

УДК 528.77

**В. А. СИПАЧ¹, О. А. СЕМЕНОВ¹, Е. С. КУРЗЕНКОВ¹,
М. С. КУРЗЕНКОВ¹, Б. В. АДАМОВИЧ², М. Ю. БОГУЦКИЙ¹,
Е. С. ФРУЛЬ¹**

¹Беларусь, Минск, УП «Геоинформационные системы»

²Беларусь, Минск, БГУ

E-mail: slava-sipach@tut.by, belaqualab@gmail.com

ВЫЯВЛЕНИЕ «ЦВЕТЕНИЯ» ФИТОПЛАНКТОНА В ВОДОЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В последние годы в водоемах наряду с интенсивным развитием общего фитопланктона наблюдается активное размножение цианобактерий. Цветение воды, вызванное их массовым развитием, регистрируется по всему миру [1]. Массовое развитие цианобактерий ухудшает качество воды, создает проблемы для водопользования, может служить причиной замора рыб в связи со способностью цианобактерий продуцировать множество биологически активных метаболитов, среди которых есть опасные для здоровья людей и животных токсины: микроцистин, сакситоксин, анатоксин, цилиндроперомописин и др. [2; 3].

В Беларуси исследования по выявлению микроцистин-продуцирующих цианобактерий в фитопланктоне впервые начаты в 2009 г. на р. Свислочи, основной водной магистрали г. Минска, и на зарегулированных на реке водохранилищах [4]. Данные исследования были продолжены в 2012–2014 гг. Эпизодически такие работы повторяются различными исследователями в связи с участившимися случаями летней немотивированной гибели рыб в городских и рекреационных водоемах г. Минска [5].

При этом существующие в настоящее время методики оценки развития фитопланктона крайне трудозатратны и требуют проведения длительных полевых и лабораторных работ и последующих трудоемких расчетов. Они не позволяют оперативно выявлять очаги массового развития фитопланктона на относительно больших территориях, какими являются основные водоемы и озерные массивы в Республике Беларусь. Однако периодичность проведения гидробиологических наблюдений на постоянных пунктах на всех поверхностных водных объектах (кроме трансграничных участков рек и р. Свислочи) составляет один раз в год каждые два года. Очевидно, что периодичность гидробиологических наблюдений водных экосистем не соответствует современным вызовам.

Под влиянием различных факторов, в первую очередь негативных воздействий природного и антропогенного характера, водные объекты претерпевают быстротечные изменения в течение месяцев и даже дней.

Применение современных геоинформационных технологий и использование дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ) позволяют вывести на качественно новый уровень работы по мониторингу цветения водных объектов.

Благодаря данным ДЗЗ, за счет высокой оперативности и полноты покрытия съемкой всей площади области интересов можно обеспечить выявление цветения водоемов на ранней стадии, что позволит разработать и провести необходимые мероприятия по предотвращению развития цветения и информированию населения о данном явлении, а также проконтролировать с использованием данных ДЗЗ эффективность этих мероприятий.

Для решения задач по оперативному выявлению цветения водоемов в рамках подпрограммы 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» государственной программы «Научные технологии и техника» на 2021–2025 гг. выполняется мероприятие 17 «Создать программный комплекс выявления и мониторинга “цветения” фитопланктона на водных объектах с применением данных дистанционного зондирования Земли» коллективом авторов в составе сотрудников биологического факультета Белорусского государственного университета и научно-инженерного республиканского унитарного предприятия «Геоинформационные системы».

На первом этапе создания программного комплекса была разработана методика выявления цветения фитопланктона на водных объектах с применением данных ДЗЗ на основании входных данных, полученных в ходе полевых обследований водоемов на предмет оценок уровней развития фитопланктона в модельных водных объектах и содержания хлорофилла в воде модельных озер, таксономического состава фитопланктона в очагах массового развития (цветения) первичных планктонных продуцентов с учетом оценки геоморфологии модельных водных экосистем для определения потенциальной зоны развития цветений (далее – методика). На основании данной методики была разработана технология автоматизированного выявления цветения на водоемах.

Тестовыми участками для отработки результатов работы методики и технологии автоматизированного выявления цветения на водоемах являются 48 водоемов, расположенных на территории национального парка «Нарочанский».

Для обеспечения функционирования технологии автоматизированного выявления цветения на водоемах было предложено использовать стандартизированный спектральный индекс, получаемый на основе данных ДЗЗ, – нормализованный разностный индекс хлорофилла *a* (далее – NDCI).

Индекс NDCI – отношение разности коэффициентов спектральной яркости на пиках поглощения (705 нм) и отражения (665 нм) хлорофилла *a* к сумме этих показателей. Данный индекс изначально был предложен для использования в целях прогнозирования концентрации хлорофилла *a* с использованием космических данных дистанционного зондирования Земли в эстуарных и прибрежных мутных продуктивных водах и с тех пор применяется для оценки внутренних пресноводных озер [6].

Наиболее подходящими и оперативными данными ДЗЗ для проведения исследования оказались снимки группировки спутников Sentinel-2 Европейского космического агентства. В настоящее время группировка состоит из трех спутников. Она обеспечивает покрытие снимками любой территории каждые 2–3 дня с пространственным разрешением 10 м [7]. Спутники Sentinel-2 имеют набор необходимых спектральных каналов для построения индекса NDCI.

Программный комплекс автоматически проверяет наличие снимков Sentinel-2 и загружает данные со спутников для интересующих водоемов, проводит дешифрирование и маскирование облаков, дымки и теней, строит индекс и анализирует его, выявляет участки цветения. Информация о выявленных участках цветения сохраняется в базе геоданных.

Для подтверждения выявления цветения водоемов по спутниковым снимкам Sentinel-2, а также для последующей проверки точности методики проводятся подспутниковые наблюдения.

Участки для проведения наземного исследования выбирались исходя из максимальной однородности по степени цветения с фиксацией координат забора проб. По каждому водоему выполняется неконтролируемая классификация снимков по индексу NDCI. Для синхронизации во времени и пространстве наземных проб и космической информации данные ДЗЗ выбираются в пределах площади, соответствующей 7×7 пикселей, с центром, соответствующим координатам взятия наземной пробы. В пределах этой площади с учетом данных неконтролируемой классификации индекса NDCI водоема вычисляется взвешенное значение индекса NDCI, которое присваивается точке взятия наземной пробы.

Для максимальной чистоты эксперимента наземные подспутниковые наблюдения проводятся квазисинхронно с ДЗЗ: дата и время проведения наблюдения на водоеме по отбору проб на цветение синхронизируются по времени съемки объекта исследования спутниками Sentinel-2, однако при прогнозе облачности на момент съемки более 80 % квазисинхронных наземных наблюдений не проводится.

В рамках исследования специалистами УП «Геоинформационные системы», сотрудниками НИЛ гидроэкологии и Нарочанской биологической станции имени Г. Г. Винберга биологического факультета БГУ

в летние периоды 2022–2024 гг. было выполнено более 400 квази-синхронных подспутниковых обследований участков с отбором проб на содержание хлорофилла *a*, из которых пригодными для совместной обработки оказались 174 пробы (без облаков, теней от облаков и дымки на снимках спутниковой системой Sentinel-2).

Разработка программного комплекса выявления и мониторинга цветения фитопланктона на водных объектах с применением данных ДЗЗ позволит кардинально улучшить мониторинг поверхностных вод, планирование и осуществление природоохранных, рекреационных и хозяйственных мероприятий. К тому же проведенное исследование имеет практическую ценность для разработки рекомендаций по предотвращению цветения фитопланктона в водоемах.

Полученные данные могут быть использованы при разработке экологических программ и систем природоохранных мероприятий локального, регионального и национального уровней.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management / eds. I. Chorus, M. Welker. – 2nd ed. – CRC Press, 2021. – 858 p.
2. Guidelines for safe recreational water environments. Vol. 1. Coastal and fresh water. – Geneva : World Health Organization, 2003. – 146 p.
3. Guidelines for drinking-water quality. – 4th ed. – Geneva : World Health Organization, 2011. – 564 p.
4. Озеро Большие Швакшты (Беларусь): эволюция трофического статуса, фитопланктон, токсиногенные цианобактерии / Т. М. Михеева, Б. В. Адамович, Т. В. Жукова [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2018. – Т. 11, № 6. – С. 661–676.
5. Фитопланктон рекреационных и городских водоемов г. Минска / В. Г. Костоусов, Т. И. Попиначенко, В. Д. Сенникова, О. Д. Апсолихова // Вопросы рыбного хозяйства Беларуси. – 2022. – № 37. – С. 201–214.
6. Mishra, S. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters / S. Mishra, D. R. Mishra // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 117. – P. 394–406.
7. Фруль, Е. С. Мониторинг «угроз» местам обитания редких и находящихся под угрозой исчезновения диких животных с использованием космической информации / Е. С. Фруль, В. А. Сипач, Е. Кузьменков // Зоологические чтения : сб. науч. ст., посвящ. памяти д-ра биол. наук, проф. В. Н. Шнитникова / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: О. В. Янчуревич (гл. ред.), А. В. Рыжая. – Гродно : ГрГУ, 2025. – С. 277–279.