

МЕЛИОРАЦИЯ И ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО

УДК 528.85

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ И МОНИТОРИНГ «ЦВЕТЕНИЯ» ФИТОПЛАНКТОНА НА ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Е. С. КУРЗЕНКОВ, М. С. КУРЗЕНКОВ, В. А. СИПАЧ, О. А. СЕМЁНОВ

Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие
«Геоинформационные системы» НАН Беларусь,
г. Минск, Республика Беларусь, 220012, e-mail: YKurziankou@gis.by;
MKurziankou@gis.by; VSipach@gis.by; OSemenov@gis.by

Б. В. АДАМОВИЧ

Белорусский государственный университет,
г. Минск, Республика Беларусь, 220030, e-mail: belaqualab@gmail.com

(Поступила в редакцию 02.06.2025)

Водные экосистемы являются, без преувеличения, особым достоянием Беларуси и одной из основных составляющих экологического каркаса особо охраняемых природных территорий, таких как национальные парки «Нарочанский» и «Браславские озера». Водные объекты республики обеспечивают население широким спектром необходимых экосистемных услуг. Интенсивное использование водных ресурсов влечет за собой резкое изменение их качественных параметров в результате сброса в воду самых разнообразных загрязнителей антропогенного происхождения, а их естественные экосистемы разрушаются.

Существующие в настоящее время методики оценки развития фитопланктона крайне трудозатратны и требуют проведения длительных полевых и лабораторных работ и последующих трудоемких расчетов. Поэтому необходимы механизмы четкого, оперативного и универсального контроля ключевых характеристик водных объектов, которые учитывают большие территории. Это возможно только с применением данных дистанционного зондирования Земли.

В данной работе предлагаются методики, позволяющие реализовать системный подход к автоматизированному выявлению и мониторингу «цветения» фитопланктона на водных объектах. Их применение позволит кардинально улучшить мониторинг поверхностных вод и использовать эти данные для планирования и осуществления природоохранных, рекреационных и хозяйственных мероприятий.

Предложенные методики будут положены в основу технологии выявления и мониторинга «цветения» фитопланктона, позволяющей распространять ее на другие водные объекты страны.

Возможность оперативного выявления и мониторинга «цветения» фитопланктона в пределах больших территорий позволит принимать меры для снижения и предотвращения негативных последствий на водных объектах.

Ключевые слова: автоматизация, информационные технологии, ДЗЗ, ГИС, охрана водных ресурсов, мониторинг водных объектов, «цветение» фитопланктона.

Aquatic ecosystems are, without exaggeration, a special asset of Belarus and one of the main components of the ecological framework of specially protected natural territories, such as the «Narochansky» and «Braslav Lakes» National Parks. The republic's water bodies provide the population with a wide range of necessary ecosystem services. Intensive use of water resources entails a sharp change in their quality parameters as a result of the discharge of a wide variety of anthropogenic origin into the water, and their natural ecosystems are being destroyed.

The current methods for assessing phytoplankton development are extremely labor-intensive and require long-term field and laboratory work and further labor-intensive calculations. Therefore, mechanisms for clear, prompt and universal control of key characteristics of water bodies that take into account large territories are needed. This is possible only with the use of Earth remote sensing data.

This paper proposes methods that allow the implementation of a systematic approach to the automated detection and monitoring of phytoplankton «blooming» in water bodies. Their application will radically improve the monitoring of surface waters and use this data for planning and implementing environmental, recreational and economic measures.

The proposed methods will form the basis of the technology of detection and monitoring of phytoplankton «blooming», allowing to extend it to other water bodies of the country.

The ability to quickly identify and monitor phytoplankton blooms within large areas will allow measures to be taken to reduce and prevent negative consequences on water bodies.

Key words: automation, information technology, remote sensing, GIS, protection of water resources, monitoring of water bodies, phytoplankton blooms.

Введение

Водные ресурсы являются национальным достоянием во всех странах мира, обеспеченность ими – ключевой показатель устойчивого развития общества в социальных, экономических и экологических аспектах [1].

Все воды (водные объекты), расположенные на территории Республики Беларусь, находятся в исключительной собственности государства (ст. 13 Конституции) и составляют государственный водный фонд. К водному фонду относятся: поверхностные воды (водные объекты) – реки, ручьи, родники, озера, пруды, водохранилища, каналы и т. п.; подземные воды [2].

Изменение климата, активно проявляющееся в последние 50 лет, ведет к существенным последствиям. Ожидается, что в самое ближайшее время мировое сообщество будет испытывать негативные воздействия изменения климата в виде возросшей частоты и интенсивности наводнений и засух, усиления дефицита водных ресурсов, а также ухудшения экологического состояния водных экосистем.

Необходимость принятия мер, направленных на адаптацию водных ресурсов к изменению климата, напрямую затрагивает Республику Беларусь, так как в южной ее части на протяжении многих лет наблюдается снижение речного стока практически во все сезоны. Под влияние этого процесса также стали попадать некоторые отрасли экономики, связанные с использованием водных ресурсов. Национальная стратегия направлена на повышение эффективности использования водных ресурсов для обеспечения устойчивого экономического роста страны в условиях изменяющегося климата и на создание условий для сохранения водных экосистем [1].

Целью настоящей работы является разработка программного комплекса для организации информационного обеспечения выявления и мониторинга «цветения» фитопланктона на водных объектах с применением данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), входных данных наземных обследований и аэрокосмического ДЗЗ, применения методов и средств ДЗЗ и геоинформационных технологий для получения, обработки и анализа геоданных.

Основная часть

Водные экосистемы являются, без преувеличения, особым достоянием Беларуси и одной из основных составляющих экологического каркаса особо охраняемых природных территорий, таких как национальные парки «Нарочанский» и «Браславские озера».

Отношения, связанные с использованием и охраной водных объектов на особо охраняемых природных территориях (ООПТ), регулируются законодательством Республики Беларусь об охране и использовании вод, если иное не установлено законодательством Республики Беларусь об ООПТ [2].

Водные объекты республики обеспечивают население широким спектром необходимых экосистемных услуг, которые включают воду для питья, ирригации, рыболовства, отдыха, поддержания биоразнообразия, круговорота и аккумуляции биогенных веществ и загрязнителей.

Интенсивное использование водных ресурсов влечет за собой резкое изменение их качественных параметров в результате сброса в воду самых разнообразных загрязнителей антропогенного происхождения, а их естественные экосистемы разрушаются. Вода теряет способность к самоочищению.

Основными источниками загрязнения являются сточные воды промышленных и коммунальных предприятий, крупных животноводческих комплексов и ферм, ливневые стоки в городах и смыв дождевыми потоками ядохимикатов и удобрений с полей. Значительную опасность для водоемов представляют смыываемые с сельскохозяйственных полей нитраты, фосфаты и калийные удобрения [3].

Сельское хозяйство и охрана окружающей среды находятся в неразрывной взаимосвязи и оказывают все возрастающее влияние на природную среду. Сельскохозяйственное производство непосредственно связано с использованием компонентов природной среды и в значительной степени находится в зависимости от природных факторов. Широкое применение интенсивных технологий, химизация сельскохозяйственного производства, функционирование крупных животноводческих комплексов вызывают долгосрочные экологические последствия, затрагивающие все компоненты природной среды [4].

Общие методы ведения сельского хозяйства, такие как воздействие на почву удобрений и пестицидов, и концентрация скота вносят свой вклад в загрязнение воды. Вода, насыщенная фосфором и нитратами, приводит к цветению водорослей и другим проблемам, включая массовый замор рыбы.

Стратегическая цель в области сохранения водного потенциала страны состоит в повышении эффективности использования и улучшении качества водных ресурсов, сбалансированных с потребностями общества и возможным изменением климата. Достижение этой цели потребует комплексного подхода к решению организационных, правовых и финансово-экономических проблем водопользования и охраны вод.

Все воды подлежат охране от загрязнения, засорения и других вредных воздействий, которые могут ухудшить условия водообеспечения, привести к уменьшению рыбных и иных запасов водного промысла, ухудшению условий существования диких животных, снижению урожайности земель и другим неблагоприятным явлениям по причине изменения физических, химических и биологических показателей качества вод, снижения их способности к естественному очищению.

Для предотвращения загрязнения водных объектов, а также для сохранения среды обитания животного и растительного мира на землях, прилегающих к речным руслам или акваториям водоемов, устанавливаются водоохранные зоны, а в их пределах выделяются прибрежные полосы строго охраняемого режима. В целях охраны водных объектов, которые используются для хозяйственно-питьевого водообеспечения, в местах водозабора устанавливается зона санитарной охраны.

Прибрежные полосы являются природоохранной территорией с режимом ограниченной хозяйственной деятельности. В них запрещаются:

- распашка земель, садоводство и овощеводство;
- выпас скота;
- хранение и использование ядохимикатов и минеральных удобрений;
- размещение садоводческих товариществ, баз отдыха, палаточных городков, стоянок автотранспорта и сельскохозяйственной техники;
- строительство зданий и сооружений, мойка и техническое обслуживание транспортных средств и техники [5].

Очевидно, что необходимы механизмы четкого, оперативного и универсального контроля ключевых характеристик водных объектов, которые, учитывая большие территории, занимаемые водоемами, возможны только с применением данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Применение современных технологий в области ДЗЗ позволяет вывести на качественно новый уровень работы во многих научноемких областях, в том числе в области мониторинга и охраны окружающей среды, устойчивого использования природных ресурсов.

Значение водных экосистем обуславливает необходимость оперативного контроля их состояния и происходящих в них негативных явлений, одним из которых является быстрое массовое развитие планктонных микроводорослей («цветение» фитопланктона).

Это проблема в современных условиях глобального изменения климата является одной из наиболее актуальных мировых проблем в области изучения и рационального использования водных ресурсов [6]. Массовое развитие микроводорослей наблюдается во всех регионах мира. Основное внимание при этом сосредоточено на различных морских объектах [7–8]. Наиболее близкими к нашей территории из таких объектов являются акватории Балтийского и Черного морей.

В последние годы также появляются работы по изучению вызывающих «цветение» водорослей и цианобактерий в озерах различных регионов [9–10]. Однако пресные водоемы изучены хуже ввиду их меньшего объема относительно всех мировых водных ресурсов (97,5 % приходится на соленую воду и 2,5 % на пресную), кардинально других спектральных характеристик, что ведет за собой ограничения в использовании космических аппаратов и их сенсоров, и более сложных условий оценки из-за высокого содержания взвешенных веществ.

Массовое «цветение» фитопланктона влечет существенные экономические, экологические и социальные потери, которые складываются из:

- ухудшения рекреационной привлекательности водоемов, вследствие низкой прозрачности и неприятного запаха воды, наличия биомассы водорослей в различной стадии разложения в местах массового отдыха (пляжи, парковые зоны и т.п.);
- снижения биологического разнообразия водоемов в следствие гибели водных животных от недостатка кислорода при разложении большого количества органического вещества биомассы водорослей;
- ухудшения санитарно-эпидемиологической обстановки на водоемах в следствии усиления микробиальных процессов при разложении биомассы водорослей и погибших от недостатка кислорода организмов, а также выделении токсических веществ организмами фитопланктона при «цветении»;

– потеря непосредственно ихтиомассы вследствие гибели рыбы (погибшая рыба не подлежит реализации, переработке или использованию каким-либо иным способом, кроме утилизации) при недостатке кислорода в периоды отмирания водорослей, исхудания рыбы и потери ею товарного вида;

– имиджевые потери, так как «цветение» фитопланктона и все сопутствующие негативные явления происходят в разгар туристического сезона и в местах скопления иностранных и белорусских туристов.

Микроводоросли и цианобактерии являются неотъемлемой частью первичных планктонных производителей (фитопланктона) водоемов, которые обеспечивают новообразование органического вещества и обогащение воды кислородом в результате процесса фотосинтеза. В то же время интенсивное развитие фитопланктона может стать фактором вторичного загрязнения водоемов. В условиях повышенных температур и притока органического вещества и биогенных элементов развитие фитопланктона приобретает массовый характер. Опасность чрезмерного развития фитопланктона связано не только с возможным поглощением кислорода в период их отмирания, но и с продуцированием некоторыми видами организмов опасных токсических веществ. Многочисленными работами доказано продуцирование представителями фитопланктона нейро-, гепато-, цитотоксинов и кожных ядов [11–15].

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. Так, периодичность проведения гидробиологических наблюдений Белгидромета на постоянных пунктах на всех поверхностных водных объектах составляет один раз в год каждые два года (на трансграничных участках рек и р. Свислочь – 1 раз в год). Очевидно, что периодичность гидробиологических наблюдений водных экосистем не соответствует современным вызовам.

Методы ДЗЗ имеют большой потенциал, поскольку позволяют значительно ускорить получение необходимой информации о состоянии конкретных водоемов, однако требуют серьезного анализа и подготовки алгоритмов для получения адекватных данных о составных компонентах спектральных характеристик воды.

Безусловно важным моментом является возможность спутников охватывать одновременно большое количество водоемов для последующего анализа снимков. На данный момент необходимо решить ряд проблем для того, чтобы использование методов ДЗЗ было возможно на регулярной основе. Имеющиеся методики нельзя переносить на материковые воды без существенных изменений и дополнений [16–17]. Материковые воды в большинстве случаев имеют гораздо более сложную оптическую структуру по сравнению с океанами, поскольку оптически активные компоненты присутствуют в воде пресных водоемов в значительно большем количестве и способны изменяться независимо друг от друга. Эти оптически активные компоненты, как и сама вода, оказывают влияние на оптический ответ воды [17]. Спутники с мультиспектральными сенсорами, такие как IKONOS, LISS 3 и 4, SPOT 4 и 5 или Landsat 5–9 с высоким пространственным разрешением (от 4 до 30 м), хоть и были разработаны для изучения наземных объектов, могут быть использованы для изучения пространственных характеристик озер с минимальной площадью около гектара, однако, спектральные и радиометрические характеристики данных инструментов могут ограничивать их применение на водных объектах [18–19]. Сенсоры, разработанные для изучения океанов, такие как MODIS и MERIS имеют частоту получения снимков от 1 до 3 дней, их спектральные характеристики хорошо подходят для определения составляющих спектра воды, а также поправок на атмосферу. Однако эти приборы имеют серьезный недостаток в виде их относительно низкого пространственного разрешения снимков, варьирующегося между 250 и 1000 м.

Некоторые авторы обращают внимание на высококачественные снимки высокого разрешения, получаемые с помощью как беспилотных, так и пилотируемых летательных аппаратов. Данный способ получения снимков безусловно подходит для исследования конкретных водоемов и участков водотоков, однако малопригоден в случае необходимости одновременного исследования многих водных объектов [16].

Для решения задач по оперативному выявлению цветения водоемов в рамках подпрограммы 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2021–2025 годы выполняется мероприятие 17 «Создать программный комплекс выявления и мониторинга «цветения» фитопланктона на водных объектах с применением данных дистанционного зондирования Земли» коллективом авторов в составе со-

трудников биологического факультета Белорусского государственного университета и научно-инженерного республиканского унитарного предприятия «Геоинформационные системы».

Выполнение исследований и разработка технологии автоматизированного выявления и мониторинга «цветения» фитопланктона на водных объектах с применением данных ДЗ3 осуществляется на модельных озерах, находящихся на территории Государственного природоохранного учреждения Национальный парк «Нарочанский» (ГПУ НП «Нарочанский») ввиду многолетнего опыта изучения озер Нарочанского региона.

Активное сельскохозяйственное производство и, как следствие, усиление биогенной нагрузки на водосбор привели к прогрессирующему эвтрофированию водоемов в 1970-х годах. В дальнейшем, благодаря целенаправленному снижению биогенной нагрузки, в результате осуществления программы экологического оздоровления Нарочанских озер существенно снизились концентрации азота и фосфора в их воде.

В работе [20] представлен анализ многолетних данных по концентрации хлорофилла-а в Нарочанских озерах. Результаты анализа позволяют сделать вывод о исходном влиянии на динамику хлорофилла антропогенного эвтрофирования и природоохранных мероприятий.

Одним из основных параметров гидроэкологической характеристики водоемов является концентрация хлорофилла-а, которая характеризует уровень развития первичных планктональных продуцентов и, следовательно, является одним из основных критериев степени биогенной нагрузки и трофности водного объекта.

При исследовании фитопланктона в Нарочанской группе озер свою сложность внесли несколько факторов: в неглубоких водоемах и водоемах с высокой прозрачностью, отражение дна будет вносить погрешность в анализ спектральной характеристики воды, более того, погруженные макрофиты различной структуры и глубины распространения будут серьезно влиять на полученный спектр. Также очевидно, что в материковых водах содержание взвешенного вещества выше, чем в «синих» океанических водах. И, наконец, различные группы фитопланктона и супензий сильно изменяют спектральный ответ [11–12]. Данные факторы легли в основу обработки только той области модельных озер, которые не покрыты макрофитами и имеют глубину водоема более 2 метров. Благодаря точной батиметрии и слою макрофитов ГПУ НП «Нарочанский» были извлечены спорные области и сформирован слой, исключающий погрешности и неточности обработки.

Проанализировав данные различных спутников, было принято решение использовать спутниковую группировку Европейского космического агентства Sentinel-2, состоящую из 3 аппаратов. Данное решение было обусловлено следующими факторами: общедоступность данных, периодичность съемки каждые 2–3 дня, высокое пространственное разрешение 10 м, наличие каналов для построения спектральных индексов и полосы захвата в 290 км.

Проверка наличия актуальных данных ДЗ3 Sentinel-2 производится на основе сервиса app.spectator.earth, содержащего актуальные данные спутниковых пролетов, а также данных о местоположении области интересов. Сервис предоставляет данные о пролетах Sentinel-2 с расписанием дат и времени пролетов на месяц над территорией исследования. Данные постоянно обновляются после каждого пролета. Информация пролетов над областью интересов регистрируется и хранится в базе данных PostgreSQL.

Получение данных ДЗ3 Sentinel-2 для обработки производится в автоматическом режиме, на основе данных о пролетах на территорию ГПУ НП «Нарочанский», с сервиса Copernicus Data Space Ecosystem. В качестве данных о местоположении используется векторный слой озер.

Маскирование облачности основывается на сопоставлении спутниковых данных с маской облачности, если это необходимо, и ее векторизация. Для построения маски облачности используется модель для сегментации облаков, теней и дымки на спутниковых снимках Sentinel-2. Далее каналы спутникового снимка, используемые в тематическом дешифрировании для выявления и мониторинга «цветения» фитопланктона, обрезаются по полученному векторному слою маски облачности.

Обрезка снимков по области интересов подразумевает выделение только той необходимой области, которая должна участвовать в дальнейшей обработке. Данная операция производится на основе векторного слоя озер, в котором заранее извлечены макрофиты и иные территории, вносящие погрешности в обработку, для получения более точной информации о цветении водоемов.

Выявление «цветения» фитопланктона на спутниковых снимках Sentinel-2 в водных объектах производится путем расчета нормализованного разностного индекса хлорофилла-а (NDCI). Физическая сущность индекса NDCI является отношение разности коэффициентов спектральной яркости на пи-

ках поглощения (705 нм) и отражения (665 нм) хлорофилла-а к сумме этих показателей. Для спутника Sentinel-2 индекс NDCI рассчитывается как $\frac{B5 - B4}{B5 + B4}$, где B5 и B4 соответствующие каналы спутника.

Главной целью применения индекса NDCI было повышение точности поиска хлорофилла-а в мутных продуктивных водах с использованием простой в реализации, интуитивно понятной и универсальной модели.

На основе предыдущего этапа по пороговому значению выявляются области цветение фитопланктона и зоны его наибольшей концентрации, а также рассчитывается зональная статистика. Пороговое значение определяется на основе зависимости полевых данных хлорофилла-а от рассчитанных значений спектрального индекса NDCI по данным Sentinel-2. При этом строится точечный график этой зависимости и по нему подбирается аппроксимирующая функция. На основании данной функции рассчитывается значение NDCI, соответствующее концентрации хлорофилла-а в 20 мкг/л (критическое значение концентрации хлорофилла-а). Превышение данного показателя концентрации хлорофилла-а в водных объектах свидетельствует о распространяющихся негативных процессах, связанных с «цветением» фитопланктона. Публикация полученных векторных слоев зональной статистики и «цветения» фитопланктона на водных объектах производится в базу геоданных PostgreSQL.

На основе рис. 1 и 2 можно соотнести данные спутниковых RGB съемок Sentinel-2 в период масштабного распространения фитопланктона и выявленные комплексом векторные слои «цветения» фитопланктона по методике, представленной выше, на озеро Большие Швакшты.

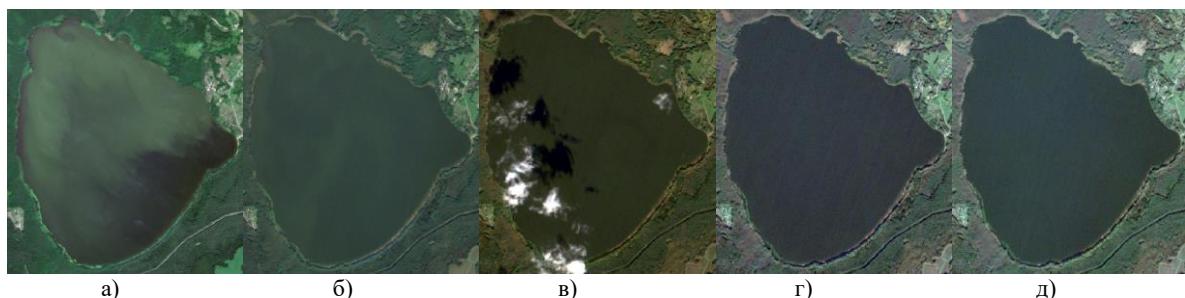


Рис. 1. Спутниковые RGB снимки Sentinel-2 в периоды «цветения» озера Большие Швакшты:
а) 11.07.2024, б) 24.09.2024, в) 12.10.2024, г) 17.10.2024, д) 19.10.2024

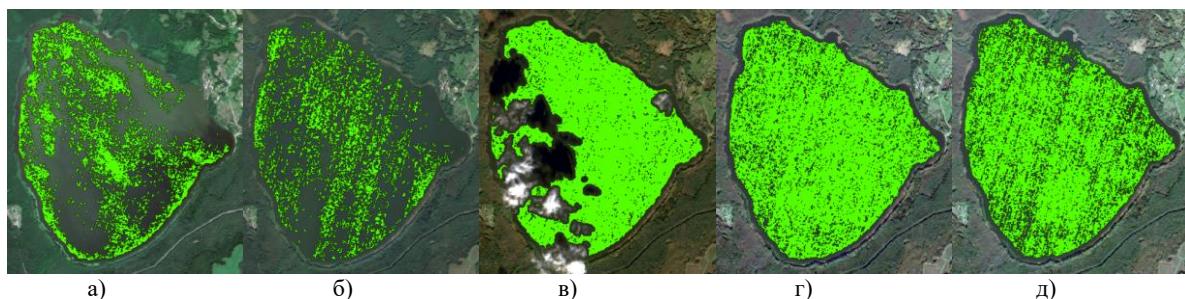


Рис. 2. Векторные слои «цветения» фитопланктона на озере Большие Швакшты, выявленные комплексом:
а) 11.07.2024, б) 24.09.2024, в) 12.10.2024, г) 17.10.2024, д) 19.10.2024

В табл. 1 приведены основные показатели таблицы атрибутов векторного слоя зональной статистики «цветения» фитопланктона на озеро Большие Швакшты, формируемые комплексом при обработке.

Таблица 1. Основные показатели таблицы атрибутов векторного слоя зональной статистики «цветения» фитопланктона на озеро Большие Швакшты

Дата	Название	min	max	std	mean	median	Процент без-облачной терри-тории, %	Процент «цвете-ния» фитопланк-тона, %
11.07.2024	Большие Швакшты	0,011961	0,05575	0,0043	0,029892	0,029887	100	38
24.09.2024	Большие Швакшты	0,007825	0,060342	0,004852	0,029442	0,029435	100	33
12.10.2024	Большие Швакшты	0,018821	0,070154	0,00513	0,040321	0,040336	71	69
17.10.2024	Большие Швакшты	0,015566	0,066944	0,005251	0,037442	0,037383	100	91
19.10.2024	Большие Швакшты	0,008776	0,06561	0,005878	0,036153	0,036124	100	83

Комплекс производит обработку ежегодно в период начала апреля – конец октября. Всего с 2022 по 2024 год в обработке участвовало 122 съемки Sentinel-2. В 2022 году было обработано 26 съемок, в 2023 – 47, в 2024 году – 49. Такое низкое количество обработанных съемок за 2022 год было обусловлено высокой облачностью в период обработки и началом апробации технологии в период с мая по сентябрь. Если брать в отдельности каждое озеро, то в среднем мы имеем от 20 до 30 безоблачных съемок за 7 месяцев. При этом комплекс производит обработку озер ГПУ НП «Нарочанский» при облачности менее 70 % процентов над территорией парка.

Заключение

Разработка технологии выявления и мониторинга «цветения» фитопланктона на водных объектах с применением данных ДЗЗ позволит кардинально улучшить мониторинг поверхностных вод и использовать эти данные для планирования и осуществления природоохранных, рекреационных и хозяйственных мероприятий. Технология выявления и мониторинга «цветения» фитопланктона разрабатывалась как унифицированная система и данный подход позволяет масштабировать и распространять ее на другие водные объекты страны.

Возможность оперативного выявления и мониторинга «цветений» фитопланктона на водных объектах в пределах больших территорий позволит принимать меры для предотвращения или снижения негативных последствий «цветений», к которым можно отнести:

- оперативные рекомендации по временному ограничению рекреационного и хозяйственного использования водоемов при резком развитии «цветения» фитопланктона;
- принятие управленческих решений по снижению биогенной нагрузки на водные объекты при регулярной регистрации «цветений»;
- изменение сроков промыслового лова рыбы с целью недопущения массовых заморов в период «цветения» и при отмирании и разложении биомассы водорослей при регистрации начальных стадий развития «цветений»;
- увеличения водообмена с целью предотвращения экспоненциального роста биомассы водорослей в период «цветения» в водоемах с регулируемым гидрологическим режимом (пруды, водохранилища и т.п.);
- регулирование туристических потоков в пределах ООПТ и их перераспределения на различные водные объекты в течение сезона с целью предоставления качественных рекреационных услуг;
- возможность оперативного контроля и проведения специальных дополнительных исследований при выявлении резких негативных тенденций экологического состояния водоемов, не дожидаясь обращений граждан или органов государственного управления, не связанных с мониторингом водоемов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22 февраля 2022 г. № 91 «О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года» [Электронный ресурс] // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22200091>. Дата доступа: 27.04.2025.
2. Цыганова, А. А. Правовая охрана водных ресурсов в Республике Беларусь / А. А. Цыганова, Е. Л. Ионас. – Текст: электронный // Система управления экологической безопасностью: сборник трудов XVIII международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 23-24 мая 2024 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2024. – С. 44–49.
3. Васильева, Н. В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебно-методическое пособие / Н. В. Васильева. – Горки: БГСХА, 2023. – 165 с.
4. Чернов, А. В. Некоторые проблемы правовой охраны окружающей среды в сельском хозяйстве / Чернов А. В // Современные тенденции правового регулирования экологических отношений: Материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–27 апреля 2013 г. / редкол.: С. А. Балашенко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2013. – С. 84–86.
5. Дуктов, А. П. Экология аквакультуры. Курс лекций: учебно-методическое пособие / А. П. Дуктов, В. И. Лавушев. – Горки: БГСХА, 2022. – 103 с.
6. Рябушко, Л. И. Потенциально опасные микроводоросли Азово-Черноморского бассейна. / Л. И. Рябушко // Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского НАН Украины. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – 288 с.
7. GEOHAB (Global Ecology and Oceanography of Harmful Algae Blooms), Science Plan // Eds P. Glibert, G. Pitcher. – Baltimore, Paris: SCOR and IOC, 2001. – P. 86.
8. Potentially Harmful Microalgae of the Western Indian Ocean // A Guide based on a preliminary survey, IOC, Manuals and Guides. №41.- UNESCO, 2001. – 105 p.

9. Gkelis, S. Diversity of Hepatotoxic Microcystins and Bioactive Anabaenopeptins in Cyanobacterial Blooms from Greek Freshwaters. / S. Gkelis, V. Harjunpa, T. Lanaras, K. Sivonen // Environmental Toxicology, 20(3), 2005. – P. 249–256.
10. Belykh O. I., Sorokovikova E. G., Fedorova G. A., Kaluzhnaya O. V., Korneva E. S., Sakirko M. V., Sherbakova T. A., 2011. Presence and genetic diversity of microcystin-producing cyanobacteria (Anabaena and *Microcystis*) in Lake Kotokel (Russia, Lake Baikal Region). *Hydrobiologia*. – P. 241–252.
11. Carmichael, W. W. Cyanobacteria secondary metabolitescyanotoxins. *Journal of Applied Bacteriology*, 1992. – P. 445–459.
12. Codd, G. A. Cyanobacterial toxins: occurrence, properties and biological significance. *Water Science and Technology*, 32, 1995. – P. 149–156.
13. Chorus, I., & Bartram, J. (Eds.), *Toxic cyanobacteria in water. A guide to public health consequences, monitoring and management*. London: E & FN Spon, WHO. 1999, P. 416.
14. Harada, K., Tsuyoshi, M., Takayuki, S., Kiyonaga, F., Fumio, K., Ho-dong, P., et al. Co-production of Microcystins and Aeruginopeptins by natural cyanobacterial bloom. *Environmental Toxicology*, 16, 2001. – P. 298–305.
15. Albay, M., Akcaalan, R., Tufekci, H., Metcalf, J., Beattie, K., & Codd, G. Depth profiles of cyanobacterial hepatotoxins (microcystins) in three Turkish freshwater lakes. *Hydrobiologia*, 505, 2003. – P. 89–95.
16. Kubiak, Katarzyna & Kotlarz, Jan & Mazur, Anna. (2016). Monitoring Cyanobacteria Blooms in Freshwater Lakes using Remote Sensing Methods. *Polish Journal of Environmental Studies*. – 25 – doi: 10.15244/pjoes/60175.
17. CREW Centre of Expertise for Waters The use of remote sensing to detect and monitor algal and cyanobacterial blooms [Электронный ресурс] – 2012 – режим доступа: https://www.crew.ac.uk/sites/www.crew.ac.uk/files/sites/default/files/publication/Remote_sensing_algal_monitoring.pdf.
18. Kutser, Tiit & Rohtla, L. & Strömbbeck, Niklas & Vahtmäe, Ele. (2006). Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 67 – pp. 303-312 – doi: 10.1016/j.ecss.2005.11.024.
19. A. N. Tyler, E. Svab, T. Preston, M. Présing & W. A. Kovács (2006) Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment, *International Journal of Remote Sensing*. – 27:8 – pp.1521-1537 – doi: 10.1080/01431160500419311.
20. Адамович, Б. В. Дивергенция динамики хлорофилла в Нарочанских озерах. / Б. В. Адамович, Р.З. Ковалевская, Н. П. Радчикова, Т. В. Жукова, Т. М. Михеева, А. Б. Медвинский, Н. И. Нуриева, А. В. Русаков // Биофизика. – Т. 60. – № 4. – 2015: ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», Российская академия наук, Отделение биохимии, биофизики и химии физиологически активных соединений РАН, Т. 60, № 4. – 2015. – С. 769–776.