глобальных природных образований и явлений, к которым можно отнести поверхностные водные объекты, в особенности их состояние и качество. Причин «невнимания» к развитию мониторинга подобных образований несколько. Более «мелкие» объекты в смысле глобальной экологии не так значительно влияют на глобальные процессы, происходящие на Земле, и имеют в определённой степени региональный интерес. Такие объекты интересны в первую очередь для стран или даже регионов, в которых они находятся, и только иногда для сосседних стран при трансграничном переносе как непосредственно воды, так и загрязняющих эту воду веществ. Для решения задач мониторинга этих природных образований требуется уже аппаратура с повышенным и пространственным, и спектральным разрешением. Но в настоящее время для осуществления подобных программ, на наш взгляд, существуют затруднения экономического характера, хотя и не принципиальные.

Основные цели настоящей работы — обсудить преимущества и недостатки дистанционной спектрометрической съёмки с различных уровней и при этом обратить внимание на ряд нестыковок, а также обсудить пути решения отдельных задач мониторинга поверхностных водных объектов.

В работе представлены результаты спектрометрических съёмок Приплотинного плёса Цимлянского вдхр. разных уровней: верхнего, спутникового и нижнего, судового, с использованием дистанционной, с высоты борта судна, спектрометрической съёмки. Для обоих уровней регистрируют яркость восходящего от воды излучения, индуцированного солнцем, и затем рассчитывают коэффициент спектральной яркости (КСЯ) — пассивное дистанционное зондирование. Различие в получаемой на этих уровнях информации состоит в том, что восходящий от воды сигнал верхнего уровня проходит через атмосферу и должен подвергнуться ряду известных коррекций, тогда как сигнал нижнего уровня атмосферой не искажается, измерения на нём проходят практически в идеальных условиях. Методики дистанционной спектрометрии на нижнем уровне хорошо отработаны. В этом смысле сигналы нижнего уровня — спектры КСЯ — должны служить эталоном для сигналов верхнего. Это утверждение является приближённым по ряду причин, но с учётом того, что можно провести идеальный эксперимент, — верно.

Материалы и методы

Материалом исследований послужили снимки, сделанные природоресурсным спутником Sentinel (сенсор OLCI — *англ*. Ocean and Land Colour Instrument), и данные, полученные в экспедиции по Цимлянскому вдхр. 27–28 августа 2020 г. Предметом исследования стала спектрометрическая гиперспектральная информация (ГСИ) на нижнем уровне и мультиспектральная (МСИ) — на верхнем, а также их сопоставление.

Объект исследования

Цимлянское вдхр. образовано в 1952 г. Длина распространения подпора в межень по естественному речному фарватеру — 360 км. Средняя ширина водохранилища — 8,8 км, максимальная — 40 км. Максимальная глубина при нормальном подпорном уровне (НПУ) — 30,8 м, средняя — 8,7 м. Морфологически в водоёме выделяют четыре плёса: Верхний, Чирской, Потемкинский и Приплотинный. Заметное течение (0,1–1,0 м/с) отмечается только в Верхнем плёсе водохранилища.

Водохранилище характеризуется большой долей мелководий, что способствует его высокой биопродуктивности. При НПУ доля мелководий с глубиной до 5 м — 28,7 %, глубиной до 10 м — 61,9 % (Вехов и др., 2014).

В фитопланктоне Цимлянского вдхр. отмечено 480 таксонов рангом ниже рода, относящиеся к восьми отделам (Вехов и др., 2014). В составе флоры преобладают *Chlorophyta* (36,7%), *Bacillariophyta* (23,8%) и *Cyanophyta* (16,7%). В летне-осенний период преобладающей группой фитопланктона Цимлянского вдхр. являются сине-зелёные водоросли (64–80% средневзвешенной биомассы). Обычно в это время доминируют виды родов *Microcystis*, *Aphanizomenon* и *Planktothrix*. По данным Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга) (Вехов и др., 2014), на отдельных участках и в заливах за счёт нагонных явлений отмечается «гиперцветение», биомасса фитопланктона — более 50 мг/дм³. (Пересчёт на концентрацию хлорофилла *a* фитопланктона (из расчёта, что отношение сырой биомассы к сухой равно 100, а процент хлорофилла *a* в сухой биомассе, по литературным данным, изменяется от 2,8 до 28%) даёт оценку от 14 до 140 мкг/дм³.)

Глубина диска Секки во время проведения экспедиционных работ варьировала от 0,4 до 1,2 м. Наблюдалось цветение сине-зелёных водорослей, при этом постоянное и сильное перемешивание воды, вызванное ветровым волнением, обеспечивало равномерное распределение колоний фитопланктона по глубине в приповерхностном слое.

Отметим, что мы рассматриваем случай крупных водных объектов (ВО) с линейными размерами порядка 30 км, на съёмку которых с использованием судов требуется времени больше, чем световой день. Такая рассинхронизация во времени получения данных нижнего уровня — недостаток подспутниковых экспериментов многих крупных природных объектов, но это данность.

Основной дистанционно измеряемый показатель

Основной дистанционно измеряемый на любом уровне спектрометрический показатель — коэффициент спектральной яркости восходящего от воды излучения на длине волны λ в направлении θ , φ . В иностранной литературе общепринято обозначение R_{rs} (*анел.* remote sensing reflectance). В общем виде эта величина определяется как:

$$R_{rs}(\theta,\phi,\lambda) = \frac{L_{\omega}(\theta,\phi,\lambda)}{E_{d}(\lambda)},\tag{1}$$

где L_{ω} — яркость восходящего от воды излучения в направлении датчика θ , φ ; E_d — яркость света, отражённого идеальным рассеивателем, эталоном, или облучённость (Копелевич, 1983; Шифрин, 1983; Mobley, 1999). В отечественной литературе используют обозначение $\rho(\theta, \phi, \lambda)$. В дальнейшем не будем описывать геометрические условия съёмки, а будем указывать только длину волны КСЯ в видимой области от 389 до 808 нм, например $R_{rs}700$ (или ρ_{700}). При представлении графика КСЯ по длинам волн в видимой области спектра используем понятие спектра КСЯ — СКСЯ.

На практике на нижнем (или среднем) уровне СКСЯ измеряют как отношение (1).

Между КСЯ восходящего от воды излучения и концентрацией оптически активных (видимых) компонентов (ОАК), изменяющих комплексный показатель преломления воды, существует хорошо известная зависимость (Голубицкий и др., 1974; Зеге, 1982). Получено аналитическое выражение для расчёта КСЯ (Сухоруков, Новиков, 2001; Сухоруков и др., 2000).

К компонентам, изменяющим комплексный показатель преломления воды, его действительную (поглощение) или мнимую (рассеяние) части, относят взвешенные (минеральные и органические) и растворённые «окрашенные» органические вещества, пигменты фитопланктона. Получить простое аналитическое выражение для решения обратной задачи — определения концентрации этих компонентов — в общем виде затруднительно. С этой целью на практике строят так называемые биооптические модели (БОМ), связывающие концентрацию этих компонентов с КСЯ (R_{rs}), измеренную в отдельных узких диапазонах спектра — каналах (или комбинациях этих каналов). Такие БОМ строят по экспериментальным данным, получаемым в специальных экспериментах, получивших название «этажерка», когда измерения как КСЯ, так и концентрации ОАК проводят синхронно на нескольких уровнях. После определения концентрации ОАК в лабораторных условиях строят БОМ. Последующие съёмки позволяют уточнять эти модели, в общем случае являющиеся региональными, всесезонными.

Нижний уровень

Гиперспектральные данные с разрешением 1,8 нм получали при спектрометрической съёмке на нижнем уровне с борта судна, с высоты 2 м, на 15 станциях (*рис. 1*, см. с. 242). За основу выбрали схему стандартной сетки станций Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета), к которой добавили несколько станций с различным гидрологическим режимом. Станции 5, 14, 15 расположены вдоль старого русла Дона, где глубина составляет более 5 м. Станции 12, 13 и 16 выбраны на мелководных участках водохранилища.



Рис. 1. Схема расположения станций в Приплотинном плёсе Цимлянского вдхр.



Рис. 2. СКСЯ нижнего уровня и *R*_{rs} верхнего уровня по данным OLCI. Обозначения станций соответствуют *рис. 1.* После обозначения станции указаны дата и местное время спектрометрической съёмки и синхронного отбора проб. Ширина столбиков отображает спектральное разрешение каналов OLCI

Спектры яркости регистрировали в соответствии с требованиями руководящего документа Росгидромета (РД 52.24.729.2010..., 2010) согласно схемам, описанным в работах (Сухоруков и др., 2020; Mobley, 1999). Использовали портативный спектрометр S41 фирмы SOLAR Laser Systems (СОЛАР ЛС), его спектральный диапазон — 389–808 нм, спектральное разрешение — 1,8 нм. Для исключения случайных погрешностей каждый спектр восходящего от воды излучения и эталона снимали 5–7 раз в течение 1–2 мин. Полученные СКСЯ приведены на *рис. 2* (см. с. 242).

Данные этого уровня позволяют в реальном времени, практически во время эксперимента, оценивать состояние водохранилища по его трофическому статусу согласно исследованию (Сухоруков и др., 2017). За критерий трофического статуса принимают форму СКСЯ восходящего от воды излучения. По полученным ранее БОМ для Нижнего Дона и Цимлянского вдхр. (Сухоруков и др., 2020) рассчитывали $C_{xn a}$ (*таблица*). Также синхронно с проведением спектрометрической съёмки с борта судна отбирали пробы воды пробоотборником объёмом около 3 дм³ с глубины около 0,5 м на участке водного объекта, попадающего в поле зрения спектрометра. Время «рассинхронизации» спектрометрической съёмки и отбора проб на этом уровне в большинстве случаев составило 2–5 мин.

Станция	Дата, время съёмки	С _{хл а} (КСЯ-1)	С _{хл а} (КСЯ-2)	С _{хл а} (ан.)	С _{хп.а} 26.08.2020 (OLCI_NN)	С _{хл а} 27.08.2020 (OLCI_NN)	С _{хл а} 28.08.2020 (OLCI_NN)	Категория трофности
1	27.08.2020, 15:12	67,32	58,80	88,01	10,56	10,18 [×]	_	V
2	27.08.2020, 14:12	97,34	85,20	167,02	10,95	9,82 [×]	_	VI
3	27.08.2020, 13:16	97,93	85,73	128,99	10,95	10,95 [×]	_	VI
4	27.08.2020, 12:22	60,30	52,63	62,13	10,56	9,47~	_	V
5	27.08.2020, 11:24	90,85	79,50	315,92	10,95	9,13′~	_	VI
8	27.08.2020, 07:56	48,44	42,20	39,50	8,49	11,77 [×]	8,81	V
9	27.08.2020, 07:03	41,49	36,09	31,11	11,35	10,56 [×]	7,62	V
10	27.08.2020, 09:06	38,47	33,43	11,05	5,91	2,57 [×]		IV–V
11	27.08.2020, 10:17	37,65	32,71	28,95	10,95	10,18 [×]	10,95	IV–V
12	28.08.2020, 09:41	62,51	54,58	62,41	9,82	9,47 [×]	11,35	V
13	28.08.2020, 10:30	82,24	71,92	99,84	10,18	0,70′~	11,35	V–VI
14	28.08.2020, 11:15	109,01	95,47	127,22	10,56	0,56'* [×]	1,66′	VI
15	28.08.2020, 11:59	67,95	59,36	94,92	10,56	9,47 [×]	1,44'*	V–VI
16	28.08.2020, 16:04	50,73	44,21	68,76	10,18	10,56 [×]	12,66'*	IV

Станции водохранилища с указанием даты и времени синхронных съёмок, $C_{\rm xx,a}$ (мкг/дм³) в пробах воды и категория трофности (Сухоруков и др., 2017)

Примечание: $C_{x\pi a}$ (КСЯ-1) — концентрация хлорофилла *a* фитопланктона, оценённая по БОМ для Нижнего Дона, $C_{x\pi a}$ (КСЯ-2) — по БОМ для Цимлянского вдхр., $C_{x\pi a}$ (ан.) — по аналитическим данным, $C_{x\pi a}$ (OLCI_NN) — по спутниковым данным 26–28 августа. Надстрочными символами обозначены следующие флаги 2-го уровня обработки снимков OLCI (пояснения приведены в п. «Верхний уровень») для соответствующих станциям пикселей снимков: ~ — MEGLINT, * — HIGHGLINT, ' — OCNN_FAIL, * — AC_FAIL.

Фиксацию проб для определения видового состава фитопланктона проводили непосредственно на борту судна. Фильтрование проб для последующего определения концентрации хлорофилла *a* фитопланктона ($C_{x\pi a}$) проводили на борту судна или через несколько часов в лабораторных условиях. Фильтры подсушивали, укладывали в чашку Петри и помещали в морозильную камеру для последующего приготовления экстрактов и дальнейших оптических измерений в лабораторных условиях и расчётов (ГОСТ 17.1.4.02-90..., 1990; Ritchie, 2008); результаты представлены в *таблице*. На *рис. 2* приведены СКСЯ нижнего уровня в сравнении с R_{rs} верхнего уровня, полученными 27—28 августа 2020 г.

Верхний уровень

В качестве информации верхнего, спутникового уровня использовали данные спектрометра OLCI, который функционирует на борту спутников Sentinel-3A и Sentinel-3B и производит съёмку в 21 диапазоне спектра в диапазоне 400–1020 нм. Пространственное разрешение составляет 300 м, полоса захвата — 1270 км.



Рис. 3. Схема распределения концентрации хлорофилла *а* фитопланктона в Цимлянском вдхр. по данным EUMETSAT за 26–28 августа 2020 г.

Данные получали с сайта Европейской организации спутниковой метеорологии (Eumetsat Earth Observation Portal, https://coda.eumetsat.int/#/home). Информация доступна в открытом режиме после регистрации. Использовали снимки второго уровня обработки, высокого разрешения, содержащие данные по водным объектам (названия снимков содержат индексы L2 WFR). В состав снимков включена информация об их географической привязке, R_{rs} с учётом базовой атмосферной коррекции для вод первого типа (Morel, Prieur, 1977), стандартный продукт (CHL_NN) — концентрация хлорофилла a, рассчитанная при помощи разработанного для вод второго типа (Morel, Prieur, 1977) нейросетевого алгоритма (Doerffer, 2010), и так называемые флаги, отмечающие важные результаты этапов обработки первого и второго уровней (Sentinel-3..., 2021). Для расчёта концентрации хлорофилла а используют полученное в качестве промежуточного продукта спектральное распределение R_{rs} после применения альтернативного нейросетевого алгоритма атмосферной коррекции для вод второго типа, которое, к сожалению, не входит в состав снимка (Sentinel-3..., 2021, с. 27–28). На период экспедиции доступны два охватывающих район исследований снимка 27 и 28 августа со спутника Sentinel-3В и один снимок 26 августа со спутника Sentinel-3А. Каждый день съёмка выполнялась во временной промежуток между 10:00 и 11:00 по местному времени. Район исследований на снимках 26 и 27 августа полностью свободен от облачного покрова. Снимок 28 августа свободен от облаков (отсутствует соответствующий флаг CLOUD) в области проведения измерений нижнего уровня, за исключением ст. 16, помеченной флагом CLOUD AMBIGUOUS (возможно присутствие неопределённого типа облачности, например полупрозрачных облаков), и ст. 8 с флагом CLOUD MARGIN (область потенциальной облачности в пределах 4 пикселей от пикселей, помеченных флагами CLOUD и CLOUD_ AMBIGUOUS). Каждой станции нижнего уровня поставлен в соответствие пиксель сделанного в тот же день снимка, разница по времени между проведением обследований *in situ* и спутниковой съёмкой не превысила 5,5 ч для всех станций. По данным съёмки верхнего уровня для каждой станции построен спектральный профиль R_{rs} (см. puc. 2) и получена оценка С_{хл а} (см. *таблицу*). Станции с флагами AC_FAIL (вероятная ошибка атмосферной коррекции) и OCNN_FAIL (ошибка нейросетевого алгоритма для вод второго типа, используемого в том числе для расчёта C_{хп a}) отмечены в *таблице*. Район исследований на снимке 27 августа попал в зону бликов среднего (флаг MEGLINT) и высокого (флаг HIGHGLINT) уровней, для которых уже была выполнена предусмотренная коррекция (соответствующие пометки приведены в *таблице*). При этом отмечено, что результат коррекции для бликов высокого уровня представляется ненадёжным (Sentinel-3..., 2021, с. 34). Снимки 26 и 28 августа свободны от бликов. Для каждого снимка построена карта распределения C_{хп a} (puc. 3). Обрабатывали данные с помощью программного комплекса с открытым исходным кодом SNAP (http://step. esa.int/main/toolboxes/snap/), созданного для работы с данными космических спутников серии Sentinel.

Результаты и обсуждение

Сравнение (сопоставление) полученных на разных уровнях данных позволяет решить следующие задачи:

- оценка качества спектрального распределения R_{rs}, полученного в пикселях выбранных станций (с точки зрения физики процесса);
- сопоставление результатов оценки C_{хл a}, полученных аналитически, по спутниковым данным, а также по БОМ, ранее построенным для Нижнего Дона и Цимлянского вдхр. (Сухоруков и др., 2020);
- оценка информативности мультиспектральных (OLCI) и гиперспектральных данных при анализе состояния пресноводных экосистем.

Пиксели снимков выбирали по координатам станций, представленным на *puc.* 1. Но однозначное сопоставление СКСЯ и R_{rs} в значительной мере условно. Спектр R_{rs} в пикселе

получают усреднённым с площади 300×300 м, тогда как сигнал нижнего уровня определяется полем зрения спектрометра S41 и формируется водным объектом с площадью порядка $0,03 \text{ m}^2$. В реальных условиях съёмки на нижнем уровне (волнение, дрейф судна) поле зрения может перемещаться и составлять до $1-2 \text{ m}^2$, но даже при такой оценке поля зрения формирующие сигналы верхнего и нижнего уровней площади ВО различаются на четыре порядка. Поэтому один из принципиальных моментов при таком сравнении — убедиться в квазиоднородности (или мозаичности) сопоставляемых участков экосистемы водного объекта.

На *рис.* 4 представлены СКСЯ, полученные 27 и 28 августа по ходу судна в районе ст. 5 и 14 при перемещении в течение одной минуты на скорости около 9 узлов на расстояние около 300 м, что соответствует линейному размеру пикселя снимка OLCI. Форма СКСЯ в районе ст. 5 (см. *рис.* 4*a*) отличается незначительно и соответствует шестой категории (Сухоруков и др., 2017), которая характеризует состояние водной экосистемы как гиперэвтрофное с диапазоном изменения $C_{xлa}$ от 35 до 295 мкг/дм³ со средним значением 100 мкг/дм³. В районе ст. 14 (см. *рис.* 4*б*) категория СКСЯ изменяется от шестой до пятой, что соответствует гиперэвтрофному состоянию экосистемы ВО, возможно с участками полиэвтрофного, со средним значением $C_{xлa}$ более 70 мкг/дм³ в диапазоне от 33 до 120 мкг/дм³. Приведённые примеры позволяют утверждать, что соответствующие по размеру пикселю снимка OLCI участки ВО достаточно однородны, во всяком случае в смысле оцениваемой трофности ВО.



Рис. 4. СКСЯ по ходу судна в течение одной минуты на интервале около 300 м: a - в районе ст. 5; $\delta - в$ районе ст. 14

Сравнение гиперспектральных СКСЯ нижнего уровня и мультиспектральных R_{rs} верхнего (см. *рис. 2*) показывает, что спектральное распределение R_{rs} , с учётом его очевидной дискретности, в целом подобно СКСЯ. Но при этом на всех станциях наблюдаются отрицательные значения R_{rs} в синей области (первые три канала с центрами на 400,0; 412,5 и 442,5 нм), что физически невозможно. Пиксели с наибольшими по модулю отрицательными значениями помечены флагами AC_FAIL (за 27 августа для ст. 14 и за 28 августа для ст. 15 на первых трёх каналах R_{rs} составляет ровно -2,0, что похоже на программное ограничение алгоритма, а за 28 августа для ст. 16 R_{rs} недоступны) и OCNN_FAIL (см. *таблицу*). На снимке 26 августа, свободном от всех флагов, указывающих на возникшие проблемы обработки или сомнительное качество данных, R_{rs} для всех станций на первых трёх каналах также отрицательны (в данной статье мы их не приводим как избыточные и принципиально не отличающиеся по качеству от R_{rs} 27 и 28 августа).

На *рис.* 5 приведены полученные в восьми соседних со ст. 14 пикселях снимка 28 августа R_{rs} в сравнении с СКСЯ нижнего уровня в качестве иллюстрации отмеченного подобия форм СКСЯ и R_{rs} при наличии отрицательных значений. Главный максимум находится в области 560 нм, «хлорофилльный» — в области 710 нм. Связанные с поглощением фитопигментами минимумы — около 620 и 665 нм. Если спектры R_{rs} мысленно повернуть в плоскости

рисунка по часовой стрелке вокруг точки с координатами [690; 0,07] (см. *рис. 5*), они станут более сходны по значениям и форме с СКСЯ на ст. 14 и будут представлять собой спектры шестой категории, а состояние ВО — гиперэвтрофное (Сухоруков и др., 2017). Очевидно, что это вычислительный эффект при обработке первичных спектров яркости восходящего от воды излучения. При этом два R_{rs} имеют отрицательные значения и в области 600–680 нм, что принципиально не позволяет воспользоваться методологией построения БОМ и нанести эти точки на известную БОМ для оценки $C_{xn a}$ по известному для нижнего уровня алгоритму (Сухоруков и др., 2020; Moses et al., 2012).



*Рис. 5. R*_{*rs*} верхнего уровня для ст. 14 и восьми соседних пикселей в сравнении с СКСЯ нижнего уровня

Возможность получения отрицательных значений R_{rs} в коротковолновой области спектра отмечалась и ранее (Doerffer, 2010), но в выбранных пикселях мы сталкиваемся с отрицательными значениями в принципиально важной для оценки состояния водных объектов области спектра, что становится очевидной некорректностью. Появление отрицательных значений зачастую связывают с ошибками атмосферной коррекции (Doerffer, 2010; Kravitz et al., 2020; Liu et al., 2021; Mograne et al., 2019; Moore et al., 2017). И в нашем случае причиной отрицательных значений можно назвать применение базовой атмосферной коррекции, разработанной для вод первого типа, к оптически сложному ВО, но лишь в качестве требующего прямого доказательства предположения.

В таблице приведены значения $C_{x\pi a}$, определённые аналитически в лабораторных условиях в отобранных синхронно со спектрометрической съёмкой нижнего уровня пробах воды, по БОМ для Нижнего Дона и Цимлянского вдхр. (Сухоруков и др., 2020), по данным съёмки OLCI и категории трофности (Сухоруков и др., 2017). Схемы распределения $C_{x\pi a}$ по спутниковым данным в дни проведения обследований представлены на *puc. 3.* Максимальное значение $C_{x\pi a}$ на всей акватории Приплотинного плёса 26–28 августа по данным верхнего уровня не превосходит 25 мкг/дм³, а на станциях — 13 мкг/дм³. Это показывает в том числе независимость последующих выводов от используемого сканера (снимок 26 августа сделан сканером на борту спутника Sentinel-3A, а снимки 27–28 августа — с борта Sentinel-3B) и отмеченных флагами проблем в ходе обработки снимков или сомнительного качества данных (на снимке 26 августа по всей изучаемой акватории такие флаги отсутствуют). По данным наших аналитических определений, эта величина может достигать 300 мкг/дм³ (см. таблицу, ст. 5). Можно допустить, что при отборе пробы на ст. 5 мы попали в область аномального сгущения

фитопланктона и оценка $C_{xn a}$ для неё завышена, но на четырёх станциях $C_{xn a}$ была выше 100 мкг/дм³ и на девяти станциях — более 50 мкг/дм³. По оценкам двух БОМ, $C_{xn a}$ превышала 25 мкг/дм³ на всех станциях, причём на большинстве — более чем в два раза. Таким образом, два независимых (и аналитический, и спектрометрический нижнего уровня) метода оценки $C_{xn a}$ указывают на значительное занижение этой величины стандартным алгоритмом обработки данных OLCI на исследуемой акватории.

Для сравнения с измерениями нижнего уровня мы использовали стандартный для снимка второго уровня продукт — $C_{x\pi a}$, рассчитанную при помощи нейросетевых алгоритмов (Sentinel-3..., 2021). Для разработки алгоритмов использованы экспериментальные данные, полученные на водных объектах с трофическим статусом, отличающимся от статуса Цимлянского вдхр., что может приводить к неоправданным оценкам этого показателя по акватории указанного ВО. В документе (Doerffer, 2010) отмечается, что ограничением используемых для расчётов в мутных продуктивных водах второго типа нейросетевых алгоритмов становятся диапазоны концентраций оптически активных компонентов вод. Уточняется, что для «тренировки» нейросетей заданы диапазоны, соответствующие измеренным значениям $C_{x\pi a}$ в ходе натурных наблюдений в Северном море, в частности в зал. Немецкая бухта. По приводимым для верификации алгоритмов данным, наблюдаемые здесь максимальные $C_{x\pi a}$ в разы меньше таковых в Цимлянском вдхр. Также в документе (Doerffer, 2010) указано, что источником ошибки могут служить и некорректные результаты альтернативной атмосферной коррекции.

Обнаруженное несоответствие результатов интерпретации спектрометрических данных не может быть случайным и показывает, что для получения корректных результатов для оптически сложных BO с использованием съёмки OLCI предстоит проделать значительную работу по интеркалибрации спектрометрических данных для получения адекватных результатов по определению концентрации оптически активных компонентов, и в частности $C_{xл a}$. Известные работы в этом направлении демонстрируют разные подходы: сравнение известных процедур атмосферной коррекции и алгоритмов оценки $C_{xл a}$ и выбор наиболее соответствующего действительности (Kravitz et al., 2020); применение процедур атмосферной коррекции и алгоритмов оценки $C_{xл a}$, показавших хорошие результаты на данных предшествующего OLCI сканера MERIS (*анга*. Medium Resolution Imaging Spectrometer) (Moses et al., 2019; Smith et al., 2018); использование алгоритмов оценки $C_{xл a}$, слабочувствительных к ошибкам атмосферной коррекции (Mollaee, 2018).

Отдельно отметим, что сопоставление представленных на *puc. 2* данных показывает, что мультиспектральная информация OLCI принципиально не позволяет воспользоваться простым и перспективным методом оценки состояния водного объекта (Сухоруков и др., 2017), в котором по форме СКСЯ — соотношению величин КСЯ в узких спектральных каналах — определяют трофический статус водного объекта в реальном времени, практически во время съёмки (см. *таблицу*).

Заключение

Мультиспектральная информация спутникового спектрометра OLCI предназначена для решения определённого круга задач, в частности для оценки $C_{\rm xn\,a}$. Наглядное и удобное представление этой величины по данным природно-ресурсных спутниковых сканеров позволяет пользователям получать представление:

- о мгновенном распределении этого показателя по акватории крупного ВО на качественном уровне (за время сканирования объекта 1–2 мин);
- процессах, происходящих в крупных ВО при сравнении распределений $C_{_{\rm XЛ}\,a}$ за различные даты.

По данным мультиспектральной информации OLCI можно построить наглядное распределение концентрации хлорофилла *a* фитопланктона $C_{x_{n,a}}$ по Цимлянскому вдхр. (см. *рис. 3*). Однако абсолютные значения концентрации, извлечённые из этого «конечного продукта», оказываются занижены в разы, что подтверждается полученными нами оценками по гиперспектральной информации и по аналитическим данным. Максимальное значение по данным OLCI на исследуемой акватории в период экспедиции не превышает 25 мкг/дм³ (см. *рис. 3*), тогда как по нашим данным исследования (Сухоруков и др., 2020) эта концентрация может достигать 75–100 мкг/дм³ и даже более (см. *таблицу*). Попарное сравнение спектра коэффициента спектральной яркости и R_{rs} МСИ показывает, что МСИ OLCI не позволяет в полной мере оценить состояние водного объекта даже в понятиях трофности, предложенных в работе (Сухоруков и др., 2017).

Получение отрицательных значений *R*_{*rs*} по МСИ OLCI при обработке снимков до второго уровня приводит к получению физически невозможного ответа. Можно предположить, что возникает «вычислительный эффект» при проведении обработки (интерпретации) первичных данных, и в частности процедуры атмосферной коррекции, автоматического использования обработки по алгоритму, отлаженному для иных ВО и условий.

Таким образом, результат многоуровнего эксперимента на гиперэвтрофном ВО показал необходимость совершенствования алгоритмов интерпретации мультиспектральной спутниковой информации, а также необходимость использования гиперспектральной информации нижнего уровня для интеркалибрации спектрометрических данных по оптически сложным ВО в задачах природопользования.

Литература

- Вехов Д.А., Науменко А. Н., Горелов В. П., Голоколенова Т.Б., Шевлякова Т.П. Современное состояние и использование водных биоресурсов Цимлянского водохранилища (2009–2013 гг.) // Рыбохозяйственные исследования на водных объектах Европейской части России. СПб.: ФГБНУ ГосНИОРХ, 2014. С. 116–145. DOI: 10.13140/2.1.2469.7289.
- 2. Голубицкий Б. М., Левин И. М., Танташев М. В. Коэффициент яркости полубесконечного слоя морской воды // Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1974. Т. 10. № 11. С. 1235–1238.
- 3. ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *а*. М.: Изд-во стандартов, 1990. 15 с.
- 4. *Зеге Э. П.* Инженерные методы расчета световых полей в условиях многократного рассеяния. Распространение света в дисперсной среде. Минск: Наука и техника, 1982. С. 84–105.
- 5. Копелевич О. В. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 171 с.
- 6. РД 52.24.729.2010. Дистанционная спектрометрическая съемка водных объектов в видимом диапазоне волн с мостовых переходов. Ростов-на-Дону, 2010. 27 с.
- 7. *Сухоруков Б. Л., Новиков И. В.* Сравнительный анализ двух способов интерпретации дистанционных спектрометрических данных о состоянии водных экосистем // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 4. № 10. С. 944–949.
- 8. *Сухоруков Б. Л., Гарбузов Г. П., Никаноров А. М.* Оценка состояния водных объектов по спектрам коэффициента яркости // Водные ресурсы. 2000. № 5. С. 579–588.
- 9. *Сухоруков Б. Л., Ковалёва Г. Е., Никаноров А. М.* Способ оценки трофности водных объектов. Патент РФ 2632720. Рег. 09.10.2017.
- 10. *Сухоруков Б. Л., Решетняк Н. В., Ковалева Г. Е.* Биооптическая модель Нижнего Дона для оценки концентрации хлорофилла *а* фитопланктона по дистанционной спектрометрической информации // Наука Юга России. 2020. Т. 16. № 2. С. 41–50. DOI: 10.7868/S25000640200205.
- 11. Шифрин К. С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 280 с.
- Doerffer R. OLCI Level 2. Algorithm Theoretical Basis Document. Ocean Colour Turbid Water. Version 2.0. Document Ref: S3-L2-SD-03-C11-GKSS-ATBD / GKSS Research Center. Institute for Costal Research. 2010. 50 p. URL: https://sentinel.esa.int/documents/247904/349589/OLCI_L2_ATBD_ Ocean_Colour_Turbid_Water.pdf.
- 13. *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 Sensing of Environment. 2020. V. 237. Art. No. 111562. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111562.
- Liu H., He X., Li Q., Hu X., Ishizaka J., Kratzer S., Yang C., Shi T., Hu S., Zhou Q., Wu G. Evaluation of ocean colour atmospheric correction methods for Sentinel-3 OLCI using global automatic in-situ observations // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2021. 19 p. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3136243. URL: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9654183&isnumber=4358825.

- 15. *Mobley C. D.* Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // Applied Optics. 1999. V. 38(36). P. 7442–7455. DOI: 10.1364/ao.38.007442.
- Mograne 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 Sensing. 2019. V. 11. Art. No. 668. DOI: 10.3390/rs11060668.
- 17. *Mollaee S.* Estimation of phytoplankton chlorophyll-a concentration in the western basin of Lake Erie using Sentinel-2 and Sentinel-3 data: Master thesis / Univ. Waterloo. Ontario, Canada, 2018. 93 p.
- Moore G., Mazeran C., Huot J. P. MERIS ATBD 2.6. Case II.S Bright Pixel Atmospheric Correction. European Space Agency, 2017. Iss. 5.3. 82 p. URL: https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/MERIS_ATBD_2.6_v5.3%20-%202017%20-%20BPAC.pdf.
- 19. *Morel A.*, *Prieur L*. Analysis of variations in ocean color // Limnology and Oceanography. 1977. V. 22. No. 4. P. 709–722. DOI: 10.4319/lo.1977.22.4.0709.
- 20. Moses W.J., Gitelson A.A., Perk R. L., Gurlin D., Rundquist D. C., Leavitt B., Barrow T. M., Brakhage P. Estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters using airborne hyperspectral data // Water Research. 2012. V. 46(4). P. 993–1004. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.068.
- Moses W.J., Saprygin V., Gerasyuk V., Povazhny, V.V., Berdnikov S., Gitelson A.A. OLCI-based NIR-red models for estimating chlorophyll-a concentration in productive coastal waters — a preliminary evaluation // Environmental Research Communications. 2019. V. 1(1). Art. No. 011002. DOI: 10.1088/2515-7620/ aaf53c.
- 22. *Ritchie R.J.* Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls a, b, c and d and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents // Photosynthetica. 2008. V. 46. P. 115–126. DOI: 10.1007/s11099-008-0019-7.
- Sentinel-3 OLCI Marine User Handbook. EUMETSAT, 2021. Doc. No. EUM/OPS-SEN3/ MAN/17/907205. Iss. v2G e-signed. 48 p. URL: https://www-cdn.eumetsat.int/files/2021-03/ Sentinel-3%20OLCI%20Marine%20User%20Handbook.pdf.
- Smith M. E., Robertson Lain L., Bernard S. An optimized chlorophyll a switching algorithm for MERIS and OLCI in phytoplankton-dominated waters // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 15. P. 217–227. DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.002.

Informativeness of OLCI data compared to *in situ* hyperspectral measurements in assessing freshwater ecosystems trophic status: the Tsimlyansk Reservoir case

B. L. Sukhorukov^{1,2}, N. V. Reshetnyak², V. V. Saprygin³

¹ Water Problems Institute RAS, Rostov-on-Don 344090, Russia E-mail: bls-phys@yandex.ru

² Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don 344090, Russia E-mail: nvr-phys@yandex.ru

³ Russian Information, Analytical and Research Water Management Center Rostov-on-Don 344000, Russia E-mail: vlad rostov@inbox.ru

The data obtained by remote spectrometric measurements during a multilevel synchronous experiment in August 2020 performed at the near-dam reach of the Tsimlyansk Reservoir, are presented. The phytoplankton chlorophyll *a* concentration, $C_{chl a}$, was determined from measurements performed at three levels. The data on the upper, satellite level were obtained from the site of the European Organization for Satellite Meteorology (EUMETSAT) with an OLCI multispectral scanner (Sentinel-3B). The remote recording was carried out with an S41 spectrometer (Laser LS) from the vessel from a high of 2 m. The spectral range of the portable device is 389–808 nm, the spectral resolution is 1.8 nm. At this level $C_{chl a}$ was determined using previously constructed bio-optical models (BOM). At the same level water samples were taken simultaneously with the spectrometric survey for the subsequent analytical determination of $C_{chl a}$ in the laboratory conditions. Comparison of the results obtained at different levels revealed a number of inconsistencies in the assessment of $C_{chl a}$ for the water body studied in

a hypereutrophic state. The results of evaluations of C_{chla} differ by several times. Possible reasons of the noted inconsistencies were discussed. Insufficient informativeness of multispectral data for assessing the trophic status of such water bodies was demonstrated. There is a necessity of clarifying the algorithms for the interpretation of satellite data for hypereutrophic water bodies.

Keywords: multilevel experiment, remote spectrometry, remote sensing reflectance (R_{rs}) , phytoplankton, chlorophyll *a*

Accepted: 22.02.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-239-252

References

- 1. Vekhov D.A., Naumenko A.N., Gorelov V.P., Golokolenova T.B., Shevlyakova T.P., The current state and use of aquatic biological resources of the Tsimlyansk reservoir (2009–2013), In: *Rybokhozyaistvennye issledovaniya na vodnykh ob"ektakh Evropeiskoi chasti Rossii*, Saint Petersburg: FGBNU GosNIORKh, 2014, pp. 116–145 (in Russian), DOI: 10.13140/2.1.2469.7289.
- 2. Golubickii B. M., Levin I. M., Tantashev M. V., Luminance coefficient of a semi-infinite layer of seawater, *Izvestiya Akademii nauk SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 1974, Vol. 10, No. 11, pp. 1235–1238 (in Russian).
- 3. *GOST 17.1.4.02-90. Voda. Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya khlorofilla a* (GOST 17.1.4.02-90. Water. Method for the spectrophotometric determination of chlorophyll *a*), Moscow: Izd. standartov, 1990, 15 p. (in Russian).
- 4. Zege E. P., *Inzhenernye metody rascheta svetovykh polei v usloviyakh mnogokratnogo rasseyaniya*. *Rasprostranenie sveta v dispersnoi srede* (Engineering methods for calculating light fields under multiple scattering conditions. Propagation of light in a dispersed medium), Minsk: Nauka i tehnika, 1982, pp. 84–105 (in Russian).
- 5. Kopelevich O.V., *Optika okeana. T. 1. Fizicheskaya optika okeana* (Ocean Optics. Vol. 1. Physical Ocean Optics), Moscow: Nauka, 1983, 371 p. (in Russian).
- 6. *RD 52.24.729.2010. Distantsionnaya spektrometricheskaya s"emka vodnykh ob"ektov v vidimom diapazone voln s mostovykh perekhodov* (RD 52.24.729.2010. Remote spectrometric survey of water bodies in the visible wavelength range from bridge crossings), Rostov-on-Don, 2010, 27 p. (in Russian).
- 7. Sukhorukov B. L., Novikov I. V., Comparative analysis of two methods of interpretation of remote spectrometric data on the state of aquatic ecosystems, *Optika atmosfery i okeana*, 2001, Vol. 4, No. 10, pp. 944–949 (in Russian).
- 8. Sukhorukov B. L., Garbuzov G. P., Nikanorov A. M., Assessment of the state of water bodies by the spectra of the brightness coefficient, *Vodniye resursy*, 2000, No. 5, pp. 579–588 (in Russian).
- 9. Sukhorukov B. L., Kovaleva G. E., Nikanorov A. M., *Sposob otsenki trofnosti vodnykh ob"ektov* (Method for assessing the trophicity of water bodies), Patent RU 2632720, Reg. 09.10.2017 (in Russian).
- 10. Sukhorukov B. L., Reshetnyak N. V., Kovaleva G. E., Bio-optical model of the Lower Don for assessing the phytoplankton chlorophyll *a* concentration by remote sensing spectrometric information, *Nauka Yuga Rossii*, 2020, Vol. 16, No. 2, pp. 41–50 (in Russian), DOI: 10.7868/S25000640200205.
- 11. Shifrin K. S., *Vvedenie v optiku okeana* (Introduction to Ocean Optics), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 280 p. (in Russian).
- Doerffer R., Algorithm Theoretical Basis Document, Ocean Colour Turbid Water, Version 2.0, Document Ref: S3-L2-SD-03-C11-GKSS-ATBD, GKSS Research Center, Institute for Costal Research, 2010, 50 p., available at: https://sentinel.esa.int/documents/247904/349589/OLCI_L2_ATBD_Ocean_Colour_Turbid_ Water.pdf.
- 13. 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 Sensing of Environment*, 2020, Vol. 237, Art. No. 111562, DOI: 111562. 10.1016/j.rse.2019.111562.
- Liu H., He X., Li Q., Hu X., Ishizaka J., Kratzer S., Yang C., Shi T., Hu S., Zhou Q., Wu G., Evaluation of ocean colour atmospheric correction methods for Sentinel-3 OLCI using global automatic in-situ observations, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 19 p., DOI: 10.1109/TGRS.2021.3136243, available at: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9654183&isnumber=4358825.
- 15. Mobley C.D., Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements, *Applied Optics*, 1999, Vol. 38(36), pp. 7442–7455, DOI: 10.1364/ao.38.007442.
- Mograne 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 Sensing*, 2019, Vol. 11(6), Art. No. 668, DOI: 10.3390/rs11060668.

- 17. Mollaee S., *Estimation of phytoplankton chlorophyll-a concentration in the western basin of Lake Erie using Sentinel-2 and Sentinel-3 data: Master thesis*, Univ. Waterloo, Ontario, Canada, 2018, 93 p.
- 18. Moore G., Mazeran C., Huot J. P., *MERIS ATBD 2.6. Case II.S Bright Pixel Atmospheric Correction*, European Space Agency, 2017, Issue 5.3, 82 p., available at: https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/MERIS_ATBD_2.6_v5.3%20-%202017%20-%20BPAC.pdf.
- 19. Morel A., Prieur L., Analysis of variations in ocean color, *Limnology and Oceanography*, 1977, Vol. 22, No. 4, pp. 709–722, DOI: 10.4319/lo.1977.22.4.0709.
- 20. Moses W.J., Gitelson A.A., Perk R. L., Gurlin D., Rundquist D. C., Leavitt B., Barrow T. M., Brakhage P., Estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters using airborne hyperspectral data, *Water Research*, 2012, Vol. 46(4), pp. 993–1004, DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.068.
- 21. Moses W.J., Saprygin V., Gerasyuk V., Povazhny, V.V., Berdnikov S., Gitelson A.A., OLCI-based NIR-red models for estimating chlorophyll-a concentration in productive coastal waters a preliminary evaluation, *Environmental Research Communications*, 2019, Vol. 1, Art. No. 011002, DOI: 10.1088/2515-7620/aaf53c.
- 22. Ritchie R.J., Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls a, b, c and d and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents, *Photosynthetica*, 2008, Vol. 46, pp. 115–126, DOI: 10.1007/s11099-008-0019-7.
- 23. Sentinel-3 OLCI Marine User Handbook, EUMETSAT, 2021, Doc. No. EUM/OPS-SEN3/ MAN/17/907205, Issue v2G e-signed, 48 p., available at: https://www-cdn.eumetsat.int/files/2021-03/ Sentinel-3%20OLCI%20Marine%20User%20Handbook.pdf.
- 24. Smith M. E., Robertson Lain L., Bernard S., An optimized chlorophyll a switching algorithm for MERIS and OLCI in phytoplankton-dominated waters, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 15, pp. 217–227, DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.002.