

Применение методов обработки и анализа космических снимков для изучения эвтрофированных водоёмов (обзор)

© 2020. Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с., Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
В. П. Савиных^{1,3}, д. т. н., профессор, академик РАН,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар,

ул. Коммунистическая, д. 28,

³Московский государственный университет геодезии и картографии,
105064, Россия, г. Москва, Гороховский переулок, д. 4,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

В обзоре рассмотрены существующие подходы и алгоритмы, применяемые для оценки качества воды внутренних водоёмов в различных климатических зонах, приведены формулы для расчёта наиболее часто используемых спектральных индексов. Показано, что оптические свойства вод различаются в зависимости от трофического статуса водоёма, от сезона года, физико-химического состава воды, видового состава фитопланктона и других факторов.

В настоящее время для мониторинга состояния водных объектов со сложными оптическими условиями применяются как традиционные методы, так и новые, усовершенствованные алгоритмы. Используются различные методы атмосферных коррекций и откалиброванные спектральные индексы, разрабатываются классификации водоёмов по наличию в них частиц фитопланктона, взвешенных частиц органического и неорганического происхождения, окрашенных растворённых органических веществ.

Ключевые слова: внутренние воды, эвтрофирование, трофический статус водоёма, фитопланктон, мутность, прозрачность, дистанционное зондирование Земли.

Application of methods for processing and analysis of satellite images for the study of eutrophied reservoirs (review)

© 2020. T. I. Kutyavina¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636, G. Ya. Kantor^{1,2} ORCID: 0000-0002-6462-6702,

T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047, V. P. Savinykh^{1,3} ORCID: 0000-0002-3259-6721,

¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Institute of Biology of Komi Scientific Centre

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

³Moscow State University of Geodesy and Cartography,

4, Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, Russia, 105064,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

The review discusses the existing approaches and algorithms used to assess the water quality of inland water bodies in various climatic zones, provides formulas for calculating the most commonly used spectral indices (Chl-*a*, MCI, NDVI, Turb). The possibilities of using data of remote sensing of the Earth from various sensors (Modis-Terra, Modis-Aqua, Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8, Sentinel-2, Sentinel-3) to study the quality of water in inland waters are described. Many researchers note the great potential of the Sentinel-3 satellite for studying inland waters with complex optical conditions (high turbidity, color, colored dissolved organic matter (CDOM) and total suspended matter). It is shown that the optical properties of inland waters differ depending on the trophic status of the reservoir, on the season of the year, the physicochemical composition of water, the species composition of phytoplankton and other factors. Currently, both traditional methods and new improved algorithms are used to monitor the state of water bodies with complex opti-

cal conditions. Various methods of atmospheric corrections and calibrated spectral indices are used, classifications of reservoirs by the presence of phytoplankton particles, suspended particles of organic and inorganic matter, and CDOM are developed. It was noted that the concentration of chlorophyll *a* and the turbidity of the water are the most important biophysical parameters used to assess the quality of water and determine the ecological status of inland waters.

Keywords: inland waters, eutrophication, trophic status of a reservoir, phytoplankton, turbidity, transparency, remote sensing of the Earth.

Проблема эвтрофирования является актуальной для многих пресноводных и морских экосистем [1–3]. С 1970-х гг. и по настоящее время разрабатываются различные модели развития процессов эвтрофикации в водных объектах [4]. Основные переменные в этих моделях, требующие получения фактических данных – обилие фитопланктона, или его отдельных составляющих, концентрации биогенных элементов (азота и фосфора) и растворённого кислорода. В относительно новых моделях большое значение уделено макрофитам и их возможной конкуренции с фитопланктоном. Важнейшую роль при изучении химического состава воды, видового состава фитопланктона и высшей водной растительности играют полевые исследования. В настоящее время они всё чаще дополняются методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [5]. Первые подобные работы за рубежом начали проводить в 1990-х [6], а в России – в 2000-х гг., при этом исследования чаще проводились для морских акваторий [7, 8], реже – для крупных внутренних водоёмов [9]. В последнее десятилетие увеличилось количество работ с применением комплексного подхода к изучению эвтрофикации, включающего полевые исследования в сочетании с анализом спутниковых изображений водных объектов и численным моделированием развития процессов эвтрофирования [4, 10]. Появились работы по изучению процессов эвтрофикации методами ДЗЗ в малых по площади зеркалах озёрах, водоёмах гидроэлектростанций, водохранилищах.

Цель настоящей работы – проанализировать современные методы оценки качества воды в эвтрофированных внутренних водоёмах с использованием данных дистанционного зондирования Земли, оценить их достоинства и недостатки.

Дистанционное обнаружение пигментов фитопланктона

При эвтрофикации в водных объектах часто наблюдается массовое развитие фитопланктона, или «цветение» воды. Это приводит к снижению рыбохозяйственного и рекреа-

ционного потенциалов водоёмов, оказывает негативное влияние на системы очистки воды из водных объектов для питьевого водоснабжения, может приводить к аллергическим реакциям у животных и человека. В связи с этим, дистанционное обнаружение «цветения» водоёмов имеет важное практическое значение. Идентификация водной растительности с бортов аэрокосмических аппаратов возможна на основе анализа спектров отражения, характеризующихся существенными отличиями при отражении волн излучения различной длины. К наиболее разработанным техникам работы со спектральной информацией относятся так называемые «индексные» изображения. На основе комбинации значений яркости в определённых каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, и расчёта по этим значениям «спектрального индекса» объекта строится изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что и позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние [11]. Для обнаружения и оценки развития фитопланктона наиболее часто применяются различные варианты индекса хлорофилла *a* (Chl-*a*) [9, 12–14], цианобактериальный индекс CI [15] и др. (табл.).

В работе [58] для обнаружения «цветения» цианобактерий (ЦБ) в оз. Севан были использованы космические снимки со спутника Sentinel-2. Авторы использовали комбинацию каналов В7-В5-В3 после атмосферной коррекции снимков при помощи модуля SCP программы Quantum GIS. Предложенная комбинация каналов позволяет получить изображение, близкое к естественным цветам, отделять на нём мелководья от прибрежной полосы и выделять участки «цветения».

Результаты исследования динамики пространственно-временного распределения пятен «цветения» на Рыбинском водохранилище на основе спутниковых данных, полученных 5 сенсорами (TM Landsat 5, ETM+ Landsat 7, OLI Landsat 8, MERIS Envisat и ASAR Envisat) представлены в работе [5]. По мнению авторов, для качественной оценки интенсивности «цветения» ЦБ Рыбинского водохранилища наиболее подходят данные сенсора OLI Landsat 8 (4-3-2 каналы).

Таблица / Table

Спектральные индексы, применяемые для изучения внутренних водоёмов / Spectral indices used to study inland waters

| Обозначение индекса Index designation | Назначение Function | Формула для расчёта Formula for calculation | Использован в работе Quoting at work | Сенсор, космический аппарат Sensor, spacecraft | Первоисточник Original references |
|---|---|---|---|---|--------------------------------------|
| chl_ <i>a</i> (<i>MERIS</i>) | определение хлорофилла <i>a</i> (Chl- <i>a</i>) при наличии взвешенных веществ, окрашенного растворённого органического вещества | $R_{490}^{-1} / R_{560}^{-1}$, здесь и далее <i>R</i> – отражательная способность | [12] | MERIS | [16] |
| | | $R_{665}^{-1} / R_{708}^{-1}$ | [17] | | |
| | определение Chl- <i>a</i> в мутных водах | $R_{753} \cdot (R_{665}^{-1} - R_{708}^{-1})$ | [12] | | [12] |
| | определение Chl- <i>a</i> , учитываются эффекты обратного рассеяния и эффекты поглощения из-за пигмента фикоцианина | $\left\{ \frac{R_{708}}{R_{665}} \cdot [a_{w708} + b_b] \right\} - b_b - a_{w665} \cdot \delta^{-1}$, где <i>a_w</i> – эффекты поглощения от чистой воды, <i>b_b</i> – обратное рассеяние от взвешенных веществ, δ^{-1} – коэффициент, учитывающий мешающее влияние фикоцианина | [18] | | [18] |
| Chl- <i>a</i> | определение Chl- <i>a</i> , не учитываются поглощение вспомогательными пигментами | $\left\{ \frac{R_{708} + b_b}{R_{665} + b_b} \cdot [a_{w708} + b_b] \right\} - b_b - a_{w665}$ | [19] | | [19] |
| | определение Chl- <i>a</i> | $(R_{\lambda_3} - R_{\lambda_1}) \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1}$, где λ_1 и λ_3 – значения излучения или отражения, используемые для создания базовой линии λ_2 | [13, 20, 21] | MERIS, Sentinel-3 OLCI | [22–25] |
| – | | $0,0023 \cdot B03 - 0,0084 \cdot B04 + 0,010 \cdot B05 - - - 0,0036 \cdot B06 + 0,903$, где B03–B06 – номера каналов | [26] | Sentinel-2A | [26] |
| TBDO (triband model of Dall’Olimo et al.) | определение Chl- <i>a</i> в мутных продуктивных водах | $R_{740} \cdot \left(\frac{1}{R_{665}} - \frac{1}{R_{705}} \right)$ | [27] | Sentinel-2 (A, B) | [28–30] |

| | | | | | |
|--|---|--|----------|--|------|
| C_a | определение Chl- <i>a</i> | $10,0^{(0,368-2,814R_{4,E}+1,456R_{4,E}^2+0,768R_{4,E}^3-1,292R_{4,E}^4)}$ где $R_{4,E} = \log_{10}(R_{560}^{443} / R_{560}^{490} > R_{560}^{510} > R_{560}^{560})$ | [34] | MERIS | [34] |
| Chl- <i>a</i> | | $(35,75 \cdot \frac{R_{709}}{R_{665}} - 19,3)^{1,124}$ $R_{709} / R_{665} \approx [a_{ph}(665) + a_w(665)] / a_w(709)$ где a_{ph} – коэффициент поглощения фитопланктона, a_w – коэффициент поглощения чистой воды | [32] | | [32] |
| [Chl- <i>a</i>] | | $223,86 \cdot [R_{b,10} / R_{b,7} - R_{b,10} / R_{b,9}] + 23,95$ где b_7, b_9 и b_{10} обозначают спектральные каналы 7 (660–670 нм), 9 (703,75–713,75 нм) и 10 (750–757,5 нм) | [33] | | [33] |
| Maximum chlorophyll index (MCI) | для последующего выбора алгоритма оценки Chl- <i>a</i> | $R_{709} - [R_{665} + (R_{754} - R_{665}) \cdot \frac{709 - 665}{754 - 665}]$ | [20] | | [20] |
| – | определение Chl- <i>a</i> $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и λ_4 соответствуют каналам B3 (560 нм), B4 (665 нм), B5 (705 нм) и B6 (740 нм), соответственно. λ_x и λ_y относятся к комбинациям полос «B4 и B3», «B5 и B3», «B5 и B4», «B6 и B3» и «B6 и B4» | $\frac{R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1}} \cdot \frac{R_{\lambda_3}}{R_{\lambda_2}} \cdot \frac{R_{\lambda_4}}{R_{\lambda_1}} \cdot \frac{R_{\lambda_4}}{R_{\lambda_2}}$ $\left(\left(35,75 \cdot \frac{R_{\lambda_3}}{R_{\lambda_2}} - 19,3 \right)^{1,124} \right)$ $\left(\left(\frac{1}{R_{\lambda_2}} - \frac{1}{R_{\lambda_3}} \right) \cdot R_{\lambda_4} \right)$ | [35] | MSI/ Sentinel-2 | [35] |
| Normalized difference chlorophyll index (NDCI) | | $\frac{R_{\lambda_x} - R_{\lambda_y}}{R_{\lambda_x} + R_{\lambda_y}}$ | [36] | | [36] |
| OC2_490 | определение Chl- <i>a</i> | R_{490} / R_{555} | [37] | | [37] |
| – | определение фикоцианина | R_{740} / R_{665} | [38] | | [38] |
| NDVI | определение водной растительности | $\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$ | [39] | Sentinel-2 Sentinel-2 Sentinel-2, Landsat 5 | [39] |
| | | | [40, 41] | | [42] |

Окончание таблицы

| Обозначение индекса Index designation | Назначение Function | Формула для расчёта Formula for calculation | Использован в работе Quoting at work | Сенсор, космический аппарат Sensor, spacecraft | Первоисточник Original references |
|---|--|---|---|---|--------------------------------------|
| Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI ₇₀₅) | определение площади листьев макрофитов | $[(\text{Re}f_{740\text{nm}} - \text{Re}f_{705\text{nm}}) - 0,2(\text{Re}f_{740\text{nm}} - \text{Re}f_{560\text{nm}})] \frac{\text{Re}f_{740\text{nm}}}{\text{Re}f_{705\text{nm}}}$ <p>где $\text{Re}f_{560\text{nm}}$, $\text{Re}f_{705\text{nm}}$ и $\text{Re}f_{740\text{nm}}$ – атмосферно скорректированные коэффициенты отражения в полосах 3, 5 и 6 соответственно</p> | [43] | Sentinel-2A | [44] |
| Leaf Area Index (LAI) | | $0,640(\pm 0,062) \cdot \text{MCARI}_{705} + 0,512(\pm 0,052)$ range (0,5 – 2,0 m ² m ⁻²) | | | [48] |
| Turb | определение мутности воды | $\frac{R_{865}}{R_{850} / R_{550}}$ $R_{810} - [R_{770} + R_{840}] / 2$ | [46] | Sentinel-2 (A, B) | [47, 48] [49, 50] |
| Turbidez (NTU) | | $2,0846 (R_{490} / R_{560})^{-3,2626}$ | [52] | | [51] |
| – | | R_{705} | [53] | | [52] |
| – | определение прозрачности воды | R_{560} / R_{704} | [54] | | [53] |
| – | соотношение между Chl- <i>a</i> и неорганическими взвешенными веществами в воде (ISM) в воде | R_{700} / R_{675} | [57] | | [55, 56] [57] |

Максимальный индекс концентрации хлорофилла (MCI), впервые использованный для анализа данных с MERIS [20], и созданный на его основе набор количественных индексов для определения интенсивности и продолжительности «цветения» водорослей были применены к датчику OLCI на спутнике Sentinel-3 (табл.). В настоящее время они регулярно используются Министерством окружающей среды Канады для полностью автоматизированного мониторинга «цветения» нескольких мутных эвтрофных озёр, в частности для оз. Виннипег [21]. Расчёт MCI для оз. Виннипег в работе [21] выполнен по данным, полученным с MERIS, с использованием алгоритма red/near-infrared (red-NIR), который успешно применяется для мутных эвтрофных вод и считается достаточно независимым от влияния большого количества растворённых органических веществ. Этот же алгоритм применяется для обработки данных со спутника Sentinel-2, например, в работе [59]. Для обработки снимков с MERIS авторы использовали свободно доступный набор инструментов BEAM 4.6. Расчёт MCI проводили с применением расширения модуля FLH/MCI Processor 1.6.100, используя комбинации каналов B08-B09-B10. В то же время, на оз. Куммеров в Германии результаты оценки содержания Chl-*a* по данным с MERIS, полученным с применением свободно доступного алгоритма FUB/WeW, оказались в среднем на 20% выше, чем измерения *in situ* [60]. В работе [13] отмечается, что данные MERIS позволяют получать адекватные оценки концентрации Chl-*a*, но в большинстве случаев необходима атмосферная коррекция исходных снимков. Авторами этой работы показаны результаты применения четырёх моделей атмосферной коррекции (6SV1, iCOR, C2RCC и POLYMER) для четырёх внутренних малых водоёмов в Африке. Наиболее перспективной моделью оказалась 6SV1, а для оценки содержания Chl-*a* в олиготрофных и слабо мезотрофных водах подходит модель C2RCC.

Содержание Chl-*a* в водохранилище Биль-Эль-Уидан (Марокко), рассчитанное по данным спутника Sentinel-2 с использованием комбинации каналов B03-B04-B05-B06 (табл.) в 2017 г., тесно коррелировало с данными *in situ* ($R^2 = 0,78$) [26].

Возможности использования снимков со спутников Sentinel-2 и Sentinel-3 для определения концентрации Chl-*a* в олиготрофном и эвтрофном озёрах в Италии представлены в работе [61]. Атмосферную коррекцию снимков авторы работы осуществ-

ляли с использованием кода 6SV через интерфейс REMOTE SENSING LETTERS 979, для построения карт концентраций Chl-*a* использовали инструмент BOMBER, описанный в работе [62]. Авторы отмечают, что, несмотря на сопоставимость результатов, полученных с разных спутников, наиболее близкие значения к *in situ* были получены с помощью прибора MultiSpectral Instrument (MSI), установленного на Sentinel-2.

Согласно работе [27], полосы датчика OLCI Sentinel-3 с длинами волн 665, 674 и 681 нм имеют большой потенциал для точной оценки содержания Chl-*a* в эвтрофных водах. В работе [63] отмечено, что индекс концентрации Chl-*a*, рассчитанный по данным Sentinel-3 для оз. Балатон (Венгрия), показал завышенные результаты по сравнению с полевыми данными. Авторы пишут, что при сильных ветрах для озера характерна высокая мутность воды, и повышенные значения индекса связывают с высокой чувствительностью аппаратуры Sentinel-3A OLCI Full Resolution Level-2 к общему взвешенному веществу в воде.

О влиянии окрашенных взвешенных и растворённых в воде органических веществ на определение Chl-*a* во внутренних водоёмах говорится в работе [64]. Авторы предложили новый квазианалитический алгоритм (QA_{OMW}) для определения специфических оптических свойств вод малопродуктивных внутренних водоёмов, в которых преобладает не фитопланктон, а окрашенные растворённые органические вещества (CDOM) и неорганические частицы (non-algal particles (NAP)). Он заключается в определении коэффициента поглощения фитопланктона по разнице оптических плотностей всех взвешенных в воде частиц, частиц CDOM и детрита. Предложенный QA_{OMW} также отличается от использованных ранее для изучения оптических свойств внутренних водоёмов выбором эталонной длины волны ($\lambda = 709$ нм).

В работе [34], выполненной на примере нескольких азиатских озёр, для уменьшения влияния взвешенных веществ, рекомендуется применять гибридный метод оценки концентраций Chl-*a*. Метод включает в себя 3 алгоритма (табл.), предложенных ранее для оценки концентрации Chl-*a* во внутренних водоёмах с разной мутностью и трофическим статусом (от олиго- до гипертрофных): сине-зелёный алгоритм OC4Ev4 [31], показавший хорошие результаты в водоёмах с низкими значениями мутности и содержанием Chl-*a* до 10 мг/м³; двухполосный алгоритм

red-NIR RN2Gi10 [32], наиболее подходящий для водоёмов с умеренным содержанием Chl-*a* (10–25 мг/м³) и алгоритм красного диапазона NIR на основе трёхполосных индексов SAMO-LUT [33] (при содержании Chl-*a* более 25 мг/м³). Выбор одного из перечисленных алгоритмов основан на предварительном расчёте МСИ для объекта изучения (табл.). Авторы утверждают, что предложенный гибридный алгоритм имеет потенциал для использования в качестве оперативного инструмента для мониторинга Chl-*a* в водах с широко варьирующимися трофическими условиями без необходимости репараметризации.

Ещё один алгоритм оценки биомассы фитопланктона, подходящий для анализа разных по трофности типов вод, описан в работе [35]. Предложенный оптический гибридный алгоритм определения Chl-*a* (optical hybrid Chl-*a* algorithm (ОНА)) по данным спутника Sentinel-2 включает в себя комбинацию алгоритмов для трёх оптических классов водоёмов, отличающихся по уровню трофности. На примере различных водоёмов в регионе Валенсии (Испания) показано, что в эвтрофных и гипертрофных водах концентрацию Chl-*a* более достоверно позволяет определить скорректированный трёхполосный алгоритм ТВДО [27], а в олиго- и мезотрофных – двухполосный алгоритм ОС2_490 [33] (табл.).

В работе [65] для определения содержания Chl-*a* в воде авторы предлагают использовать мультисенсорный подход. По мнению авторов, временное и пространственное разрешение при использовании только одного спутникового датчика может ограничивать его информационную ценность, а объединение данных от различных спутниковых датчиков с высоким пространственным/низким временным и низким пространственным/высоким временным разрешением теоретически обеспечивает ежедневный мониторинг состояния водоёма. Содержание Chl-*a* в работе [65] оценивали по данным, полученным с 5 различных датчиков MODIS-Terra, MODIS-Aqua, Landsat 8, Landsat 7 и Sentinel-2A. Наиболее близкими к *in situ* данным оказались результаты, полученные при помощи Landsat 8 и Sentinel-2A, однако авторы отмечают, что они требуют дополнительных количественных оценок.

В некоторых случаях индексы оценки концентрации Chl-*a* в воде не позволяют получить достоверные данные о наличии или биомассе фитопланктона в водоёме. Это может быть связано как с мешающим влиянием мутности и/или цветности воды, так и с отличием опти-

ческих свойств разных отделов водорослей. В оз. Эри в 2017 г. во время наземных исследований были обнаружены массовые скопления ЦБ родов *Aphanothece* и *Synechococcus*, богатых красным пигментом фикоэритрином, однако использование алгоритмов определения «цветения» фитопланктона на основе отношения синего к зелёному и расчёт индексов МСИ и СИ по спутниковым данным не позволил в полной мере оценить биомассу этих ЦБ [14]. В работе [39] по изучению эвтрофированных водоёмов был применён алгоритм для оценки концентрации пигмента фикоцианина (табл.), имеющего синюю окраску, по изображениям со спутника Sentinel-2 (А и В), обработанным с помощью программного обеспечения SNAP (Brockmann Consult), корреляция с концентрацией фикоцианина, измеренной *in situ*, составила $R^2 = 0,775$. Авторы отмечают, что предложенный ими индекс подходит для обнаружения ЦБ по данным Sentinel-2, в том числе ЦБ рода *Microcystis*. В работе [66] для обнаружения фикоцианина использована полоса OLCI Sentinel-3 с длиной волны 620 нм. Авторы работы отмечают более широкие возможности продукта OLCI Sentinel-3 для обнаружения различных пигментов фитопланктона помимо Chl-*a*.

Дистанционное обнаружение высших водных растений

Существуют спектральные индексы, позволяющие обнаружить не только фитопланктон, но и высшие растения на акватории водоёмов. Например, индекс NDVI, который обычно применяется для определения состояния наземной растительности, главным образом в сельскохозяйственной отрасли, также применим для оценки водной растительности (табл.). В работе [40] NDVI применяли для сравнения развития водной растительности в системе, состоящей из двух водохранилищ. В этой работе отмечено, что спутниковые данные Sentinel-2 позволяют оценивать заросли растений, только если их ширина составляет не менее 10 м. Индекс NDVI, рассчитанный по данным со спутника Landsat 5, был применён нами для определения границ водохранилищ в Кировской области [41]. В ходе работы было отмечено, что данный индекс также может быть использован для оценки развития водной растительности в водоёмах региона. В работе [43] по данным Sentinel-2A был рассчитан индекс площади листьев макрофитов (LAI) в мелководной системе озёр в Италии. Авто-

ры использовали для расчёта LAI модифицированный индекс коэффициента поглощения хлорофилла (MCARI705) [45] (табл.). В работе отмечено, что величина LAI аллохтонных и инвазивных видов макрофитов (таких, как *Nelumbo nucifera* и *Ludwigia hexapetala*) в исследованных озёрах была выше по сравнению с LAI автохтонных видов растений (*Trapa natans* и *Nuphar lutea*).

Дистанционное определение прозрачности и мутности внутренних вод

Прозрачность и мутность являются одними из основных показателей при исследовании качества воды внутренних водоёмов [52], а также косвенным признаком развития фитопланктона.

В работе [46] для оценки мутности по данным Sentinel-2 в ультра-мутных водах озёр Синдзи и Накауми (Япония), водохранилища Вааль-Дам (Южная Африка) были применены двухполосная (2-ВМ) и трёхполосная модели (3-ВМ) (табл.), корреляция с данными *in situ* составила 0,7. Авторы работ [52, 53] отмечают, что для определения мутности по данным спутника Sentinel-2 в мелководных лагунах, таких как Альбуфера (Испания), подходит отношение отражательной способности при длинах волн 490 и 705 нм (табл.). Авторы другой работы [54], выполненной на примере этой же лагуны, использовали для определения прозрачности три различных алгоритма, первоначально разработанных для аппаратуры MSI на борту Sentinel-2 и для MERIS. Они провели калибровку индексов по данным *in situ*. Для оценки прозрачности воды в лагуне Альбуфера наиболее подходящим оказалось отношение R_{560}/R_{704} (табл.), однако авторы отмечают, что при использовании предложенного алгоритма могут быть недооценены высокие значения мутности. Авторы работы [67] для определения прозрачности воды оз. Манингау (Индонезия) использовали данные Landsat TM/ETM+. В отличие от других работ, в этой для оценки прозрачности предложено использовать соотношения полос синий/зелёный и красный/зелёный. Всего авторами было проанализировано 17 различных моделей оценки прозрачности воды, проведена их валидация (R^2 для разных моделей составила от 0,25 до 0,60).

Для оценки прозрачности воды в водоёмах с различным трофическим статусом в бассейне р. Жукар использовали индексы, основанные

на отношении отражательной способности в синей и зелёной областях спектра, а также в синей и красной. Минимальная погрешность определения (13%) была при использовании индекса R_{490}/R_{560} [52] (табл.). В указанной работе апробированы три метода атмосферной коррекции: Polymer, C2RCC и C2X [52] для изображений, полученных со спутника Sentinel-2. Авторы отметили, что наиболее близкие к *in situ* значения удаётся получить при коррекции с помощью Polymer.

Аппаратура спутника Sentinel-3А позволяет дистанционно определять не только прозрачность воды, но и CDOM и общее количество взвешенных веществ (TSM) [59]. Авторы работы [68] доказали, что спутниковые данные Sentinel-3А могут быть использованы для отдельного определения концентраций неорганических и органических взвешенных веществ, которые по-разному влияют на оптические свойства и качество воды. В данной работе на примере озёр в бассейне р. Янцзы выявлена тесная корреляция между концентрацией органических твёрдых взвешенных веществ (SPOM) и коэффициентом поглощения фитопланктона ($R = 0,76$) и неорганических твёрдых взвешенных веществ (SPIM) и коэффициентом поглощения частиц не из водорослей ($R = 0,73$).

Заключение

Свободный доступ к космическим снимкам с различных спутников в последние 5–10 лет существенно расширил возможности применения ДЗЗ для изучения процессов эвтрофикации во внутренних водоёмах. В настоящее время разработано множество методов для обнаружения и изучения динамики фитопланктона и высших водных растений, оценки прозрачности и мутности воды, наличия в ней органических и неорганических взвешенных веществ, биогенных элементов. Анализ литературных данных показал, что применение одних и тех же алгоритмов на разных водоёмах не всегда позволяет получать достоверные результаты, поэтому актуальным направлением деятельности остаётся разработка региональных алгоритмов. Большинство авторов рекомендуют проводить калибровку применяемых спектральных индексов на конкретных водоёмах, учитывая их трофический статус, так как оптические свойства олиго-, мезо- и эвтрофных вод сильно отличаются. Для водоёмов со сложными оптическими условиями рекомендуется применять комбинирование

различных алгоритмов определения фитопланктона, мутности воды. Также для получения более точных данных, особенно для изучения сильно эвтрофных и мутных вод, рекомендуется проводить атмосферную коррекцию исходных комических снимков. Использование указанных приёмов позволяет существенно повысить точность применяемых алгоритмов при ДЗЗ внутренних водоёмов.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-86.2019.5).

References

1. Rast W., Thornton J.A. Trends in eutrophication research and control // *Hydrological processes*. 1996. V. 10. P. 295–313.
2. Sirenko L.A., Gavrilenko M.Ya. “Blooming” of water and eutrophication. Kiev: Naukova dumka, 1978. 230 p. (in Russian).
3. Paerl H.W. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine and inland waters // *Limnol. Oceanogr.* 1988. V. 33. No. 4. Part 2. P. 823–847.
4. Vin on-Leite B., Casenave C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 651. P. 2985–3001. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.320
5. Lavrova O.Yu., Solovov D.M., Strochkov A.Ya., Shendrik V.D. Satellite monitoring of color algae in the Rybinsk Reservoir // *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014. V. 11. No. 3. P. 54–72 (in Russian).
6. Yang M.-D., Merry C.J., Sykes R.M. Integration of water quality modeling, remote sensing, and GIS // *Journal of the American Water Resources Association*. 1999. V. 35 (2). P. 253–263. doi: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03587.x
7. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Saling I.V., Vazyulya S.V., Burenkov V.I. Seasonal and interannual variability of the bio-optical characteristics of the waters of the surface layer of the Barents, White, Black and Caspian seas according to satellite data // *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2015. V. 8. No. 1. P. 7–16 (in Russian).
8. Cokacar T., Oguz T., Kubilay N. Satellite detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea // *Deep-Sea Research*. 2004. Part I. V. 51. P. 1017–1031.
9. Tikhomirov O.A., Bocharov A.V., Komissarov A.B., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Using Landsat 8 (OLI) sensor data to measure turbidity, color, and chlorophyll content in the water of the Ivankovo reservoir // *Vestnik TvGU. Seriya Khimiya*. 2016. No. 2. P. 230–244 (in Russian).
10. Bhagowati B., Ahamad K.U. A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling // *Ecohydrology & Hydrobiology*. 2019. V. 19. P. 155–166. doi: 10.1016/j.ecohyd.2018.03.002
11. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetation indices // *Geomatika*. 2009. No. 3. P. 28–32 (in Russian).
12. Ali K., Witter D., Ortiz J. Application of empirical and semi-analytical algorithms to MERIS data for estimating chlorophyll *a* in Case 2 waters of Lake Erie // *Environ Earth Sci*. 2014. V. 71. P. 4209–4220. doi: 10.1007/s12665-013-2814-0
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. Article No. 111562. doi: 10.1016/j.rse.2019.111562
14. Hansen C.H., Burian S.J., Dennison P.E., William G.P. Evaluating historical trends and influences of meteorological and seasonal climate conditions on lake chlorophyll *a* using remote sensing // *Lake and Reservoir Management*. 2020. V. 36. No. 1. P. 45–63. doi: 10.1080/10402381.2019.1632397
15. Binding C.E., Zastepa A., Zeng C. The impact of phytoplankton community composition on optical properties and satellite observations of the 2017 western Lake Erie algal bloom // *Journal of Great Lakes Research*. 2019. V. 45. No. 3. P. 573–586. doi: 10.1016/j.jglr.2018.11.015
16. Witter D.L., Ortiz J.D., Palm S., Heath R.T., Budd J.W. Assessing the application of SeaWiFS Ocean color algorithms to Lake Erie // *J. Great Lakes Res*. 2009. V. 35 (3). P. 361–370. doi: 10.1016/j.jglr.2009.03.002
17. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Povazhny V. Estimation of chlorophyll-*a* concentration in case II waters using MODIS and MERIS data—successes and challenges // *Environ Res Lett*. 2009. V. 4. No. 4. Article No. 045005. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045005
18. Simis S.G.H., Peters S.W.M., Gons H.J. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water // *Limnol Oceanogr*. 2005. V. 50 (1). P. 237–245. doi: 10.4319/lo.2005.50.1.0237
19. Gons H.J. Optical teledetection of chlorophyll *a* in turbid inland waters // *Environ Sci Technol*. 1999. V. 33 (7). P. 1127–1132. doi: 10.1021/es9809657
20. Gower J., King S., Borstad G., Brown L. Detection of intense plankton blooms using the 709 nm band of the MERIS imaging spectrometer // *Int. J. Remote Sens*. 2005. V. 26. No. 9. P. 2005–2012. doi: 10.1080/01431160500075857
21. Binding C.E., Greenberg T.A., McCullough G., Watson S.B., Page E. An analysis of satellite-derived chlorophyll and algal bloom indices on Lake Winnipeg // *Journal of Great Lakes Research*. 2018. V. 44. P. 436–446. doi: 10.1016/j.jglr.2018.04.001
22. Gower J.F.R., Doerffer R., Borstad G.A. Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and

- its observation by MERIS // *Int. J. Remote Sens.* 1999. V. 20. No. 9. P. 1771–1786. doi: 10.1080/014311699212470
23. Schalles J.F., Gitelson A.A., Yacobi Y.Z., Kroenke A.E. Estimation of chlorophyll *a* from time series measurements of high spectral resolution reflectance in an eutrophic lake // *J. Phycol.* 1998. V. 34 (2). P. 383–390. doi: 10.1046/j.1529-8817.1998.340383.x
24. Alikas K., Kangro K., Reinart A. Detecting cyanobacterial blooms in large North European lakes using the Maximum Chlorophyll Index // *Oceanologia.* 2010. V. 52 (2). P. 237–257.
25. Gower J., King S., Goncalves P. Global monitoring of plankton blooms using MERIS MCI // *Int. J. Remote Sens.* 2008. V. 29 (24). P. 6209–6216. doi: 10.1080/01431160802178110
26. Karaoui I., Arioua A., Boudhar A., Hssaisoune M., El Moutassime S., Ait Ouhamchich K., Elhamdouni D. Evaluating the potential of Sentinel-2 satellite images for water quality characterization of artificial reservoirs: The Bin El Ouidane Reservoir case study (Morocco) // *Meteorology Hydrology and Water Management.* 2019. V. 7. No. 1. P. 31–39. doi: 10.26491/mhwm/95087
27. Sòria-Perpinyà X., Urrego P., Pereira-Sandoval M., Ruiz-Verdú A., Peña R., Soria J.M., Delegido J., Vicente E., Moreno J. Monitoring the ecological state of a hypertrophic lake (Albufera de València, Spain) using multitemporal Sentinel-2 images // *Limnetica.* 2019. V. 38 (1). P. 457–469. doi: 10.23818/limn.38.26
28. Dall'olmo G., Gitelson A., Rundquist D. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-*a* in both terrestrial vegetation and turbid productive waters // *Geophysical Research Letters.* 2003. V. 30 (18). doi: 10.1029/2003GL018065
29. Soria-Perpiyá X., Delegido J., Urrego E.P., Pereira-Sandoval M., Vicente E., Ruiz-Verdú A., Soria J.M., Peña R., Tenjo C., Moreno J. Validación de algoritmos para la estimación de la clorofila-*a* con Sentinel-2 en la Albufera de València // *Proceedings of the XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección.* Octubre 3–7, 2017. Murcia, Spain. P. 289–292 (in Spanish).
30. Pereira-Sandoval M., Ruiz-Verdú A., Tenjo C., Delegido J., Urrego E.P., Peña R., Vicente E., Soria J.M., Soria-Perpiyá X., Moreno J. Calibration and validation of algorithms for the estimation of chlorophyll-*a* and Secchi disc depth in inland waters with Sentinel-2 // *Limnetica.* 2019. V. 38 (1). P. 471–487. doi: 10.23818/limn.38.27
31. O'Reilly J.E., Hooker S., Firestone E., O'Brien M., Siegel D., Toole D., Menzies D., Smith R., Mueller J., Kahru M., Chavez F., Stratton P., Cota G., McClain C., Carder K., Harding L., Magnuson A., Phinney D., Culver M. Volume 11, SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, Part 3. In: NASA/TM–2000–206892. V. 11 / Eds. S.B. Hooker, E.R. Firestone. NASA Goddard Space Flight Center, 2000. 49 p.
32. Gitelson A.A., Gurlin D., Moses W.J., Yacobi Y.Z. Remote estimation of chlorophyll-*a* concentration in inland, estuarine and coastal waters. In: *Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms and Applications* / Ed. Q. Weng. CRC Press, 2011. P. 449–478.
33. Yang W., Matsushita B., Chen J., Fukushima T. Estimating constituent concentrations in case II waters from MERIS satellite data by semi-analytical model optimizing and look-up tables // *Remote Sens. Environ.* 2011. V. 115. No. 5. P. 1247–1259. doi: 10.1016/j.rse.2011.01.007
34. Matsushita B., Yang W., Yu G., Oyama Y., Yoshimura K., Fukushima T. A hybrid algorithm for estimating the chlorophyll-*a* concentration across different trophic states in Asian inland waters // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 2015. V. 102. P. 28–37. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.12.022
35. Cairo C., Barbosa C., Lobo F., Novo E., Carlos F., Maciel D., Flores Júnior R., Silva E., Curtarelli V. Hybrid chlorophyll-*a* algorithm for assessing trophic states of a tropical Brazilian reservoir based on MSI/Sentinel-2 Data // *Remote Sens.* 2020. V. 12. Article No. 40. doi: 10.3390/rs12010040
36. Gilerson A., Gitelson A., Zhou J., Gulrin D., Moses W., Ioannou I., Ahmed S. Algorithms for remote sensing of chlorophyll-*a* in coastal and inland waters using red and near infrared bands // *Opt. Express.* 2010. V. 18. No. 23. P. 24109–24125. doi: 10.1364/OE.18.024109
37. Gitelson A., Gao B.C., Li R.R., Berdnikov S., Saprygin V. Estimation of chlorophyll-*a* concentration in productive turbid waters using a hyperspectral imager for the coastal ocean: The Azov Sea case study // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6. No. 2. P. 1–6. doi: 10.1088/1748-9326/6/2/024023
38. Mishra S., Mishra D.R. Normalized Difference Chlorophyll Index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-*a* concentration in turbid productive waters // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 117. P. 394–406. doi: 10.1016/j.rse.2011.10.016
39. Sòria-Perpinyà X., Vicente E., Urrego P., Pereira-Sandoval M., Ruiz-Verdú A., Delegido J., Soria J.M., Moreno J. Remote sensing of cyanobacterial blooms in a hypertrophic lagoon (Albufera of València, Eastern Iberian Peninsula) using multitemporal Sentinel-2 images // *Science of the Total Environment.* 2020. V. 698. Article No. 134305. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134305
40. Jaskuła J., Sojka M., Wicher-Dysarz J. Analysis of selected physicochemical parameters and degradation process assessment in a two-stage reservoir Jezioro Kowalskie using field and remote sensing data // *Rocznik Ochrona Srodowiska.* 2019. V. 21. No. 1. P. 439–455.
41. Kutuyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. The use of satellite images to determine the boundaries of water bodies and study the processes of eutrophication // *Theoretical and Applied Ecology.* 2019. No. 3. P. 28–33 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-028-033
42. Rouse Jr.J., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Technical Reports Server, 1974. P. 309–317.

43. Pinardi M., Bresciani M., Villa P., Cazzaniga I., Laini A., Tóth V., Fadel A., Austoni M., Lami A., Giardino C. Spatial and temporal dynamics of primary producers in shallow lakes as seen from space: Intra-annual observations from Sentinel-2A // *Limnologia*. 2018. V. 72. P. 32–43. doi: 10.1016/j.limno.2018.08.002
44. Villa P., Pinardi M., Tóth V.R., Hunter P.D., Bolpagni R., Bresciani M. Remote sensing of macrophyte morphological traits: implications for the management of shallow lakes // *J. Limnol.* 2017. V. 76. No. 1S. P. 109–126. doi: 10.4081/jlimnol.2017.1629
45. Wu C., Niu Z., Tang Q., Huang W., Rivard B., Feng J. Remote estimation of gross primary production in wheat using chlorophyll-related vegetation indices // *Agric. For. Meteorol.* 2009. V. 149 (6). P. 1015–1021. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.12.007
46. Sakuno Y., Yajima H., Yoshioka Y., Sugahara S., Abd Elbasit M.A.M., Adam E., Chirima J.G. Evaluation of unified algorithms for remote sensing of chlorophyll-*a* and turbidity in lake Shinji and lake Nakaumi of Japan and the Vaal Dam reservoir of South Africa under eutrophic and ultra-turbid conditions // *Water*. 2018. V. 10. Article No. 618. doi: 10.3390/w10050618
47. Chen Z., Hu C., Muller-Karger F. Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery // *Remote Sens. Environ.* 2007. V. 109. P. 207–220. doi: 10.1016/j.rse.2006.12.019
48. Nechad B., Ruddick K.G., Park Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters // *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. P. 854–866. doi: 10.1016/j.rse.2009.11.022
49. Kallio K., Kutser T., Hannonen T., Koponen S., Pulliainen J., Vepsäläinen J., Pyhälähti T. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons // *Sci. Total Environ.* 2001. V. 268. No. 1–3. P. 59–77. doi: 10.1016/s0048-9697(00)00685-9
50. Doxaran D., Froidefond J.M., Castaing P., Babin M. Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2009. V. 81. No. 3. P. 321–332. doi: 10.1016/j.ecss.2008.11.013
51. Kutser T., Paavel B., Verpoorter C., Ligi M., Soomets T., Toming K., Casal G. Remote sensing of black lakes and using 810 nm reflectance peak for retrieving water quality parameters of optically complex waters // *Remote Sens.* 2016. V. 8. Article No. 497. doi: 10.3390/rs8060497
52. Delegido J., Urrego P., Vicente E., Sòria-Perpinyà X., Soria J.M., Pereira-Sandoval M., Ruiz-Verdú A., Peña R., Moreno J. Turbidez y profundidad de disco de Secchi con Sentinel-2 en embalses con diferente estado trófico en la Comunidad Valenciana // *Revista de Teledetección*. 2019. V. 54. P. 15–24 (in Spanish). doi: 10.4995/raet.2019.12603
53. Sebastiá-Frasquet M.-T., Aguilar-Maldonado J.A., Santamaría-Del-Ángel E., Estornell J. Sentinel 2 Analysis of Turbidity Patterns in a Coastal Lagoon // *Remote Sens.* 2019. V. 11. Article No. 2926. doi: 10.3390/rs11242926
54. Sòria-Perpinyà X., Urrego E.P., Pereira-Sandoval M., Ruiz-Verdú A., Soria J.M., Delegido J., Vicente E., Moreno J. Monitoring water transparency of a hypertrophic lake (the Albufera of València) using multitemporal Sentinel-2 satellite images // *Limnologia*. 2020. V. 39. No. 1. P. 373–386. doi: 10.23818/limn.39.24
55. Koponen S., Pulliainen J., Kallio K., Hallikainen M. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data. *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 79. No. 1. P. 51–59. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00238-3
56. Matthews M.W., Bernard S., Winter K. Remote sensing of cyanobacteria-dominant algal blooms and water quality parameters in Zeekoevlei, a small hypertrophic lake, using MERIS. *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. No. 9. P. 2070–2087. doi: 10.1016/j.rse.2010.04.013
57. Du C., Wang Q., Li Y., Lyu H., Zhu L., Zheng Z., Wen S., Liu G., Guo Y. Estimation of total phosphorus concentration using a water classification method in inland water // *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. 2018. V. 71. P. 29–42. doi: 10.1016/j.jag.2018.05.007
58. Sakharova E.G., Krylov A.V., Sabitova R.Z., Tsvetkov A.I., Gambaryan L.R., Mamyan A.S., Gabrielyan B.K., Ayrapetyan A.O., Khachikyan T.G. Horizontal and vertical distribution of phytoplankton of high-altitude Lake Sevan (Armenia) during the summer flowering of water by cyanoprokaryotes // *Contemporary Problems of Ecology*. 2020. No. 1. P. 76–88 (in Russian). doi: 10.15372/SEJ20200106
59. Watanabe F., Alcântara E., Imai N., Rodrigues T., Bernardo N. Estimation of chlorophyll-*a* concentration from optimizing a semi-analytical algorithm in productive inland waters // *Remote Sens.* 2018. V. 10. Article No. 227. doi: 10.3390/rs10020227
60. Dörnhöfer K., Scholze J., Stelzer K., Oppelt N. Water colour analysis of lake Kummerow using time series of remote sensing and in situ data // *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*. 2018. V. 86. P. 103–120. doi: 10.1007/s41064-018-0046-3
61. Cazzaniga I., Bresciani M., Colombo R., Della Bella V., Padula R., Giardino C. A comparison of Sentinel-3-OLCI and Sentinel-2-MSI-derived chlorophyll-*a* maps for two large Italian lakes // *Remote Sensing Letters*. 2019. V. 10. No. 10. P. 978–987. doi: 10.1080/2150704X.2019.1634298
62. Giardino C., Candiani G., Bresciani M., Lee Z., Gagliano S., Pepe M. BOMBER: A tool for estimating water quality and bottom properties from remote sens-

ing images // *Computers & Geosciences*. 2012. V. 45. P. 313–318. doi: 10.1016/j.cageo.2011.11.022

63. Blix K., Pálffy K., Tóth V.R., Eltoft T. Remote sensing of water quality parameters over lake Balaton by using Sentinel-3 OLCI // *Water*. 2018. V. 10. Article No. 1428. doi: 10.3390/w10101428

64. Rodrigues T., Mishra, D., Alcántara E., Astuti I., Watanabe F., Imai N. Estimating the optical properties of inorganic matter-dominated oligo-to-mesotrophic inland waters // *WATER*. 2018. V. 10. No. 4. UNSP 449. doi: 10.3390/w10040449

65. Dörnhöfer K., Klinger P., Heege T., Oppelt N. Multi-sensor satellite and in situ monitoring of phytoplankton development in a eutrophic-mesotrophic lake // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 612. P. 1200–1214. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.219

66. Watanabe F., Alcántara E., Imai N., Rodrigues T., Bernardo N. Estimation of chlorophyll-*a* concentration from optimizing a semi-analytical algorithm in productive inland waters // *Remote Sens*. 2018. V. 10. Article No. 227. doi: 10.3390/rs10020227

67. Setiawan F., Matsushita B., Hamzah R., Jiang D.L., Fukushima T. Long-Term Change of the Secchi Disk Depth in Lake Maninjau, Indonesia Shown by Landsat TM and ETM plus Data // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 23. Article No. 2875. doi: 10.3390/rs11232875

68. Liu D., Duan H., Yu S., Shen M., Xue K. Human-induced eutrophication dominates the bio-optical compositions of suspended particles in shallow lakes: Implications for remote sensing // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 667. P. 112–123. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.36