

**Использование нормализованного относительного альгоиндекса
для оценки «цветения» воды в водохранилищах
Вятско-Камского Предуралья**

© 2021. Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с., В. В. Рутман¹, м. н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный университет,

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

²Институт биологии Коми научного центра

Уральского отделения Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

На примере двух водохранилищ Кировской области, сходных по морфологическим особенностям и природным условиям, но отличающихся по уровню антропогенной нагрузки, показана возможность обнаружения скоплений фитопланктона с помощью нормализованного относительного альгоиндекса (NDAI). Расчёт индекса проведён по данным космоснимков, сделанных в период с мая по сентябрь 2015–2020 гг. со спутника Sentinel-2 (A, B). Индексные изображения построены в программном продукте QGIS версии 3.20. Полученные результаты сопоставлены с данными полевых наблюдений. Значения NDAI на акватории Омутнинского водохранилища во время вегетационного периода изменялись в пределах от 0,36 до 0,80, на акватории Чернохолуницкого водохранилища – от 0,32 до 0,84. В период с мая по июль наблюдали возрастание средних значений NDAI, а в августе и сентябре – снижение. Интенсивное «цветение» воды в изученных водохранилищах, согласно данным полевых наблюдений и результатам расчёта NDAI, отмечали в августе 2016 и июле 2020 гг. Оптическая плотность «цветущей» воды при этом составляла от 0,150 и выше (длина оптического пути кюветы 10 мм, $\lambda = 615$ нм), а значения NDAI от 0,50 и более.

Ключевые слова: водоём, эвтрофирование, фитопланктон, дистанционное зондирование Земли, спектральные индексы, мониторинг.

**The use of the normalized relative algoindex for the assessment
of algae blooms in the reservoirs of the Vyatka-Kama cis-Urals**

© 2021. T. I. Kutyavina¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636²

V. V. Rutman¹ ORCID: 0000-0002-9025-3487²

T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047²

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of Komi Science Centre

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

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

e-mail: kutyavinati@gmail.com

The article presents the results of monitoring of two plain reservoirs located in the Vyatka-Kama Pre-Urals, according to remote sensing data and field observations. The reservoirs located in the Kirov region have similar morphological parameters, the same origin, but differ in the level of anthropogenic load. According to the satellite images taken from the Sentinel-2 satellite (A, B) in the period from May to September 2015–2020, the normalized relative algoindex (NDAI) was calculated. This index allows you to detect accumulations of phytoplankton in reservoirs. The NDAI values do not depend on atmospheric interference and the influence of the reflection spectrum of the water itself. The index images are built in the QGIS software product, version 3.20. The results obtained are compared with the data of field observations on reservoirs. The NDAI values in the water area of the Omutninsky reservoir during the observation period varied from 0.36 to 0.80, in the water area of the Chernokholunitsky reservoir from 0.32 to 0.84. Intensive algae bloom in the studied reservoirs was observed in August 2016 and July 2020. In the water areas where intense algae blooming was noted, the following species prevailed in the phytoplankton samples: *Anabaena lemmermannii* P.G. Richter, *A. spiroides* Klebahn, *A. planctonica* Brunthaler, *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault. The optical density of water in this case was 0.150 and higher (the length of the optical path of the cuvette is 10 mm, $\lambda = 615$ nm), and the NDAI values were more than 0.50.

Keywords: reservoir, eutrophication, phytoplankton, remote sensing of the Earth, spectral indices, monitoring.

Дистанционные методы анализа в последние годы широко применяются для оценки состояния водных объектов [1–4]. Разработано большое количество спектральных индексов для обнаружения и количественной оценки скоплений фитопланктона («цветения» воды) и зарослей высших водных растений на морских акваториях и внутренних водоёмах [5–8]. Водные объекты значительно отличаются друг от друга по таким параметрам, как цветность и мутность воды, наличие в воде взвешенных веществ, видовой состав и степень развития фитопланктона. Все эти параметры необходимо учитывать при выборе спектральных индексов для изучения конкретного водоёма. Например, в работе [9] для мониторинга состояния оз. Эри (Канада, США), характеризующемся наличием взвешенных и окрашенных растворённых органических веществ, был использован индекс концентрации хлорофилла *a* ($chl_a_{(MERIS)}$) в двух вариантах, учитывающих отражательную способность воды при 490, 560, 665 и 708 нм. Наиболее пригодным для оценки экологического состояния гипертрофного оз. Альбуфера (Испания) оказался расчёт индекса концентрации хлорофилла *a* – TBDO (triband model of Dall’Olmo et al.), учитывающий отражательную способность воды при 665, 705 и 740 нм [10]. Выбор наиболее информативных индексов для изучения конкретных водных объектов проводится эмпирическим путём: на основе спутниковых данных строятся индексные изображения, и производится их сопоставление с результатами полевых работ. Если между данными, полученными дистанционными и полевыми методами, наблюдается достаточно тесная корреляционная связь, спектральные индексы используются в дальнейшей работе. Если данные не сопоставимы, вводятся корректирующие коэффициенты для спектральных индексов или подбираются другие индексы.

Цель данной работы – оценить возможность использования нормализованного относительного альгоиндекса для выявления скоплений фитопланктона в водохранилищах Кировской области.

Объекты и методы исследования

Кировская область расположена на северо-востоке Русской равнины в центрально-восточной части Европейской России. Крупнейшие водоёмы находятся в северо-восточной части региона, в Вятско-Камском физико-географическом округе. Это Белохо-

луницкое, Омутнинское, Большое Кирсинское и Чернохолуницкое водохранилища. В данном исследовании рассматриваются Омутнинское и Чернохолуницкое водохранилища, как наиболее сопоставимые по географическому положению, природным условиям и морфологическим особенностям водоёма [11]. Отличия водных объектов заключаются в интенсивности антропогенной нагрузки: на берегах Омутнинского водохранилища располагаются металлургический завод и лечебно-оздоровительные учреждения, г. Омутнинск с численностью населения 21431 чел., на берегах Чернохолуницкого водохранилища находятся рыбноводческое предприятие и пос. Черная Холуница с численностью населения 950 чел. (данные на 1 января 2021 г.). Площадь зеркала водохранилищ составляет 9,5 и 2,96 км² соответственно. Регулярные наблюдения за экологическим состоянием указанных водоёмов ведутся с 2011 г. Для изучаемых водохранилищ характерны высокая мутность (от 5 единиц по формазину и выше) и цветность воды (от 12 до 127 градусов цветности), что оказывает влияние на спектральную отражательную способность воды в водоёмах. Ранее нами уже были рассчитаны спектральные индексы NDVI, NDWI, индексы цвета и мутности воды, индексы концентрации хлорофилла *a* в воде с целью определения границ изучаемых водоёмов, выявления на их акваториях скоплений фитопланктона и зарослей высших водных растений [12].

В настоящей работе приведены результаты расчёта нормализованного относительного альгоиндекса (NDAI). Этот индекс впервые был предложен в работе [13] для обнаружения скоплений фитопланктона в Воронежском водохранилище по данным космоснимков со спутников Landsat. В летне-осенний период для Воронежского водохранилища характерно преобладание в фитопланктоне цианобактерий. Согласно данным [13], значения NDAI не зависят от атмосферных помех и влияния спектра отражения самой воды; чем выше значение индекса, тем интенсивнее развитие фитопланктона на исследуемом участке акватории.

Расчёт NDAI проводится по формуле [13]:

$$NDAI = \frac{I_G + 2I_{NIR} - I_B - I_R}{I_G + 2I_{NIR} + I_B + I_R} + 0,5,$$

где I_B, I_G, I_R, I_{NIR} – яркость излучения водного объекта в синем (канал B2), зелёном (B3), красном (B4) и ближнем инфракрасном (B8) диапазонах соответственно.

Для расчёта NDAI использовали космические снимки со спутника Sentinel 2 (A, B), размещённые в свободном доступе на сайте Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Всего было проанализировано 20 разновременных сцен с 2015 по 2020 гг., на которых акватории изучаемых водохранилищ были свободны от облаков. В работе использовали снимки, сделанные в вегетационный период (с мая по сентябрь). Расчёт NDAI и построение индексных изображений проводили в программном продукте QGIS версии 3.20. Для изучаемых водохранилищ эмпирическим путём была подобрана относительная шкала значений NDAI с минимумом 0,3 и максимумом 1,0. Полученные индексные изображения сопоставляли с результатами полевых биоиндикационных исследований, проведённых на акватории Омутнинского и Чернохолуницкого водохранилищ в 2015–2020 гг.

Статистическую обработку результатов проводили в Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Согласно полученным данным, минимальные значения NDAI (0,32–0,38) отмечены в мае и начале июня 2017 и 2020 гг., максимальные (0,75–0,84) – в июле и августе 2016, 2019 и 2020 гг. Для сравнения, на акватории Матырского водохранилища, сопоставимого с водохранилищами Кировской области по морфометрическим параметрам и гидрохимическим характеристикам, в период наблюдений с мая по сентябрь 1984–2014 гг. значения NDAI составляли в среднем от 0,26 до 0,44 [14], а на акватории Лукомского озера (Белоруссия) 18.05.2015 г. – от 0,42 до 1,16 [15].

Практически на всех снимках значения NDAI на мелководных прибрежных участках акватории Омутнинского и Чернохолуницкого водохранилищ были выше по сравнению с более глубоководными участками в центральной части водоёмов, то есть скопления фитопланктона преимущественно находились на мелководьях. В качестве примера на рисунке 1 (см. цв. вкладку IV) представлены снимки водохранилищ, сделанные 13.08.2017 г. Аналогичное распределение значений NDAI по акватории и увеличение биомассы фитопланктона на мелководных прибрежных участках по сравнению с центральной частью водоёма отмечено для Лукомского озера [15]. Более высокий уровень развития фитопланктона (в 2–3 раза) на мелководьях по сравнению с

руслом в летнее время характерен также для Волжских водохранилищ [16]. Это объясняется рядом факторов: более интенсивным прогревом водной среды и повышенным содержанием биогенных элементов на прибрежных участках. Вероятно, эти же факторы повлияли на развитие фитопланктона на мелководьях водохранилищ Кировской области.

При сопоставлении рассчитанных значений NDAI с данными полевых наблюдений на акваториях Омутнинского и Чернохолуницкого водохранилищ в 2015–2020 гг. было отмечено, что при значениях NDAI выше 0,50 на акватории наблюдается массовое развитие фитопланктона. При визуальном наблюдении «цветении» оптическая плотность воды достигала 0,150–0,220 и выше, а при отсутствии признаков «цветения» составляла около 0,060 (измерения оптической плотности проводили на спектрофотометре при $\lambda = 615$ нм в кювете с длиной оптического пути 10 мм).

Если проследить временную динамику изменений значений NDAI, то можно отметить, что с мая по июль средняя для всей акватории величина NDAI возрастала, а затем, с июля по сентябрь, снижалась как в Омутнинском, так и в Чернохолуницком водохранилищах (табл. 1).

Из литературных данных известно, что сезонные изменения содержания хлорофилла *a*, по которому оценивают биомассу фитопланктона, можно объяснить динамикой погодных и гидрологических условий [16]. Увеличение значений NDAI в период с мая по июль в 2015–2020 гг. вполне согласуется с ростом температуры воздуха в этот же период наблюдений (рис. 2).

Наибольший размах вариации между минимальными и максимальными значениями NDAI отмечен на июльских индексных изображениях, а наименьший – на майских и сентябрьских (табл. 1). То есть в мае и сентябре распределение фитопланктона по акватории Омутнинского водохранилища было более равномерным, чем в июле, участки массового развития фитопланктона не были обнаружены.

Вспышки интенсивного развития фитопланктона визуальными и на космоснимках были зафиксированы в Омутнинском и Чернохолуницком водохранилищах в августе 2016 г. (снимок от 25.08.2016, NDAI от 0,64 до 0,80 и от 0,58 до 0,70 соответственно) и июле 2020 г. (08.07.2020, NDAI от 0,60 до 0,75 и от 0,64 до 0,84 соответственно), только в Омутнинском водохранилище – в июле 2018-го (26.07.2018, NDAI от 0,67 до

Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина
«Использование нормализованного относительного альгоиндекса
для оценки «цветения» воды в водохранилищах
Вятско-Камского Предуралья». С. 60.

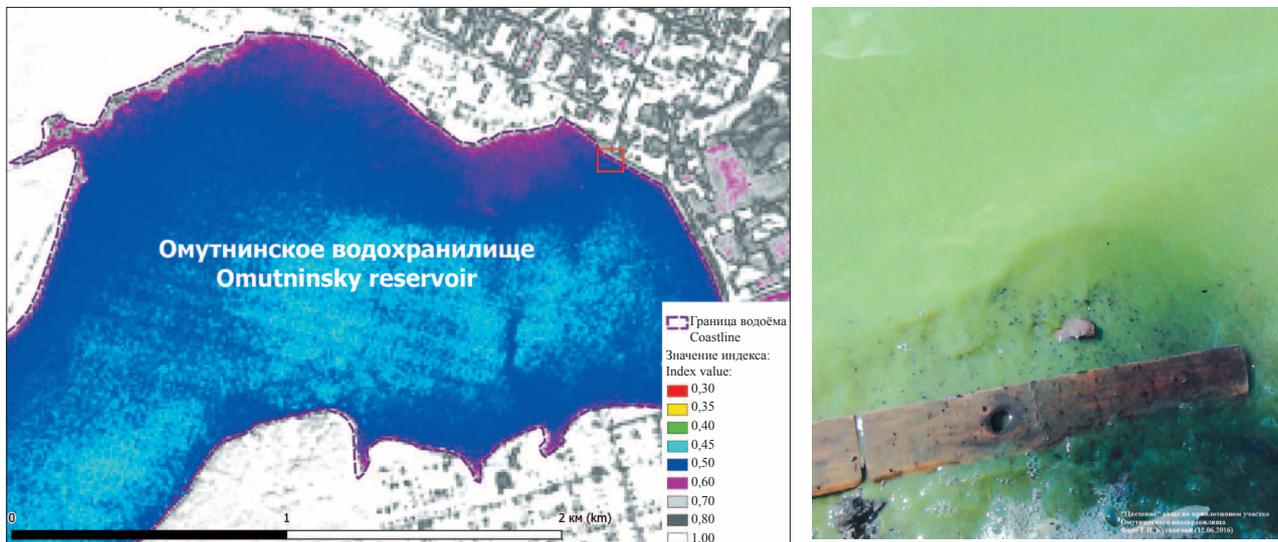


Рис. 1. Значения NDAI на акватории Омутнинского водохранилища 07.06.2016 (слева) и фотография приплотинного участка Омутнинского водохранилища 12.06.2016 (справа)
Fig. 1. NDAI values in the water area of the Omutninsky reservoir 07.06.2016 (left) and a photo of the dam section of the Omutninsky reservoir 12.06.2016 (right)

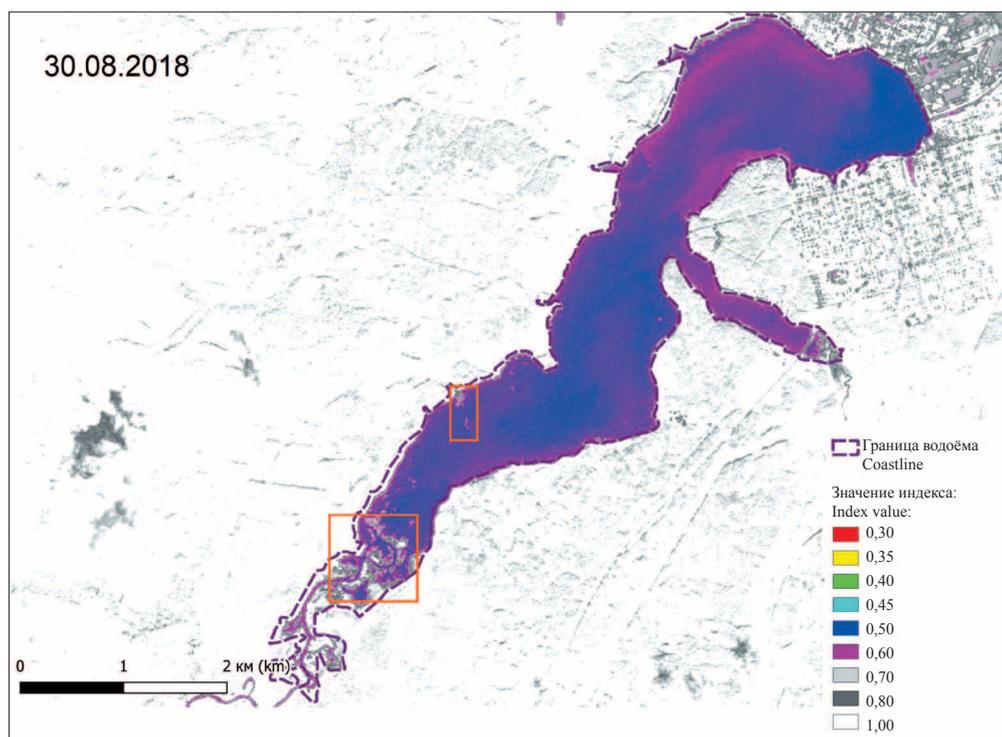


Рис. 3. Значения NDAI на акватории Омутнинского водохранилища в разные периоды времени
Fig. 3. NDAI values in the water area of the Omutninsky reservoir in different time periods

Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина
«Использование нормализованного относительного альгоиндекса
для оценки «цветения» воды в водохранилищах
Вятско-Камского Предуралья». С. 60.

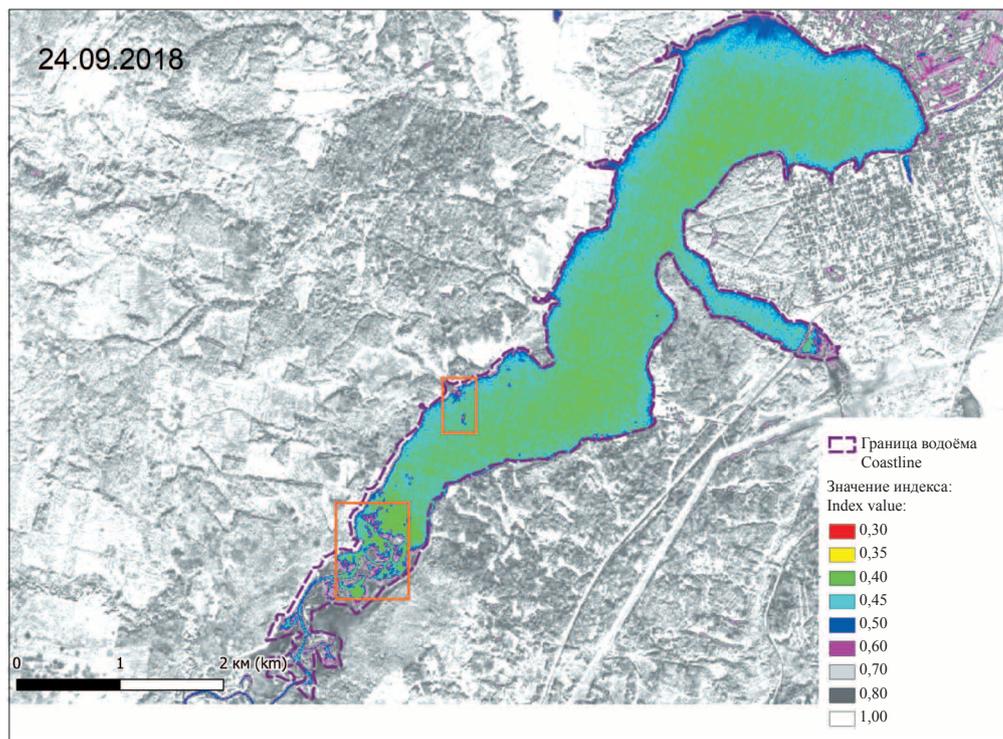
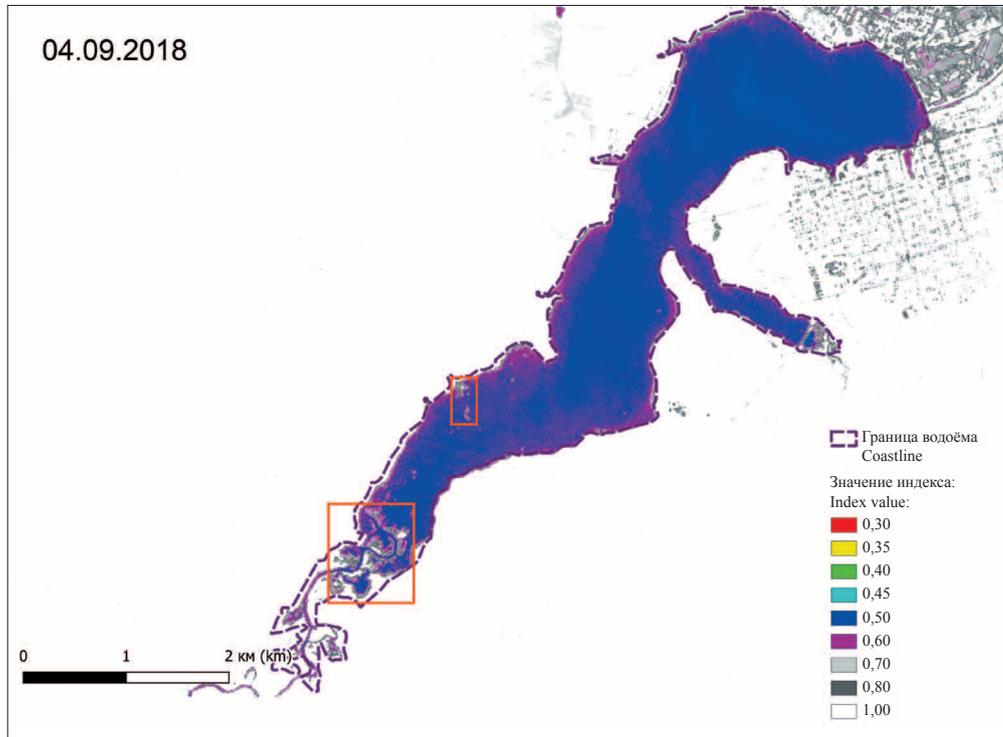


Рис. 3. Значения NDAI на акватории Омутнинского водохранилища в разные периоды времени
Fig. 3. NDAI values in the water area of the Omutninsky reservoir in different time periods

Таблица 1 / Table 1

Средние значения и размах значений NDAI для Омутнинского и Чернохолуницкого водохранилищ за период 2015–2020 гг. / The average NDAI values and the range of NDAI values for the Omutninsky and Chernokholunitsky reservoirs for the period 2015–2020

Водохранилище Reservoir	Месяц / Month				
	май May	июнь June	июль July	август August	сентябрь September
Омутнинское Omutninsky	<u>0,385</u> 0,075	<u>0,505</u> 0,085	<u>0,675</u> 0,140	<u>0,506</u> 0,103	<u>0,454</u> 0,084
Чернохолуницкое Chernokholunitsky	<u>0,445</u> 0,100	<u>0,475</u> 0,250	<u>0,567</u> 0,187	<u>0,507</u> 0,167	<u>0,440</u> 0,210

Примечание: в числителе указано среднее арифметическое значение NDAI, в знаменателе – размах вариации.
Note: the numerator indicates the arithmetic mean of NDAI, the denominator indicates the scope of variation.

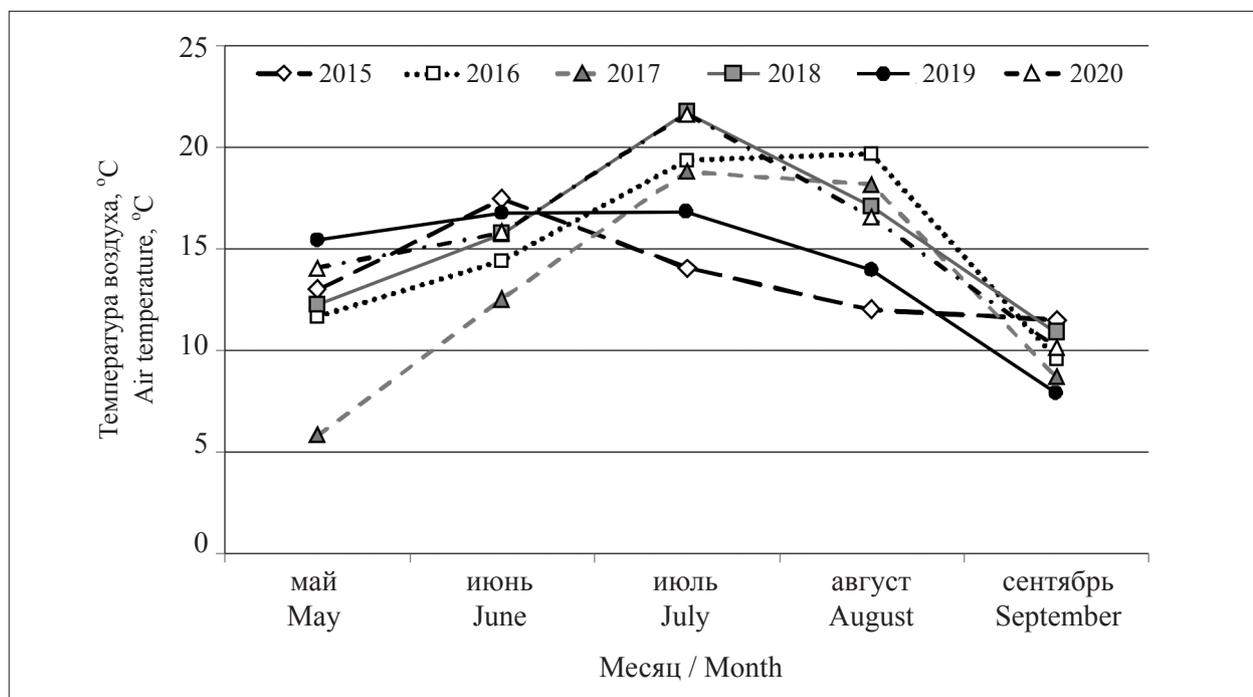


Рис. 2. Средняя температура воздуха в районе исследований в 2015–2020 гг.
Fig. 2. The average air temperature in the research area in 2015–2020

0,80). Наибольшие значения NDAI на пересеченных снимках были отмечены на мелководьях в центральном и приплотинном (северном) участках водохранилищ, а также в заливах. Глубины на этих участках небольшие (до 3 м), водообмен замедленный, вода хорошо прогревается. Благоприятными для развития фитопланктона были и погодные условия: в августе 2016-го, июле 2018 г. и 2020-го гг. дни были преимущественно ясные, безветренные, а среднемесячная температура воздуха была достаточно высокой (20–22 °C), что также способствовало «цветению» воды.

С помощью индексных изображений NDAI достаточно чётко можно проследить динамику развития фитопланктона. На рисунке 3 (см. цветную вкладку V) представлены снимки, сделанные во время интенсивного «цветения»

воды в Омутнинском водохранилище и в последующие дни, когда «цветение» воды визуально уже практически не отмечалось. Можно отметить, что на снимке, сделанном 30.08.2018 г., максимальные значения NDAI наблюдаются вдоль берегов на приплотинном участке и в заливе в центральной части водохранилища. В пробах фитопланктона на этих участках преобладали *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Anabaena lemmermannii* P.G. Richter, *A. spiroides* Klebahn, *A. planctonica* Brunthaler. При продвижении к русловым участкам водохранилища и непосредственно перед плотиной (северо-восточная часть водохранилища) значения индекса снижаются. На снимке, сделанном 04.09.2018 г., площади, для которых характерно интенсивное «цветение» воды, значительно сократились на централь-

ном и приплотинном участках водохранилища, но несколько увеличилось в верховье (южной части). Спустя три недели, 24.09.2018 г., «цветение» воды на акватории Омутнинского водохранилища уже практически не отмечалось, за исключением небольшого участка в приплотинной части водоёма.

При анализе построенных индексных изображений было отмечено, что с помощью NDAI можно обнаружить на акватории водоёма не только фитопланктон, но и заросли высших водных растений. На акватории Омутнинского водохранилища заросли макрофитов отличались от скоплений фитопланктона более высокими значениями индекса ($NDAI = 0,70-0,80$) в течение всего вегетационного периода и более чёткими контурами. Авторы работы [14] отмечали, что на участках Матырского водохранилища, занятых зарослями жёсткой околководной растительности, значения NDAI достигали 0,55. На рисунке 3 оранжевыми прямоугольниками выделены участки акватории Омутнинского водохранилища, на которых при полевых наблюдениях в 2015–2020 гг. были зафиксированы заросли камыша озёрного (*Schoenoplectus lacustris*), горца земноводного (*Persicaria amphibia*) и других высших растений.

Заключение

Таким образом, нормализованный относительный альгоиндекс оказался пригоден для выявления скоплений фитопланктона и зарослей высших водных растений на акватории Омутнинского и Чернохолуницкого водохранилищ Кировской области, а также для оценки динамики развития фитопланктона. При проведении исследования было отмечено, что в течение вегетационного сезона значения NDAI изменяются в широких пределах: от 0,32 до 0,84, максимальные значения чаще всего наблюдаются на прибрежных мелководных участках, что характерно для большинства русловых водохранилищ. Более интенсивное «цветение» воды, согласно значениям NDAI и данным полевых наблюдений, было отмечено на акватории Омутнинского водохранилища, для которого характерна повышенная антропогенная нагрузка по сравнению с Чернохолуницким водохранилищем. Интенсивному «цветению» воды в водоёмах соответствовали значения индекса от 0,55 и выше, чаще всего они наблюдались в июле и августе. В этот же период «цветение» воды наблюдается в большинстве водоёмов умеренной зоны.

Работы по расчёту нормализованного относительного индекса планируется включить в программу наблюдений за экологическим состоянием водохранилищ Кировской области.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-5830.2021.1.5).

References

1. 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
2. Pahlevan N., Chittimalli S.K., Balasubramanian S.V., Vellucci V. Sentinel-2/Landsat-8 product consistency and implications for monitoring aquatic systems // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 220. P. 19–29. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.027
3. Rodrigues T., Mishra, D., Alcantara 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. Article No. 449. doi: 10.3390/w10040449
4. Ritchie J.C., Zimba P.V., Everitt J.H. Remote sensing techniques to assess water quality // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2003. No. 6. P. 695–704. doi: 10.14358/PERS.69.6.695
5. 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.
6. 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
7. 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
8. 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
9. 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 // *Envi-*

ron Earth Sci. 2014. V. 71. P. 4209–4220. doi: 10.1007/s12665-013-2814-0

10. 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 of València, Spain) using multitemporal Sentinel-2 images // *Limnetica*. 2019. V. 38. No. 1. P. 457–469. doi: 10.23818/limn.38.26

11. Kut'yavina T.I., Domnina E.A., Ashikhmina T.Ya., Savinikh V.P. Morphometric, hydro-chemical and biological characteristics of the ponds of the North-East of Kirov region // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 2. P. 50–55 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-2-050-055

12. Kut'yavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya., Savinikh 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

13. Silkin K.Yu. Methodology for assessing the ecological state of the Voronezh reservoir based on the materi-

als of multi-zone remote sensing // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*. 2012. No. 1. P. 220–223 (in Russian).

14. Valyalschikov A.A., Silkin K.Yu., Kulnev V.V. Analysis of the ecological state of the Matyr reservoir according to the data of ecological-hydrochemical and satellite monitoring // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*. 2014. No. 1. P. 110–117 (in Russian).

15. Protasov A.A., Barinova S., Novoselova T.N., Buseva Zh.F., Tomchenko O.V., Syl'ayeva A.A., Lubskiy N.S., Semenchenko V.P., Sysova E.A. The heterogeneity of the abiotic and biotic components of techno-ecosystems: view from Space and from The Earth // *European Scientific Journal*. 2019. V. 15. No. 3. P. 423–448. doi: 10.19044/esj.2019.v15n3p423

16. Khaliullina L.Yu., Yakovlev V.A. Phytoplankton of shoals in upper reaches of the Kuibyshev reservoir. Kazan: Academy of Science of Republic of the Tatarstan Press, 2015. 171 p. (in Russian).