

Пространственно-временная динамика «цветения» фитопланктона в Куйбышевском водохранилище по данным спутникового зондирования

О. В. Никитин¹, Н. Ю. Степанова², Т. А. Кондратьева³,
Р. С. Кузьмин¹, В. З. Латыпова²

¹ ООО «Экоаудит», Казань, 420061, Россия
E-mail: olnova@mail.ru

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия
E-mail: step090660@yandex.ru

³ Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Республики Татарстан, Казань, 420021, Россия
E-mail: tatjana_kondrate@mail.ru

Оценивается пространственно-временная динамика процессов «цветения» фитопланктона в поверхностных водах Куйбышевского водохранилища на основе анализа спутниковых данных Sentinel-2, включающих 1228 снимков за период с 2019 по 2023 г. Исследование проведено в подекадной динамике, охватывающей вегетационный период с мая по октябрь, что соответствует периоду активного развития фитопланктона. Для акватории восьми плёсов и Черемшанского залива, занимающих около 86 % водоёма, рассчитаны ежегодные средние месячные и сезонные значения нормализованного разностного индекса хлорофилла (*англ.* Normalized Difference Chlorophyll Index — NDCI), концентрации хлорофилла *a* (Chl-*a*) и площади зон цветения. Цветение наблюдалось ежегодно и было наиболее интенсивным в июле–августе (NDCI = 0,107...0,108), что соответствует концентрации Chl-*a* около 26–27 мг/м³ и указывает на эвтрофный статус водоёма. В этот период в среднем до 41–44 % акватории было занято зонами максимального цветения. В пространственном отношении максимальные значения NDCI наблюдались в южной части водохранилища, особенно в Черемшанском заливе (NDCI = 0,369) и Приплотинном плёсе (NDCI = 0,367). Корреляционный анализ выявил высокое сходство между соседними участками водоёма, а иерархический кластерный анализ позволил выделить три группы по интенсивности процессов цветения: 1) Приплотинный, Нововедиченский, Ульяновский плёсы и Черемшанский залив; 2) Ундорский, Тетюшинский, Волжский плёсы; 3) Волго-Камский, Камский плёсы. Динамика цветения в Ундорском и Тетюшинском плёсах наиболее соответствует общей динамике водохранилища (коэффициент парной корреляции $r = 0,964$ и $r = 0,962$), тогда как наименьшее соответствие обнаружено для Камского плёса ($r = 0,809$).

Ключевые слова: фитопланктон, цветение водорослей, Куйбышевское водохранилище, дистанционное зондирование Земли, нормализованный разностный индекс хлорофилла, NDCI, Sentinel-2, Google Earth Engine

Одобрена к печати: 21.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-284-293

Введение

К числу глобальных экологических проблем можно отнести антропогенное эвтрофирование водных экосистем и связанное с ним массовое неконтролируемое развитие синезелёных водорослей (цианобактерий), так называемое цветение (Sha et al., 2021). Современные спутниковые снимки позволяют эффективно осуществлять дистанционный экологический мониторинг этого процесса (Доброхотова и др., 2023). Для обнаружения и оценки развития фитопланктона наиболее часто применяются различные варианты индексов, связанные с фотосинтетическими пигментами — преимущественно с хлорофиллом *a* (*англ.* chlorophyll *a* — Chl-*a*). Одним из вариантов является нормализованный разностный индекс хлорофилла (*англ.* Normalized Difference Chlorophyll Index — NDCI), демонстрирующий хоро-

шие результаты при сопоставлении полевых и спутниковых данных (Курбатова и др., 2022; Mishra, Mishra, 2012; Zhi et al., 2024).

Целью работы была оценка пространственно-временной изменчивости процессов цветения фитопланктона в Куйбышевском водохранилище (КВ) в 2019–2023 гг. по данным спутникового зондирования.

Материал и методы исследования

Куйбышевское водохранилище расположено в Среднем Поволжье и Нижнем Прикамье Европейской части России (рис. 1). Оно было создано в 1955–1957 гг. при строительстве плотины Жигулёвской гидроэлектростанции на р. Волге вблизи г. Тольятти в Самарской области. КВ — крупнейшее водохранилище Волжско-Камского каскада и одно из самых больших водохранилищ мира, оно занимает площадь 5900 км² и имеет общую ёмкость 57,3 км³. Акватория обладает сложной конфигурацией: обширные озёрные участки (15–20 км) чередуются с узкими проливами, ширина которых не превышает 3–5 км. Водоохранилище характеризуется выраженным сезонным типом регулирования расходов воды, долгосрочное регулирование не проводится (Mineeva, Tsvetkov, 2023; Rakhuba, 2021).

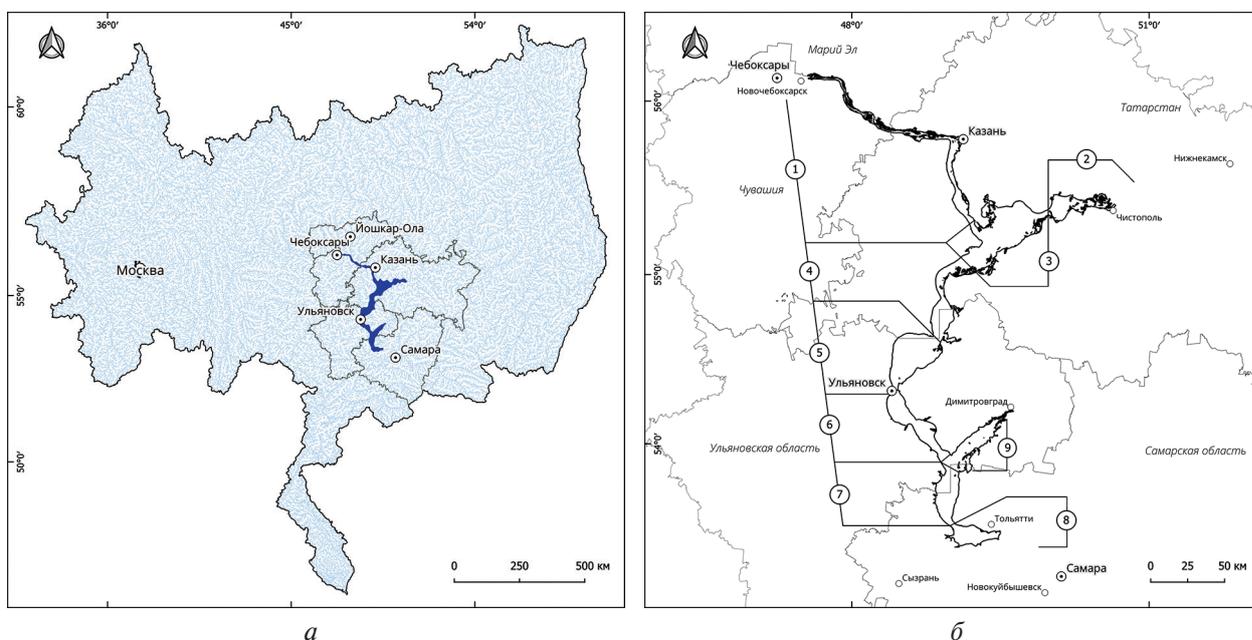


Рис. 1. Водосборный бассейн реки Волги и Куйбышевское водохранилище в пределах пяти регионов России (а). Плёсы водохранилища (б): 1 — Волжский, 2 — Камский, 3 — Волго-Камский, 4 — Тетюшинский, 5 — Ундорский, 6 — Ульяновский, 7 — Новодевиченский, 8 — Приплотинный, а также 9 — Черемшанский залив

Оценка динамики развития фитопланктона в акватории КВ проводилась по материалам спутниковой съёмки Sentinel-2A/2B (спектрометр MSI (англ. Multispectral Instrument)), поставщик набора данных: программа «Коперник» (англ. Copernicus) Европейского космического агентства (англ. European Space Agency — ESA). Использовались снимки уровня обработки 2A (англ. Level-2A), прошедшие атмосферную коррекцию при помощи алгоритма Sen2Cor (англ. Sentinel-2 Correction), с процентом облачности менее 25 %. Дополнительно применялась маска по каналу QA60 (англ. Quality Assurance — QA; 60 — пространственное разрешение канала в метрах) для минимизации влияния оставшейся облачности.

Всего были отобраны и обработаны 1228 снимков с мая по октябрь 2019–2023 гг., включающих все восемь плёсов и Черемшанский залив КВ (площадь покрытия сценами 5062 км²).

Проводилась подекадная комбинация спутниковых снимков с вычислением средних значений в перекрывающихся областях. Всего на рассматриваемый период времени приходится 90 декад (d), анализируемых как самостоятельно, так и при помесечном и годовом усреднении. Приведённый на *рис. 1б* контур КВ использовался в качестве первоначальной маски для получения характеристик в границах водоёма и его плёсов.

Для выделения водной поверхности использовали модифицированный нормализованный разностный водный индекс (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index — MNDWI) (Xu, 2006):

$$\text{MNDWI} = \frac{R_{rs}(B3) - R_{rs}(B11)}{R_{rs}(B3) + R_{rs}(B11)},$$

где $R_{rs}(\lambda)$ — коэффициент спектральной яркости при длине волны λ соответствующего канала сенсора MSI — B3 (зелёный, 560 нм) и B11 (коротковолновый инфракрасный, 1610 нм). Водной поверхностью считали области с положительными значениями MNDWI, дальнейшие вычисления проводили в пределах созданной водной маски.

Нормализованный разностный индекс хлорофилла NDCI рассчитывали по формуле (Mishra, Mishra, 2012):

$$\text{NDCI} = \frac{R_{rs}(B5) - R_{rs}(B4)}{R_{rs}(B5) + R_{rs}(B4)},$$

где $R_{rs}(\lambda)$ — коэффициент спектральной яркости при длине волны λ определённого канала сенсора MSI — B5 (красный край, 705 нм) и B4 (красный, 665 нм).

По значениям индекса были выделены зоны, соответствующие различной интенсивности развития процессов цветения: минимальной ($\text{NDCI} < 0$), средней ($0 \leq \text{NDCI} < 0,1$) и максимальной (BZ_{\max} (*англ.* Bloom Zone maximum); $\text{NDCI} \geq 0,1$). Проводился подсчёт площадей, относящихся к каждой зоне. Значение индекса NDCI можно использовать для характеристики процессов цветения самостоятельно, а также через связанное с ним содержание $\text{Chl-}a$. Для перевода значений NDCI в $\text{Chl-}a$ применялся следующий алгоритм (Mishra, Mishra, 2012): $\text{Chl}_a = a + b \cdot \text{NDCI} + c \cdot \text{NDCI}^2$, где Chl_a — содержание $\text{Chl-}a$, мг/м³; a , b , c — коэффициенты модели, $a = 14,039$, $b = 86,115$, $c = 194,325$.

Доступ к данным и основные операции осуществлялись с помощью облачной платформы геопространственного анализа Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

Для картографической визуализации данных использовали программу QGIS 3.28. Координаты на картах представлены как геодезические (WGS-84 (*англ.* World Geodetic System 1984, всемирная система геодезических параметров Земли 1984 г.), градусы и минуты северной широты и восточной долготы). Статистическую обработку полученных данных проводили при помощи программы Statistica 10.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Спутниковый мониторинг позволил проследить пространственно-временную изменчивость процессов цветения фитопланктона в акватории КВ (*рис. 2*, см. с. 287).

Для КВ в целом характерно доминирование в фитопланктоне диатомовых и синезелёных водорослей, которые составляют основу численности и биомассы фитопланктона (Корнева, 2015). Однако именно синезелёные, развиваясь в массе, способны вызывать цветение воды, фиксируемое как визуально, так и при мониторинговых наблюдениях, а также при анализе спутниковых данных (Zhi et al., 2024).

Значения нормализованного разностного индекса хлорофилла лежат в диапазоне от -1 до $+1$. В оптически чистых водоёмах NDCI принимает величины, близкие к -1 , в водоёмах с умеренной и высокой биомассой водорослей — от $-0,3$ до близких к 1 . В случае экстремального цветения показатели NDCI будут находиться в диапазоне от $0,5$ до 1 (Mishra, Mishra, 2012). За период наблюдений NDCI для акватории КВ (*рис. 3*, см. с. 288) варьировался

от 0,274 (начало августа 2021 г.) до $-0,393$ (конец октября 2021 г.). По плёсам максимальные значения зафиксированы для Черемшанского залива ($NDCI = 0,369$) и Приплотинного плёса ($NDCI = 0,367$) в тот же период, что и для всего КВ. Можно отметить несколько пиков цветения (два-три), наблюдаемых в течение вегетационного периода, преимущественно в июле, августе и сентябре. Этим же месяцам соответствуют и площади максимального цветения фитопланктона (до 92 %). В две последние декады октября 2021 г. наблюдались экстремально низкие значения $NDCI$ (менее $-0,3$), которые выходили за границы в три стандартных отклонения и могли вносить ошибку в оценку средних значений, поэтому они были исключены из дальнейшего анализа.

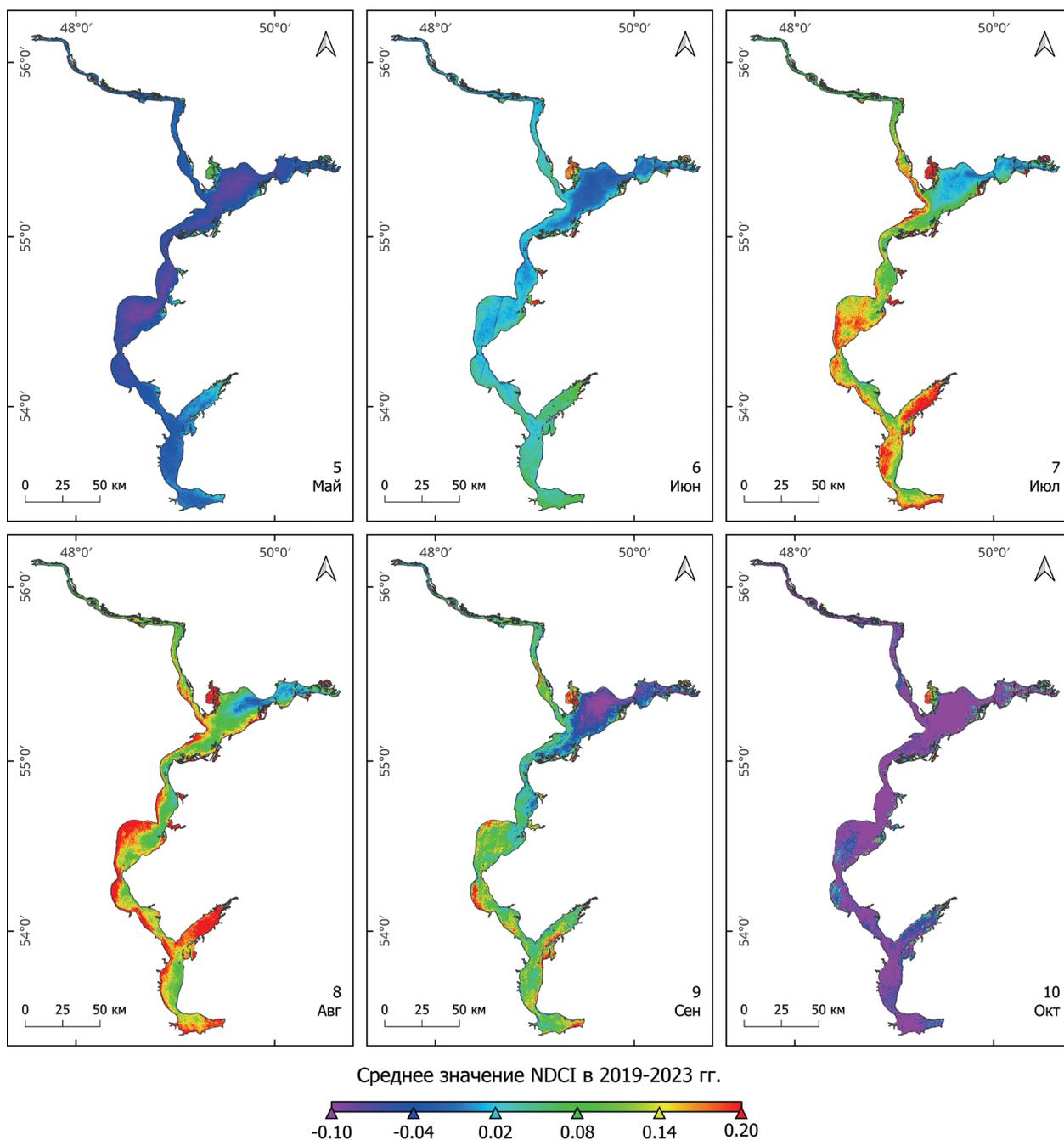


Рис. 2. Процессы цветения фитопланктона в акватории Куйбышевского водохранилища в градациях индекса $NDCI$ (средние значения для соответствующего месяца за 2019–2023 гг.) по данным спутниковой съёмки Sentinel-2/MSI

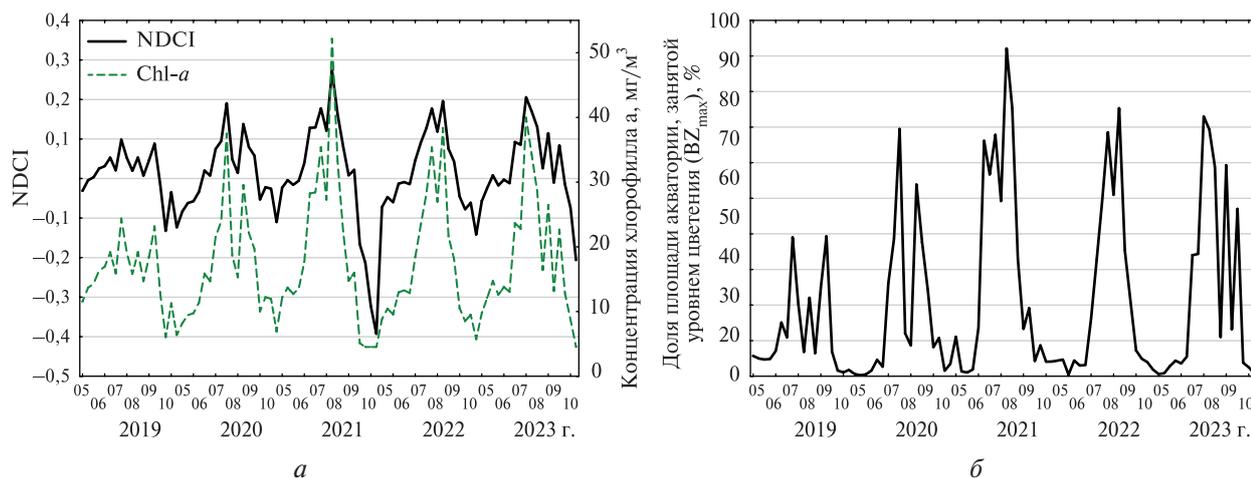


Рис. 3. Временные ряды цветения фитопланктона по индексу NDCI, концентрации Chl-*a* (а) и BZ_{max} (б) в акватории Куйбышевского водохранилища в течение вегетационного периода с мая по октябрь 2019–2023 гг. по данным спутниковой съёмки Sentinel-2/MSI

В течение вегетационного периода по значению NDCI вода сильнее всего цвела в июле–августе ($NDCI = 0,107...0,108$). По пространственному охвату аналогично — в среднем 41–43 % акватории КВ было занято процессами максимального цветения в эти летние месяцы (рис. 4). Полученные величины соответствуют содержанию Chl-*a* около $(26,0 \pm 1,8) - (26,7 \pm 2,8) \text{ мг/м}^3$, что указывает на эвтрофный статус водохранилища. Представленные оценки совпадают с показателями, известными для КВ по результатам натурных исследований, например для проб, отобранных в августе и сентябре 2021 г., величины Chl-*a* лежали в диапазоне 6,8–96,5 мг/м^3 , в среднем составляя $17,6 \pm 2,5 \text{ мг/м}^3$ (Mineeva, Tsvetkov, 2023).

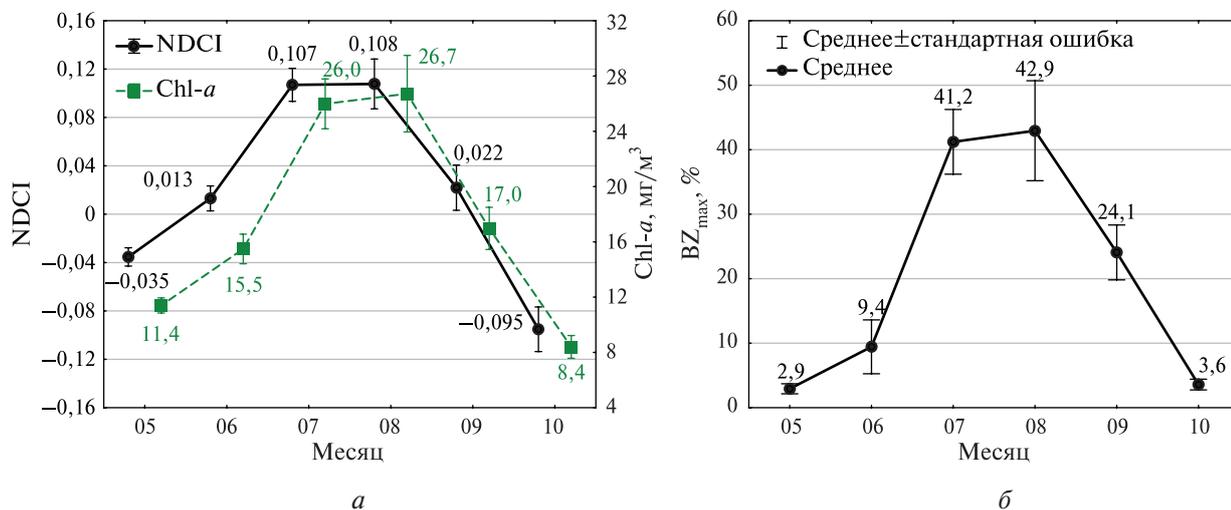


Рис. 4. Среднемесячное значение индекса NDCI и концентрации Chl-*a* (а) и доля площади акватории, занятой максимальным уровнем цветения, BZ_{max} (б) в 2019–2023 гг.

В межгодовой динамике (рис. 5, см. с. 289) сильнее всего по среднему значению NDCI и по пространственному охвату вода цвела в 2021 г. ($NDCI = 0,045$, $BZ_{max} = 32 \%$), что вероятно связано с аномально тёплыми погодными условиями в этот год (Selezneva et al., 2024). Минимальный уровень цветения был зафиксирован в 2019 г. ($NDCI = 0,009$, $BZ_{max} = 12 \%$). Можно отметить тенденцию повышения индекса NDCI примерно на 0,004 ед./год и увеличение площади максимального цветения в среднем на 2,7 %/год. Наибольший рост характерен

для августа (0,026 ед./год; 10,9 %/год), в меньшей степени для июля и сентября (0,011 ед./год, 3,6 %/год и 0,004 ед./год, 3,0 %/год). В другие месяцы положительная динамика в настоящее время не зафиксирована.

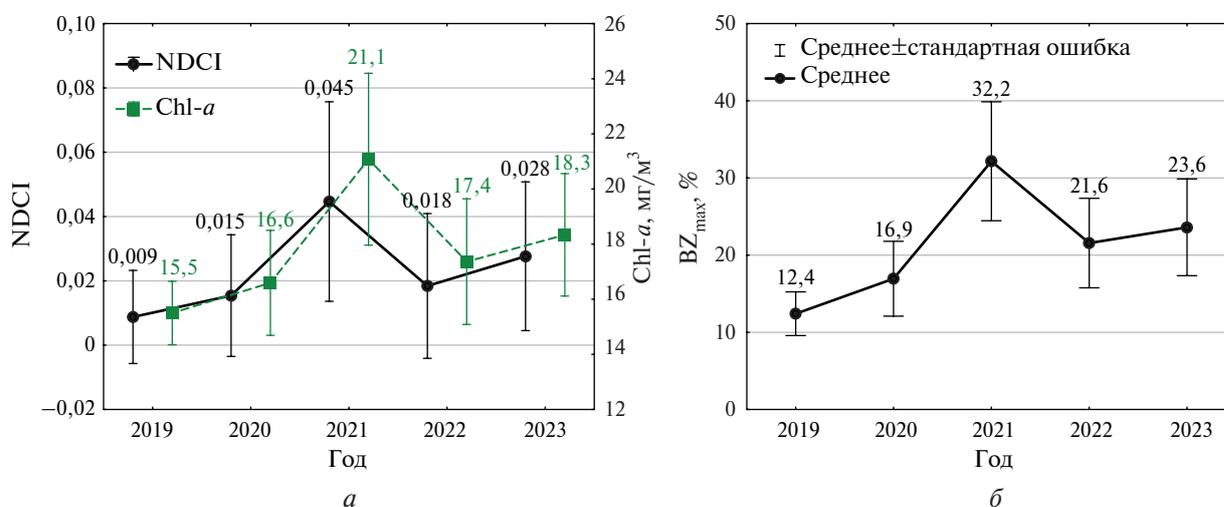


Рис. 5. Среднее за сезон значение индекса NDCI и концентрации Chl-a (а) и доля площади акватории, занятой максимальным уровнем цветения, BZ_{max} (б) в 2019–2023 гг.

В пространственном отношении сильнее всего подвержены цветению южные участки водохранилища (табл. 1). Максимальные значения NDCI были отмечены для Черемшанского залива и Приплотинного плёса, что может быть связано со стоком водорослей и замедлением скорости течения в нижней части водохранилища, а также с мелководностью залива (более 50 % площади, преобладают глубины 2–3 м). Минимальные NDCI наблюдаются для Камского и Волго-Камского плёсов. Выполненный корреляционный анализ выявил наибольшее сходство между рядом расположенными участками водохранилища. Иерархический кластерный анализ на его основе позволил провести классификацию и визуализировать её в виде дендрограммы (рис. 6, см. с. 290).

Таблица 1. Корреляционная матрица между участками Куйбышевского водохранилища по NDCI ($d = 53$), среднее ($NDCI_{cp}$) и максимальное ($NDCI_{max}$) значение индекса для каждого участка

Участки	S7	S8	S6	S9	S5	S4	S1	S3	S2
S7	—	0,95	0,88	0,93	0,83	0,79	0,72	0,72	0,68
S8	0,95	—	0,92	0,94	0,87	0,81	0,74	0,77	0,71
S6	0,88	0,92	—	0,90	0,92	0,86	0,76	0,79	0,70
S9	0,93	0,94	0,90	—	0,90	0,89	0,81	0,79	0,71
S5	0,83	0,87	0,92	0,90	—	0,95	0,82	0,86	0,70
S4	0,79	0,81	0,86	0,89	0,95	—	0,89	0,90	0,75
S1	0,72	0,74	0,76	0,81	0,82	0,89	—	0,84	0,72
S3	0,72	0,77	0,79	0,79	0,86	0,90	0,84	—	0,86
S2	0,68	0,71	0,70	0,71	0,70	0,75	0,72	0,86	—
$NDCI_{cp}$	0,050	0,065	0,057	0,077	0,051	0,038	0,044	0,011	0,001
$NDCI_{max}$	0,320	0,367	0,284	0,369	0,336	0,232	0,196	0,218	0,132

Примечание: Нумерация участков водохранилища (S1–S9) дана по рис. 1. Для строк $NDCI_{cp}$ и $NDCI_{max}$ использованы независимые градиенты: зелёный — минимальные значения, красный — максимальные, жёлтый — промежуточные.

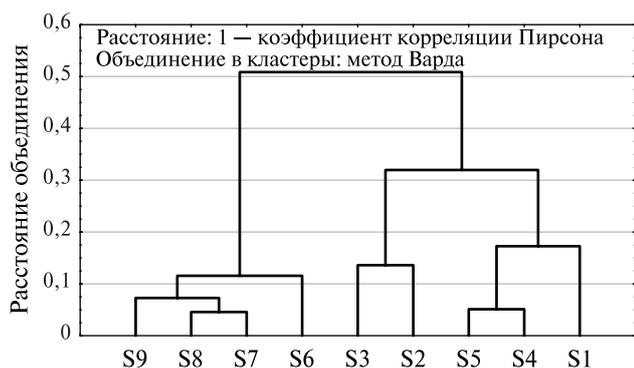


Рис. 6. Дендрограмма сходства плёсов Куйбышевского водохранилища по уровню цветения, нумерация участков (S1–S9) дана по рис. 1

В общей структуре можно выделить три группы наиболее похожих по интенсивности процессов цветения: 1) Приплотинный, Новодевиченский, Ульяновский плёсы и Черемшанский залив; 2) Ундорский, Тетюшинский, Волжский плёсы; 3) Волго-Камский, Камский плёсы. Развитие фитопланктона происходит достаточно согласовано в пределах акватории КВ в течение вегетационного периода, однако интенсивность цветения в Ундорском и Тетюшинском плёсах наиболее близка к динамике цветения в рамках всего водохранилища (коэффициент парной корреляции $r = 0,964$ и $0,962$, уровень значимости $p < 0,001$), наименьшее соответствие обнаружено для Камского плёса ($r = 0,809$, $p < 0,001$).

В общей структуре можно выделить три группы наиболее похожих по интенсивности процессов цветения: 1) Приплотинный, Новодевиченский, Ульяновский плёсы и Черемшанский залив; 2) Ундорский, Тетюшинский, Волжский плёсы; 3) Волго-Камский, Камский плёсы. Развитие фитопланктона происходит достаточно согласовано в пределах акватории КВ в течение вегетационного периода, однако интенсивность цветения в Ундорском и Тетюшинском плёсах наиболее близка к динамике цветения в рамках всего водохранилища (коэффициент парной корреляции $r = 0,964$ и $0,962$, уровень значимости $p < 0,001$), наименьшее соответствие обнаружено для Камского плёса ($r = 0,809$, $p < 0,001$).

В качестве основных причин цветения воды указываются несколько: климатические, химические и гидродинамические (Доброхотова и др., 2023; Корнева, 2015; Zhi et al., 2024). Первые связаны с освещённостью водоёмов и прогревом водной толщи, вторые — с поступлением биогенов и последние — с режимом регулирования стока на гидроузлах. При повышении температуры воды, высоком содержании фосфатов и слабом течении складываются благоприятные условия для многочисленных вспышек массового развития синезелёных водорослей, вызывающих цветение воды (Rakhuba, 2021). Все эти факторы свойственны Куйбышевскому водохранилищу и определяют пространственно-временную динамику биологических сообществ водоёма.

Цветение воды препятствует хозяйственному и рекреационному водопользованию. Кроме того, некоторые виды цианобактерий способны продуцировать вторичные метаболиты — цианотоксины, которые могут представлять угрозу для здоровья человека (Nikitin et al., 2015). В 2021 г. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) обновила свои рекомендации по предотвращению негативного воздействия цианобактериальных токсинов на здоровье населения, в частности, отметив связь концентрации хлорофилла *a* с цианотоксинами в водоёмах. ВОЗ предлагает использовать содержание Chl-*a* на уровне 24 мг/м^3 в качестве косвенного индикатора повышенного риска для здоровья, при превышении которого риск для населения значительно возрастает (Lopez Barreto et al., 2024). В 2019–2023 гг. указанное значение Chl-*a* в акватории КВ отмечалось ежегодно (см. рис. 3), суммарная продолжительность опасного цветения составила около 170 дней.

Заключение

Таким образом, проведённое исследование предоставляет возможность выявить пространственно-временную изменчивость цветения фитопланктона в Куйбышевском водохранилище. Подходы, основанные на дистанционном зондировании, позволяют извлекать долговременные ряды последовательных и сопоставимых данных, характеризующих эти процессы. Установление рассматриваемых параметров на столь обширной территории водохранилища было бы затруднительно без привлечения спутниковых данных. Дистанционное зондирование может служить отправной точкой для планирования программы мониторинга опасного цветения цианобактерий, например, путём определения сезона цветения или определения мест накопления биомассы.

Исследование выполнено за счёт средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Литература

1. *Доброхотова Д. В., Капустин И. А., Мольков А. А., Лещёв Г. В.* Исследование влияния режима работы ГЭС на перераспределение фитопланктона в верхнем водном слое в приплотинном участке Горьковского водохранилища // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 1. С. 242–252. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-242-252.
2. *Корнева Л. Г.* Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
3. *Курбатова И. Е., Верещак Т. В., Иванова А. А.* Спутниковый мониторинг экологического состояния особо охраняемых территорий Северного Каспия на примере биосферного резервата ЮНЕСКО «Кизлярский залив» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 4. С. 249–264. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-249-264.
4. *Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
5. *Lopez Barreto B. N., Hestir E. L., Lee C. M., Beutel M. W.* Satellite remote sensing: A tool to support harmful algal bloom monitoring and recreational health advisories in a California Reservoir // *GeoHealth*. 2024. V. 8. Iss. 2. Article e2023GH000941. DOI: 10.1029/2023gh000941.
6. *Mineeva N. M., Tsvetkov A. I.* Characteristics of the vertical distribution of chlorophyll in reservoirs of the Middle and Lower Volga // *Russian J. Ecology*. 2023. V. 54. No. 2. P. 97–105. DOI: 10.1134/s1067413623020091.
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 Sensing of Environment*. 2012. V. 117. P. 394–406. DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.016.
8. *Nikitin O. V., Stepanova N. Yu., Latypova V. Z.* Human health risk assessment related to blue-green algae mass development in the Kuibyshev Reservoir // *Water Science and Technology: Water Supply*. 2015. V. 15. P. 693–700. DOI: 10.2166/ws.2015.022.
9. *Rakhuba A. V.* Spatial heterogeneity of hydrochemical and trophic characteristics of the Kuibyshev reservoir in summer // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 818. Article 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/818/1/012036.
10. *Selezneva K. V., Selezneva A. V., Seleznev V. A.* Parameters of the temperature optimum for cyanobacteria in the Kuibyshev reservoir // *E3S Web of Conf.* 2024. V. 480. Article 02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202448002022.
11. *Sha J., Xiong H., Li C. et al.* Harmful algal blooms and their eco-environmental indication // *Chemosphere*. 2021. V. 274. Article 129912. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129912.
12. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *Intern. J. Remote Sensing*. 2006. V. 27. Iss. 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.
13. *Zhi X., Chen L., Chen S. et al.* Heterogeneity and influencing factors of algal blooms in the reservoir-impacted tributary: Evidence from remote sensing and physical-based model // *J. Hydrology*. 2024. V. 634. Article 131058. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131058.

Spatiotemporal dynamics of phytoplankton blooms in Kuibyshev Reservoir based on satellite remote sensing data

O. V. Nikitin¹, N. Yu. Stepanova², T. A. Kondrateva³, R. S. Kuzmin¹, V. Z. Latypova²

¹ Ekoaudit LLC, Kazan 420061, Russia
E-mail: olnova@mail.ru

² Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia
E-mail: step090660@yandex.ru

³ Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Tatarstan Republic, Kazan 420021, Russia
E-mail: tatjana_kondrate@mail.ru

In this study, we evaluate the spatiotemporal dynamics of phytoplankton bloom processes in the surface waters of the Kuibyshev Reservoir (Russia) using Sentinel-2 satellite data, which includes 1228 images over the period from 2019 to 2023. The analysis was conducted with a sub-decade temporal resolution, covering the vegetative period from May to October corresponding to the active growth phase of phytoplankton. For the water area of eight reaches and the Cheremshansky Bay, which together represent about 86 % of the reservoir, annual monthly and seasonal mean values for the Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI), chlorophyll *a* (Chl-*a*) concentration, and the area affected by the bloom were calculated. The bloom was observed annually, with its peak intensity in July–August (NDCI = 0.107...0.108) corresponding to Chl-*a* concentrations of approximately 26–27 mg/m³, indicating the eutrophic status of the reservoir. During this period, intense bloom covered an average of 41–44 % of the water surface. Spatially, the highest NDCI values were recorded in the southern parts of the reservoir, particularly in Cheremshansky Bay (NDCI=0.369) and Priplotinny reach (NDCI = 0.367). Correlation analysis revealed strong similarities between adjacent sections of the reservoir, and hierarchical cluster analysis allowed for the identification of three groups based on bloom intensity: 1) Priplotinny, Novodevichensky, Ulyanovsky reaches, and Cheremshansky Bay; 2) Undorsky, Tetyushinsky, Volzhsky reaches; 3) Volzhsko-Kamsky and Kamsky reaches. Bloom dynamics in the Undorsky and Tetyushinsky reaches matched the general dynamics of the reservoir most closely (pairwise correlation coefficient $r = 0.964$ and $r = 0.962$, respectively), whereas the Kamsky reach showed the weakest correlation ($r = 0.809$).

Keywords: phytoplankton, algae bloom, Kuibyshev Reservoir, Earth remote sensing, Normalized Difference Chlorophyll Index, NDCI, Sentinel-2, Google Earth Engine

Accepted: 21.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-284-293

References

1. Dobrokhotova D. V., Kapustin I. A., Molkov A. A., Leshchev G. V., A study of the effect of hydropower operation regime on the redistribution of phytoplankton in the upper water layer in the dam section of the Gorki Reservoir, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 20, No. 1, pp. 242–252 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-242-252.
2. Korneva L. G., *Fitoplankton vodokhranilishch basseina Volgi* (Phytoplankton of Volga River basin reservoirs), Kostroma: Kostromskoi pechatnyi dom, 2015, 284 p. (in Russian).
3. Kurbatova I. E., Vereshchaka T. V., Ivanova A. A., Satellite monitoring of ecological condition of specially protected Northern Caspian areas on the example of UNESCO Kizlyar Bay biosphere reserve, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 249–264 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-249-264.
4. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 202, pp. 18–27, DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
5. Lopez Barreto B. N., Hestir E. L., Lee C. M., Beutel M. W., Satellite remote sensing: A tool to support harmful algal bloom monitoring and recreational health advisories in a California Reservoir, *GeoHealth*, 2024, Vol. 8, Iss. 2, Article e2023GH000941, DOI: 10.1029/2023gh000941.
6. Mineeva N. M., Tsvetkov A. I., Characteristics of the vertical distribution of chlorophyll in reservoirs of the Middle and Lower Volga, *Russian J. Ecology*, 2023, Vol. 54, No. 2, pp. 97–105, DOI: 10.1134/s1067413623020091.

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 Sensing of Environment*, 2012, Vol. 117, pp. 394–406, DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.016.
8. Nikitin O. V., Stepanova N. Yu., Latypova V. Z., Human health risk assessment related to blue-green algae mass development in the Kuibyshev Reservoir, *Water Science and Technology: Water Supply*, 2015, Vol. 15, pp. 693–700, DOI: 10.2166/ws.2015.022.
9. Rakhuba A. V., Spatial heterogeneity of hydrochemical and trophic characteristics of the Kuibyshev reservoir in summer, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 818, Article 012036, DOI: 10.1088/1755-1315/818/1/012036.
10. Selezneva K. V., Selezneva A. V., Seleznev V. A., Parameters of the temperature optimum for cyanobacteria in the Kuibyshev reservoir, *E3S Web of Conf.*, 2024, Vol. 480, Article 02022, DOI: 10.1051/e3sconf/202448002022.
11. Sha J., Xiong H., Li C. et al., Harmful algal blooms and their eco-environmental indication, *Chemosphere*, 2021, Vol. 274, Article 129912, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129912.
12. Xu H., Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, Iss. 14, pp. 3025–3033, DOI: 10.1080/01431160600589179.
13. Zhi X., Chen L., Chen S. et al., Heterogeneity and influencing factors of algal blooms in the reservoir-impacted tributary: Evidence from remote sensing and physical-based model, *J. Hydrology*, 2024, Vol. 634, Article 131058, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131058.