

ОБЗОРЫ/REVIEWS

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.969-987>

УДК 631.95:626.81:504.064.36



Анализ эффективности методов экологического мониторинга поверхностных водоемов в условиях их эвтрофирования со стороны объектов сельского хозяйства (обзор)

© 2024. А. С. Неваев✉

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск, Российская Федерация

Высокий уровень антропогенного воздействия на почвы пахотных земель и пастбищ привел к их неспособности удерживать и разлагать переносимые с водой поллютанты, включая биогенные вещества. Отдельного внимания при этом заслуживают объекты сельского хозяйства, которые с одной стороны являются крупнейшими водопотребителями во всем мире, а с другой вносят значительный вклад в биогенное загрязнение поверхностных вод. Вследствие стабильного насыщения водоемов биогенными элементами сохраняется угроза повсеместного увеличения биомассы фитопланктона, существенно влияющего на качество водных ресурсов. Несмотря на имеющиеся меры по борьбе с данным явлением, вопрос осуществления экологического мониторинга водных объектов в условиях эвтрофирования остается открытым. В статье приведена краткая характеристика наиболее неблагоприятных, с точки зрения биогенной нагрузки на водоемы, объектов агропромышленного комплекса. Рассмотрены особенности механизма насыщения водной среды биогенными элементами со стороны сельскохозяйственных территорий. Освещены основные методы экологического мониторинга поверхностных вод, дана краткая характеристика их эффективности в условиях эвтрофирования, а также представлен обзор инновационных методов и технических решений в рассматриваемой области. Акцентируется внимание на необходимости создания комплексных систем экологического мониторинга водных объектов, сочетающих полезные свойства трех его основных методов (физико-химического, биологического и дистанционного), а также учитывающих процесс эвтрофирования, в том числе со стороны объектов сельского хозяйства. Разработка подобных комплексов позволит расширить функционал, повысить качество и эффективность экологического мониторинга поверхностных вод, располагающихся вблизи сельскохозяйственных объектов.

Ключевые слова: экология, фитопланктон, водные объекты, агропромышленный комплекс, загрязнение, биогенные вещества

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Неваев А. С. Анализ эффективности методов экологического мониторинга поверхностных водоемов в условиях их эвтрофирования со стороны объектов сельского хозяйства. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(6):969–987. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.969-987>

Поступила: 14.06.2024

Принята к публикации: 19.11.2024

Опубликована онлайн: 25.12.2024

Effectiveness analysis of surface reservoirs environmental monitoring methods in conditions of their eutrophication by agricultural facilities (review)

© 2024. Alexey S. Nevaev✉

Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation

The high level of anthropogenic impact on the soils of arable lands and pastures has led to their inability to retain and decompose pollutants, including biogenic substances, transported with water. At the same time, agricultural facilities deserve special attention, which on the one hand are the largest water consumers worldwide, and on the other hand make a significant contribution to the biogenic pollution of surface waters. Due to the stable biogenic saturation of reservoirs, there is a threat of a widespread increase in phytoplankton biomass, which significantly affects the quality of water resources. Despite the existing measures to combat this phenomenon, the issue of water bodies environmental monitoring is open in conditions of eutrophication. The article provides a brief description of the most unfavorable agricultural facilities in terms of biogenic load on reservoirs. The features of the biogenic saturation mechanism of the aquatic environment from agricultural territories are considered. The article highlights the main methods of environmental monitoring of the aquatic environment, provides a brief description of their effectiveness in conditions of eutrophication, and provides an overview of innovative methods and technical solutions in the field under consideration. The author focuses attention on the need to create integrated environmental monitoring systems for water bodies that combine the useful properties of its three main methods (physico-chemical,

biological and remote), as well as taking into account the process of eutrophication, including from agricultural facilities. The development of such complexes will expand the functionality, improve the quality and efficiency of environmental monitoring of surface waters located near agricultural facilities.

Keywords: ecology, phytoplankton, water bodies, agro-industrial complex, pollution, biogenic substances

Acknowledgments: the work was done without financial support in the framework of the initiative topics.

The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the author stated no conflict of interest.

For citation: Nevaev A. S. Effectiveness analysis of surface reservoirs environmental monitoring methods in conditions of their eutrophication by agricultural facilities. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(6):969–987. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.969-987>

Received: 14.06.2024

Accepted for publication: 19.11.2024

Published online: 25.12.2024

На протяжении XX–XXI вв. вплоть до 2021 г. отмечается существенный динамический рост водопотребления во всем мире [1]. При этом сельское хозяйство является одним из самых крупнейших мировых водопотребителей¹. На сельское хозяйство, по данным 2021 г., приходится порядка 72 % общемирового объема забираемых поверхностных и подземных вод, которые преимущественно идут на орошение².

В России, по данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, за 2022 г.³ на долю использования свежей воды на нужды, связанные с сельским хозяйством, приходилось 13,4 %, на производственные – 53,2 %, а на долю питьевых и хозяйственно-бытовых нужд – 15,3 %. Однако сельское хозяйство входит в группу видов экономической деятельности, которая в 2022 г. стала второй по величине (17863,56 млн м³)

забора воды из природных источников в РФ, что составило 28,7 % от общего объема извлеченной воды из природных источников за этот период⁴.

Сельское хозяйство вносит и значительный вклад в загрязнение водных объектов. В частности, основной причиной загрязнения природных водоемов со стороны сельскохозяйственных объектов является сброс сточных вод. По оценкам ФАО, в окружающую среду ежегодно сбрасывается порядка 2520 км³ сточных вод, из которых значительную часть составляют именно сельскохозяйственные (рис. 1)⁵. Для сравнения в Российской Федерации только за 2022 г.⁶ группа видов экономической деятельности, куда входит сельское хозяйство, осуществила сброс сточных вод в поверхностные водные объекты объемом 4502,9 млн м³.

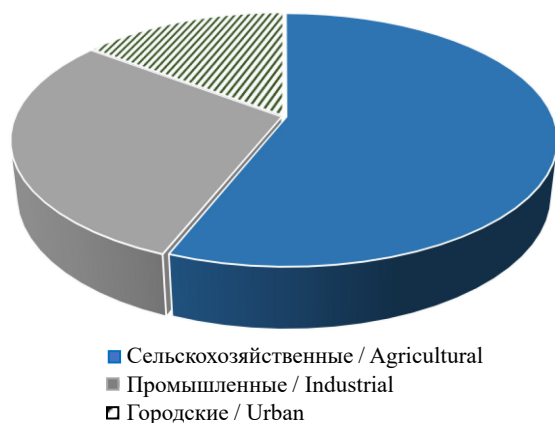


Рис. 1. Структура ежегодного объема сброса сточных вод по оценкам ФАО, км³ /

Fig. 1. Structure of annual volume of wastewater discharge according to FAO estimates, km³

¹ФАО. Краткий обзор. Положение дел в области продовольствия и сельского хозяйства – 2020. Решение проблем с водой в сельском хозяйстве. Рим, 2020. 28 с. URL: <http://www.fao.org/3/cb1441ru/CB1441RU.pdf>

²ФАО. Состояние мировых земельных и водных ресурсов для производства продовольствия и ведения сельского хозяйства. Системы на пределе. Сводный доклад 2021. Рим, 2021. 99 с.

URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ee4e8f1c-6197-4ce2-a8e6-eb4af260212c/content>

³Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации, 2022.

[Электронный ресурс]. URL:

https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2022/?ysclid=lx0k8jvbch319644087 (дата обращения: 04.06.2024).

⁴Там же.

⁵URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ee4e8f1c-6197-4ce2-a8e6-eb4af260212c/content>

⁶URL:

https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2022/?ysclid=lx0k8jvbch319644087

Необходимо отметить, что в настоящее время существенное антропогенное воздействие на почвы пахотных земель и пастбищ привело к их неспособности удерживать и разлагать переносимые с водой поллютанты, в результате чего в поверхностные водные объекты все чаще попадают значительные концентрации различных загрязнителей.

Так, в результате смыва почв, связанного с движением поверхностного стока (полив, осадки, таяние снега), происходит вымывание соединений фосфора, калия и азота из грунта, составляющих основу минеральных удобрений, которые затем попадают в природные водоемы и приводят к их эвтрофикации. В особенности это характерно для хозяйств, которые превышают нормы внесения минеральных удобрений и не соблюдают требуемых технологических параметров.

В свою очередь, объемы сельскохозяйственного использования искусственных удобрений, содержащих реактивные формы азота, растут с 2000 года. В 2017 г. было достигнуто рекордное значение по использованию азотсодержащих удобрений – 110 млн тонн. Кроме того, на долю промышленного производства удобрений и биологической фиксации азота в сельском хозяйстве приходится порядка 80 % антропогенной фиксации азота⁷.

Глобальные темпы роста использования фосфора в сельском хозяйстве сравнительно невелики. Своего максимального значения они достигли в 2016 г. и составили 45 млн тонн. Однако общий объем поступления фосфора в водные объекты в результате антропогенного использования составляет порядка 1,47 млн тонн в год. При этом 62 % приходится на точечные источники (бытовые и промышленные), а 38 % – на диффузные (сельское хозяйство)⁸.

Сельскохозяйственное использование калия достигло своего пикового значения в 2018 г., составив почти 39 млн тонн. И хотя его влияние на эвтрофикационный процесс поверхностных вод не настолько выражено по сравнению с фосфором и азотом, он также способствует повышению минерализации природных водных объектов⁹.

Важно подчеркнуть, что процесс эвтрофикации, помимо негативных экологических последствий для водоема, является неблагоприятным с точки зрения ведения сельского

хозяйства. Прежде всего, это касается существенного изменения органолептических характеристик и физико-химических параметров воды [2], приводя к невозможности ее использования для орошения. Кроме того, жизнедеятельность значительных скоплений фитопланктона (ФП) сопряжена с поступлением в водную среду ряда высокотоксичных соединений (альготоксинов) [2, 3].

Отрицательные последствия эвтрофирования водоемов безусловно затрагивают и рыбное хозяйство, где в условиях накопления в водной среде соединений аммонийного азота, аммиака и фосфора на фоне повышенных значений pH и сниженной жесткости воды широкое распространение получило заболевание – жаберный некроз [4].

Высокие значения уровня pH также являются благоприятными условиями для развития патогенной микрофлоры и возбудителей кишечных заболеваний, в том числе холерного вибриона [5].

Таким образом, профилактика и контроль «цветения» водорослей является предметом многих научных исследований последних лет. Перед научным сообществом достаточно остро стоит задача изучения антропогенного воздействия поверхностных стоков и поступления биогенных элементов в водную среду поверхностных водных объектов, используемых в оросительных целях, а также оценки экологического состояния данных водоемов для оросительных мелиораций [5].

Оказать помощь в данной ситуации способны системы экологического мониторинга, которые позволяют заблаговременно отследить патологическую изменчивость объектов наблюдения, не допустив при этом развития в них необратимых последствий.

Однако в настоящее время существует необходимость в их совершенствовании как с точки зрения эффективности, так и гармонизации основных применяемых на практике методов [6].

Более того, учитывая современный уровень технического прогресса, целесообразна разработка новейших систем экологического мониторинга поверхностных вод с привлечением современного оборудования и информационных технологий [7, 8, 9]. Принимая во внимание сложившуюся ситуацию с поступлением

⁷URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ee4e8f1c-6197-4ce2-a8e6-cb4af260212c/content>

⁸Там же.

⁹Там же.

в водную среду значительного количества биогенов со стороны агропромышленного комплекса, важным условием для таких систем будет являться применимость для оценки антропогенного влияния сельского хозяйства на объекты наблюдения [10], а также учет фактора эвтрофикации и контроль за развитием фитопланктонных сообществ [11, 12].

Цель обзора – выявление специфики и анализ эффективности применяемых способов экологического мониторинга водной среды в условиях ее антропогенного эвтрофирования со стороны объектов сельского хозяйства, а также обзор инновационных решений в рассматриваемой области.

Материал и методы. В качестве материалов по данной теме служили статистические данные продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), Росводресурсов, Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, научные труды отечественных и зарубежных ученых, российские и международные патенты на полезные модели и изобретения. Поиск научных работ проводили с привлечением ресурсов поисковой системы eLibrary и сети Интернет. Патентный поиск осуществляли с помощью информационно-поисковой системы ФИПС. Было изучено около 86 научных работ и патентов, из которых впоследствии для более детального изучения отобрали 52 наиболее значимых. Обзор включает самые актуальные технические решения за период 2020–2023 гг. В исследовании применяли методы системного комплексного изучения, сравнения, обобщения и анализа данных.

Основная часть. *Общая характеристика биогенного загрязнения поверхностных вод со стороны объектов сельского хозяйства.* К неконтролируемым точечным источникам загрязнения водоемов можно отнести различные сельскохозяйственные объекты с предусмотренными, на первый взгляд, техническими решениями по отводу и очистке сточных вод, но с отсутствующим должным уровнем контроля за их объемами и составом. Среди них можно выделить [13]:

- хозяйственно-бытовые воды небольших сельских поселений (менее 5 тыс. чел.) и фермерских хозяйств;
- малые животноводческие фермы (не более 3 тыс. голов) и птицеводческие фабрики (менее 50 кур-несушек и 300 цыплят-бройлеров);

- сельскохозяйственные предприятия с отсутствующими или неэффективными очистными сооружениями;

- малые тепличные комплексы (менее 1 га);
- дренажные и дренажно-сбросные воды с орошаемых и осушаемых сельскохозяйственных земель.

Диффузными источниками загрязнения чаще всего выступают сельскохозяйственные угодья, территории сельских поселений, животноводческих ферм, сельскохозяйственных производственных предприятий, земли фермерских и дачных кооперативов с непредусмотренными или не соответствующими установленным требованиям и нормам техническими решениями по управлению стоками.

Усилить неблагоприятное влияние на водные объекты способны факторы, провоцирующие неконтролируемые диффузные стоки. К ним относятся [13]:

- внесение удобрений на поля без запашки или/и в неподходящее время (период дождей), внесение избыточного количества удобрений и навоза;
- несоблюдение требований и правил по обращению, хранению и утилизации различных препаратов, включая минеральные удобрения;
- внесение доз химических мелиорантов, превышающих поглотительную способность почв;
- нарушения при хранении, транспортировке, складировании и утилизации отходов сельскохозяйственного производства (навоза, помета и др.);
- некорректная организация кормления животных и ошибки при выборе места их выгула, устройство водопоя непосредственно из водного объекта;
- игнорирование условий размещения и границ санитарно-защитных зон при устройстве сельскохозяйственных объектов (угодий, поселений, подсобных хозяйств и т.д.);
- недостаточность или полное отсутствие контроля за сбросом дренажно-коллекторных вод с мелиоративных систем.

Наиболее опасными для поверхностных вод являются стоки животноводческих и птицеводческих предприятий ввиду высокого содержания в них азота, фосфора, серы и тяжелых металлов, что неминуемо ведет к ускорению процесса их естественной эвтрофикации. К примеру, ежедневный объем жидких стоков для крупных животноводческих хозяйств составляет от 100 до 1500 м³ [13]. Технологическое несовершенство организованных

сточных вод объектов животноводства приводит к недостаточной их очистке, нанося тем самым существенный экологический урон природным водам на прилегающих территориях. Более того, нередко территории ферм и птицефабрик выступают в качестве мест складирования навоза и помета, стоки которых свободно распространяются по местному рельефу, особенно в периоды снеготаяния.

Наиболее загрязненными принято считать стоки свиноводческих комплексов, так как сухой остаток в них превышает 6 г/л, содержание общего азота (N) – 1000 мг/л, P_2O_5 – 190 мг/л [13]. Главной причиной загрязнения водоемов жидкими животноводческими стоками является недостаточное техническое оснащение и отсутствие адаптированных под гидросмыв очистных сооружений.

Так как большинство мелких ферм и хозяйств зачастую не оснащаются средствами утилизации жидких стоков, их допустимо отнести к неконтролируемым точечным и диффузионным источникам загрязнения, оказывающим негативное воздействие на малые реки и различные внутрибассейновые водоемы.

Отдельного внимания заслуживают сбросы тепличных комплексов, в стоках которых можно обнаружить достаточно широкий спектр загрязнителей, обусловленный наличием производственных и дренажных стоков. Последние являются источником физического, биологического и химического загрязнения ввиду высокого содержания в них механических и биологических загрязнителей, препаратов, а также растворенных минеральных и органических удобрений.

Необходимо отметить, что максимальное количество загрязнителей выносится в малые водные объекты, в случае присутствия распашанных пойм и использования интенсивных технологий в местном сельскохозяйственном производстве. Согласно расчетам для поймы реки Яхромы видно, что с оросительно-осушительных систем при модуле дренажного стока 0,05 л/с на га в среднем за один год выносится более 21 кг/га биогенных веществ [14, 15].

Одним из главных источников площадного загрязнения поверхностных водоемов выступают сельскохозяйственные угодья, располагающиеся на водосборах речных бассейнов, где на отдельных участках водосбора диффузный сток связан преимущественно

с процессами эрозии, выщелачивания и растворения. Причем в среднем с 1 га пашни ежегодно может выноситься до 80 кг нитратного азота, 3 кг фосфора и 60 кг калия в зависимости от типа почв, количества и характера осадков, вида растительности и дозы вносимых удобрений [15].

Исходя из многочисленности объектов агропромышленного комплекса (АПК), негативно влияющих на поверхностные водные объекты, специфики их функционирования и технического оснащения, а также сложности учета механизма поступления биогенных элементов в водоемы, целесообразной представляется оценка антропогенного влияния сельскохозяйственных объектов посредством регистрации соответствующих реакций водной среды и ее экосистем с помощью известных методов экологического мониторинга.

Основные виды экологического мониторинга поверхностных водных объектов. Осуществление экологического мониторинга требует учета немалого количества факторов и условий, связанных как с особенностями проведения мониторинговых процедур, так и свойствами среды, по отношению к которой они реализуются. В противном случае существует высокая вероятность достижения незначительного результата или вовсе полной несостоятельности запланированных мероприятий [16].

Экологический мониторинг является комплексным, многопрофильным процессом, что определяет широкий спектр методов и приемов, используемых при его осуществлении (рис. 2)¹⁰.

Остановимся на основных методах экологического мониторинга водной среды – физико-химическом, биологическом и дистанционном (физический и химический методы применяются довольно редко ввиду трудоемкости измерительного процесса и необходимости специфического оборудования, а также зачастую являются неотъемлемой частью физико-химического метода).

Наиболее распространенным и эффективным методом осуществления экологического мониторинга водных объектов является физико-химический метод с использованием широкого перечня оборудования, позволяющего обеспечить комплексную оценку состояния водной среды с высокой достоверностью¹¹.

¹⁰Нечаева И. А. Физико-химические методы анализа объектов окружающей среды: конспект лекций. Кафедра «Химия». 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://lektsia.com/18x58fe.html> (дата обращения 04.06.2024).

¹¹Апкин Р. Н., Минакова Е. А. Экологический мониторинг. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2015. 127 с. URL: https://lib.kgeu.ru/irbis64r_15/scan/12эл.pdf

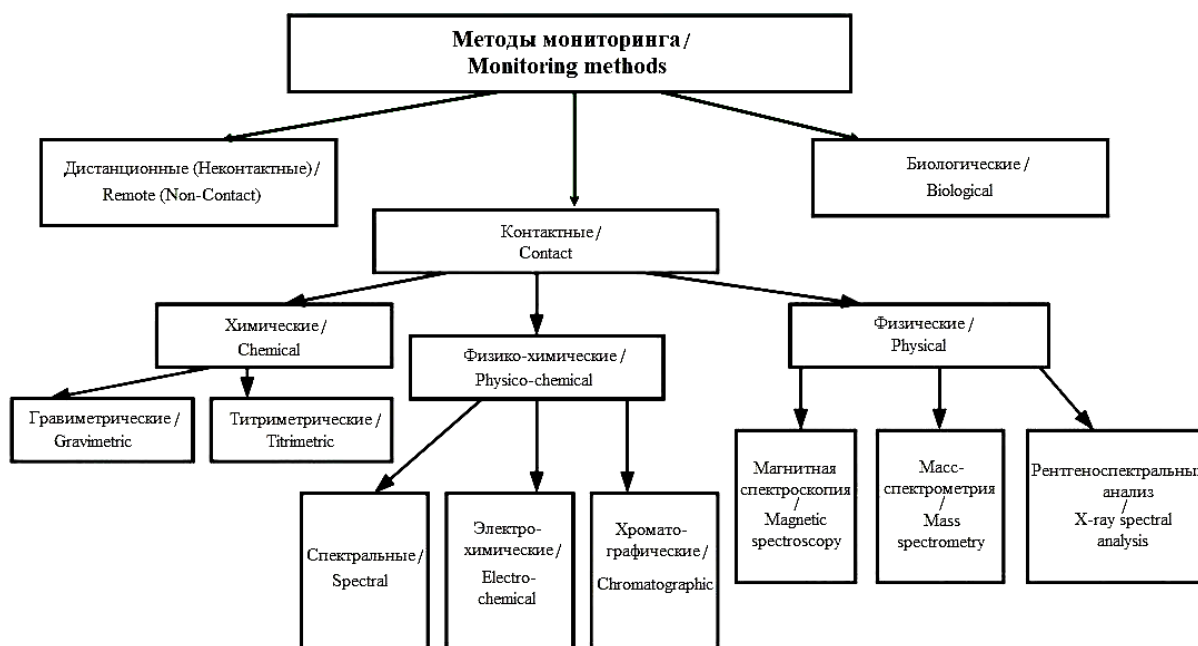


Рис. 2. Структура применяемых методов экологического мониторинга /
Fig. 2. The structure of applied environmental monitoring methods

В то же время, несмотря на относительную доступность используемых приборов и его высокую популярность, данный метод является контактным, что выражается в локальности его применения¹². Активно используется в ходе изучения водоемов, подверженных эвтрофированию.

Добиться большей масштабности мониторинговых мероприятий на водном объекте позволяют дистанционные (неконтактные) методы¹³ (табл.). Они основаны на бесконтактном получении информации об объекте мониторинга с помощью удаленных приборов (датчиков), размещаемых преимущественно на беспилотных летательных или космических аппаратах.

Среди известных дистанционных (неконтактных) методов мониторинга эвтрофированных водных объектов особую известность за последнее время получили методы с применением геоинформационных систем (ГИС) и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [17].

В частности, ДЗЗ использовалось для изучения уровня эвтрофикации прибрежных вод Гданьского и Калининградского заливов Балтийского моря. Для данных акваторий была проведена общая оценка уровня эвтрофикации, согласно которой подтверждено существование проблемы эвтрофирования данных объектов,

а площадь с положительным вегетационным индексом (NDVI) составила около 30,6 тыс. м² [18].

Дистанционные технологии определения скоплений фитопланктонных сообществ применялись также и на внутренних пресноводных водоемах нашей страны. Так, например, известен случай успешного осуществления мониторинга развития сине-зеленых водорослей в Куйбышевском водохранилище с помощью трех наиболее информативных спектральных индексов (NDVI, NDWI, SIPI) [19].

Спутниковый мониторинг процессов эвтрофирования использовался на трансграничных участках р. Аргунь, итоговые результаты которого были получены с помощью консолидации спектрального индекса цветения поверхностных водорослей (SABI) и спектрального водного индекса MNDWI [20].

При мониторинге с помощью ДЗЗ поверхностных водных объектов, подвергшихся эвтрофированию, важнейшим показателем является концентрация фотосинтезирующего пигмента (ФП) – хлорофилла *a*. Пространственно-временная изменчивость данного показателя представляет собой основной индикатор в изучении как качества эвтрофированных вод, так и их биологической продуктивности посредством эмпирического соотношения концентрации хлорофилла *a* и спектральных характеристик водного объекта [21].

¹² Апки́н Р. Н., Минакова Е. А. Указ. соч.

¹³ Там же.

Таблица – Основные преимущества и недостатки различных методов экологического мониторинга водных объектов в условиях их ускоренного эвтрофирования /
Table – The main advantages and disadvantages of various methods of environmental monitoring of water bodies in conditions of their accelerated eutrophication

Методы экологического мониторинга / Methods of environmental monitoring	Краткое описание метода / A brief description of the method	Преимущества / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Физико-химический / Physico-chemical	Основан на проведении аналитических реакций, результаты которых определяются посредством специальных приборов / Based on conducting analytical reactions, the results of which are determined by means of special devices.	- Относительная доступность приборов на рынке / Relative availability of devices on the market. - Высокий предел обнаружения / High detection limit. - Быстроτητα и автоматизация процесса анализа / Speed and automation of the analysis process. - Возможность определения параметров водной среды, используемых при оценке уровня эвтрофикации / The ability to determine the parameters of the aquatic environment used in assessing the level of eutrophication.	- Необходимость отбора проб / It is necessary to take samples. - Ограниченность зоны мониторинга / Limited monitoring area. - Отсутствие учета искажения ФП считываемых водных параметров, в рамках мониторинговых задач, отличных от эвтрофикационной оценки / Lack of consideration of phytoplankton distortion of the water parameters, within the framework of monitoring tasks other than eutrophication assessment.
Дистанционный (неконтактный) / Remote (non-contact)	Основан на использовании зондирующих полей и съемочного оборудования без непосредственного контакта с объектом мониторинга / Based on the use of probing fields and filming equipment without direct contact with the monitoring object.	- Масштабная зона мониторинга / Large-scale monitoring area. - Осуществление удаленного и непрерывного наблюдения / Implementation of remote and continuous monitoring. - Оперативная передача данных / Operational data transfer. - Возможность обнаружения высокопродуктивных зон водного объекта / The ability to detect highly productive areas of a water body. - Наблюдение за движением скоплений ФП / Monitoring the movement of phytoplankton clusters.	- Необходимость дорогостоящего оборудования / It is necessary to use expensive equipment. - Искажение результатов мониторинга вследствие многофакторности оптических свойств некоторых акваторий / Distortion of monitoring results due to the multifactorial optical properties of some water areas. - Учет изменчивости ограниченного спектра параметров водной среды / Taking into account the variability of a limited range of parameters of the aquatic environment.
Биологический / Biological	Основан на наблюдении за составом и численностью видов-индикаторов (биоиндикаторов) / Based on the observation of the composition and abundance of indicator species (bioindicators).	- Низкая стоимость исследований / Low cost of research. - Учет состояния и изменчивости биоты водных объектов / Accounting for the state and variability of the biocenosis of water bodies. - Возможность проведения оценки тенденций изменений экологических систем за длительный промежуток времени / The ability to assess trends in the variability of ecological systems over a long period of time. - В качестве индикатора может выступать сам ФП, а также гидробионты, питающиеся им и накапливающие в своих тканях аллотоксины / Phytoplankton itself can act as an indicator, as well as hydrobionts that feed on it and accumulate algotoxins in their tissues.	- Высокая трудоемкость исследований / High labor intensity of research. - Сложность обращения с «живыми индикаторами» / The difficulty of handling live indicators. - Сложность обработки полученных результатов по причине необходимости учета большого числа факторов, влияющих на биоту / The complexity of processing the results obtained due to the need to take into account a large number of factors affecting the biocenosis. - Ограниченность зоны мониторинга / Limited monitoring area. - Невозможность универсального применения ввиду отличия видовых структур биоты у разных типов водных объектов / The impossibility of universal application due to differences in the species structures of biocenosis in different types of water bodies.

Однако применяемые на практике алгоритмы оценки концентрации хлорофилла *a*, по данным спутниковых цветковых сканеров, иногда могут приводить к ошибочным результатам. С целью получения более достоверных данных необходима отдельная корректировка используемых алгоритмов для акваторий, оптические свойства которых определяются не только ФП¹⁴.

На сегодняшний день также известно о некоторых попытках повысить эффективность методов экологического мониторинга поверхностных водных объектов на основе ДЗЗ. В ходе изучения программного инструментария для повышения качества данных спутникового зондирования земли при мониторинге гидробиологических процессов мелководного водоема, на примере снимков акватории Азовского моря была продемонстрирована высокая эффективность алгоритма обработки, основанного на методе локальных бинарных шаблонов (Local Binary Patterns (LBP)) [22].

Перспективным направлением развития мониторинговых методов ДЗЗ также является повышение разрешения спектрально-аналитических снимков методом слияния, который заключается в совмещении панхроматического изображения высокого разрешения с мультиспектральным низкого разрешения, позволяющего выдать более качественную информацию об объектах на спутниковом снимке [23].

Однако следует заметить, что повышение детализации спутникового изображения не способно в полной мере отразить полноту гидробиологических процессов водоема и всесторонне оценить степень влияния на него эвтрофикационного процесса.

Отдельного внимания заслуживают биологические методы мониторинга поверхностных вод, которые активно развиваются в настоящее время. Их главным преимуществом является получение объективной картины о происходящих изменениях в экосистеме водного объекта, подвергнувшегося антропогенному воздействию.

Нередко они дополняют физико-химические методы в рамках комплексного исследования водной среды [24, 25, 26].

Биологический подход также имеет место и при изучении эвтрофированных водоемов. Одним из основных направлений в данном случае является контроль и оценка влияния

токсинов и экзометаболитов, продуцируемых крупными колониями ФП, на биологические ресурсы природных вод, зачастую извлекаемых человеком для употребления в пищу [27, 28].

Оценить качество водной среды возможно и по наличию специфических представителей фитопланктонных сообществ в водоеме. Так, Е. С. Слайковская и Н. В. Герман [29] провели успешную оценку экологического состояния пруда в одном из микрорайонов г. Волгограда. Согласно проведенным биологическим исследованиям, были выявлены доминирующие виды ФП, свидетельствующие о сильном органическом загрязнении изучаемого водного объекта.

Несмотря на очевидные преимущества биологического подхода к осуществлению экологического мониторинга поверхностных вод, данные методы хорошо себя зарекомендовали лишь в качестве единичных мониторинговых операций, сопряженных с отбором проб и проведением лабораторных изысканий. Выбор биологических методов, при необходимости проведения длительных или непрерывных мониторинговых мероприятий, на практике осуществляется крайне редко. Это обусловлено как сложностью организации подобных мониторинговых процессов, так и трудоемкостью работ с биологическими объектами.

Таким образом, учитывая преимущества и недостатки вышеназванных подходов к осуществлению экологического мониторинга, а также особенности их применения в условиях эвтрофированных вод, перспективным направлением его развития стоит считать консолидацию известных методов в единый мониторинговый комплекс с привлечением инновационных решений и технологий в данной области. Такая комплексная система позволит достичь сочетания лучших свойств известных мониторинговых методик, повысить качество мониторинговых операций и их результатов, а также обеспечить объективную оценку влияния на водную среду эвтрофикационного процесса, значительный вклад в ускорение которого вносит сельское хозяйство.

Инновационные способы осуществления экологического мониторинга поверхностных вод. Принимая во внимание широкое географическое распространение объектов сельского хозяйства, а также их нередкое размещение в непосредственной близости от различных водных

¹⁴Кутявина Т. И. Изучение процессов эвтрофикации водных объектов Кировской области: автореф. дис.... канд. биол. наук. Киров, 2017. 139 с. URL: https://diss.vlsu.ru/uploads/media/Avtoreferat_Kutjavina_TI_itog.pdf

объектов, следует рассматривать инновационные решения в области экологического мониторинга не только с точки зрения применяемых методов, но также и учитывая всевозможное многообразие водоемов, на которых они реализуются.

В настоящее время среди современной научной литературы и объектов интеллектуальной собственности встречается множество перспективных подходов по осуществлению мониторинговых мероприятий на водных объектах.

За последние годы (2020–2023) особую популярность приобрели биологические методы. Например, А. В. Николаева и др. [30] представили способ проведения экологического мониторинга акватории пролива Бьеркезунд Финского залива с помощью аквакультуры, позволяющего делать вывод об экологическом состоянии морской экосистемы по результатам исследования гидробионтов, морской воды, донных отложений, фито- и зоопланктона. Суть способа заключается в осуществлении отбора проб морской воды, донных отложений, фито- и зоопланктона из различных точек исследуемой акватории с последующим выявлением отклонений полученных результатов от нормативных показателей и известных многолетних данных. Способ также предполагает исследование мышечной ткани гидробионтов, в качестве которых выступают речная дрейссена *Dreissena polymorpha*, радужная форель *Parasalmo mykiss* и балтийский сиг *Coregonus lavaretus*, на содержание в ней нефтепродуктов.

В 2022 г. М. Т. Гайсин и М. М. Родькин [31] разработали способ проведения экологического мониторинга за состоянием участка морской акватории Цемесской бухты Черного моря с применением биологических тест-объектов. Этот способ во многом схож с вышеописанным, однако в качестве анализируемых гидробионтов рассматриваются черноморская мидия *Mytilus galloprovincialis* и устрица черноморская *Ostrea edulis*, размещаемые в специальных пластиковых садках поблизости от промышленных объектов, способных оказывать негативное влияние на исследуемый участок акватории.

Стоит отметить, что оба вышеперечисленных способа относятся прежде всего к мониторингу углеводородного загрязнения морских экосистем, располагающихся вблизи объектов нефтяной промышленности. В рамках их осуществления предполагается проведение анализа показателей водной среды, отбор проб

ФП и размещение в специальных емкостях, чувствительных к загрязнению тест-объектов. Это может стать полезной основой для разработки мониторинговых методов биологической направленности, входящих в состав комплексной системы мониторинга поверхностных вод, учитывающей антропогенную нагрузку со стороны АПК.

Проводя патентный поиск по тематике экологического мониторинга водных объектов, среди новейших изобретений можно также обнаружить попытки объединения его основных методов.

Так, в 2021 г. А. В. Шатохин и др. [32] запатентовали автоматизированный биосенсорный комплекс раннего оповещения для экологического мониторинга водной среды, который представляет собой результат объединения биологического и дистанционного методов мониторинга. Суть изобретения заключается в осуществлении непрерывной биологической оценки качества вод посредством фиксации величины раскрытия створок мидий и передачи соответствующей информации на удаленный аппаратно-программный блок фиксации с помощью сети GSM.

Позже похожая система В. В. Трусевича и В. Ю. Журавского [33] также позволила получить положительные результаты автоматизированного биосенсорного контроля нефтяного загрязнения вод Севастопольского водоканала за несколько лет с привлечением в качестве тест-объектов пресноводных двусторчатых моллюсков-перловиц (*Unio pictorum*).

Как известно, отдельные виды гидробионтов, в частности моллюски, способны накапливать в тканях своего организма некоторые виды альготоксинов, продуцируемых ФП [34, 35].

В связи с этим исследование поведенческих и физиологических реакций данного вида гидробионтов в условиях повышенных концентраций альготоксинов, в том числе с применением средств автоматизации, имеет научный и практический интерес в области экологического мониторинга эвтрофированных водоемов. Однако необходимо провести больше исследований по расширению и выявлению наиболее оптимального видового состава тест-объектов, способных чутко реагировать на соответствующие изменения водной среды различных типов поверхностных вод.

Попытки объединения с дистанционными мониторинговыми методами были замечены и в отношении физико-химических методов.

В первую очередь, особое внимание заслуживают способы с использованием беспилотных аппаратов, которые за последнее время приобрели некоторую популярность.

В 2020 г. Чан-Цзин Ву (Shang-Jung Wu) [36] изобрел многопозиционную систему мониторинга качества воды с временным разделением, состоящую из станции управления и беспилотного летательного аппарата (БПЛА), снабженного устройством измерения качества воды. Получая команду от станции управления посредством беспроводной передачи, БПЛА вылетает к месту определения параметров воды по заданной траектории. Далее, с помощью измерительного устройства выполняется процедура сбора данных и последующая их дистанционная передача на станцию управления или отдельный сервер.

Разработка новейших способов осуществления экологического мониторинга поверхностных вод не ограничивается только летательными моделями.

Так, А. М. Бражникова и А. М. Бражников [37] презентовали автономный подводный аппарат класса «микро» для мониторинга экологического состояния малых водоемов. Конструкция аппарата позволяет осуществлять надводный автоматический и полуавтоматический мониторинг параметров воды в нужных координатах с помощью системы GPS, а также погружение на заданную глубину и отбор проб объемом 300 мл.

В 2022 г. А. Е. Новиков и др. [38] получили патент на плавсредство для мониторинга природных и искусственных водоемов, обеспечивающее дистанционный мониторинг показателей состава и качества воды с помощью блока измерительных зондов. Перемещение данного устройства осуществляется оператором удаленно, а передача получаемых в ходе мониторинга данных передается по сети Wi-Fi или технологии LoRaWan на мобильный персональный компьютер.

Стоит отметить, что использование беспилотных аппаратов позволяет автоматизировать и обеспечить непрерывность процесса наблюдения, что является весьма важным условием осуществления экологического мониторинга водоемов, подверженных диффузному биогенному загрязнению со стороны объектов сельского хозяйства. Дополнительное оснащение подобных аппаратов измерительными устройствами, прямо или косвенно регистрирующими ФП, позволит им найти свое широкое

применение в сегменте физико-химической направленности новейших мониторинговых комплексов водной среды.

Не стоит на месте и разработка мониторинговых решений ограниченной мобильности.

В 2021 г. С. Н. Воробьев и др. [39] разработали устройство определения гидро-химико-физических параметров водной среды. Оно предназначено для определения физико-химического состояния водной среды поверхностных вод, а также отбора проб для последующего анализа. Представляет собой единую герметичную емкость с датчиками измерения физико-химических параметров, выполненную с возможностью автоматической подачи в нее заборной воды. Само техническое устройство устанавливается на судно, а запись получаемых с помощью датчиков данных через установленные промежутки времени происходит на специальное регистрирующее устройство. Измерение параметров водной среды может осуществляться как во время стоянки, так и по ходу движения судна.

К недостаткам данного технического решения относятся низкая автономность и ограниченная мобильность, обусловленные строгой зависимостью от траектории движения судна, управляемого человеком. При этом если допустить, что реализация данного устройства будет носить обязательный характер для каждого судовладельца, а результаты измерения передаваться на удаленное устройство, появляется возможность построения комплексной сети физико-химического мониторинга водной среды, обеспечиваемой совокупным движением судов на водном объекте или его акватории. Расширение мониторингового функционала за счет снабжения данного устройства измерительной аппаратурой, позволяющей регистрировать биомассу ФП, станет хорошим подспорьем при мониторинге значительных по площади эвтрофированных водоемов.

В 2022 г. С. Н. Охрименко и др. [40] получили патент на универсальный буй для экологического мониторинга водоемов. Изобретение представляет собой герметичный корпус с системой всплытия-погружения, снабженный блоком электронных модулей измерительной и регистрирующей аппаратуры. Постановка в зоне мониторинга осуществляется с помощью объекта-носителя посредством опускания конструкции устройства на дно водоема. После чего происходит подвсплытие (установка) корпуса на необходимое для проведения измерений

водной среды заглубление. Универсальный буй также имеет возможность измерения параметров воздушной среды и снабжен антеннами радио- и акустической связи.

Следует отметить, что в описании к данному изобретению отсутствует упоминание о конкретных параметрах воды, измеряемых в ходе мониторинга. Если предположить, что среди них также имеют место показатели, качественно и количественно отражающие присутствие в водной среде ФП, то данное техническое решение, при условии массового рассредоточения устройств на водном объекте, также сможет стать частью комплекса экологического мониторинга поверхностных водоемов, подверженных эвтрофированию.

Схожая система наблюдения за качеством природных вод, включающая, помимо стационарных автоматических станций контроля загрязнения воды, малогабаритные (переносные) станции, которые размещаются в местах сброса сточных вод, была предложена С. С. Вороничем и др. [41]. Предполагается, что данная система позволит определять до 22 физико-химических показателей, однако на сегодняшний день авторы сообщают об успешных испытаниях лишь 5 из них: водородный показатель (рН); температура воды; растворенный кислород; азот нитратный; химическое потребление кислорода (ХПК). Тем не менее, даже текущего количества параметров может быть достаточно, чтобы судить о присутствии фактора эвтрофикации.

Стоит упомянуть и о научной публикации М. М. Трофимчука [42], где была рассмотрена возможность интегральной оценки экологического состояния водных объектов с помощью определения энтропийного индекса. Данный индекс позволяет, используя традиционные гидрохимические показатели – данные о концентрации растворенного кислорода и температуре воды, судить о состоянии экосистемы наблюдаемого водоема. Более того, автором был получен патент на изобретение способа оценки экологического состояния водных объектов [43], согласно материалам которого получение необходимых для расчёта данных происходит за счет установки на водном объекте датчиков температуры и кислорода. При этом также отмечается возможность определения данных в автоматическом режиме с последующей их передачей по телекоммуникационным каналам связи. Позже автором были опубликованы результаты практического

использования данного индекса для оценки экологического состояния широкого спектра водных объектов, где была подчеркнута целесообразность его применения, а также обсуждены преимущества и перспективы предложенного подхода в области мониторинга поверхностных вод [44].

Отличительной особенностью рассмотренного выше способа является возможность отражать полную совокупность и взаимодействие естественных биологических и биохимических процессов водного объекта, обеспечивая тем самым объективную и достоверную оценку его экологического состояния. Его реализация возможна как в полевых, так и лабораторных условиях, не требуя при этом значительного количества времени и специальной профессиональной подготовки. К тому же способ на основе энтропийного индекса потенциально имеет высокий шанс занять свое место в составе инновационных комплексных систем экологического мониторинга.

Следует подчеркнуть, что развитие технических решений и инновационных подходов ограниченной мобильности в области экологического мониторинга поверхностных вод, безусловно, является перспективным направлением в совершенствовании существующих мониторинговых систем. Однако их реализация на крупных водоемах, зачастую имеющих более высокий уровень концентрации сельскохозяйственных объектов вдоль своих берегов, требует привлечения гораздо более внушительных средств по сравнению с системами на основе беспилотных аппаратов. Несмотря на широкие функциональные возможности, необходимый учет ряда организационных, технических, правовых и экономических аспектов существенно ограничивает их выбор на фоне развития автоматизированных систем.

Среди современной научной литературы в области экологического мониторинга можно также найти работы, посвященные тематике измерения флуоресцентных характеристик водной среды. В 2022 г. Л. П. Некрасова [45] опубликовала результаты исследования загрязненности Москвы-реки и ее притоков (Пахры, Котловки, Сетуни) с помощью метода флуоресцентной спектроскопии. В ходе исследования была выявлена положительная корреляция между оптической плотностью (0,66), а также интенсивностью флуоресценции (0,74) с содержанием растворённого органического углерода (РОУ). Однако автором подчерки-

вается, что рассматриваемый в статье метод позволяет получить только полуколичественную оценку загрязнённости воды и не может быть использован для количественного определения индивидуальных веществ.

В том же году О. А. Плотниковой и др. [46] был проведен сравнительный анализ избирательности классического и синхронного флуоресцентных методов определения экотоксикантов полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Было установлено, что использование синхронных спектров позволяет не только улучшить избирательность флуоресцентного анализа ПАУ, но также и найти успешное применение для идентификации отдельных ПАУ при экологическом мониторинге экотоксикантов в водных объектах окружающей среды.

Немногом ранее З. А. Темердашев и др. [47] провели сравнительную характеристику спектрометрических методов определения хлорофилла *a* в природных водах, где была показана предпочтительность определения хлорофилла с помощью его флуоресценции, а также продемонстрированы результаты реализации разработанной методики экстракционно-флуоресцентного определения хлорофилла *a*. По заявлениям авторов, представленная в работе методика прошла метрологическую аттестацию и была внесена в реестр Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений.

Не стала исключением и разработка технических устройств, определяющих флуоресценцию хлорофилла *a* в водной среде. К примеру, в 2020 г. У. С. Янг и др. (W. S. Yang et al.) [48] запатентовали флуоресцентный датчик для измерения количества микроводорослей и способ его эксплуатации. Известно, что явление флуоресценции возникает из-за поглощения хлорофиллом света, при возвращении его молекулы из возбуждённого состояния в основное [49]. Учитывая данную особенность, вышеупомянутый датчик позволяет определить плотность микроводорослей в водной среде путем формирования возбуждающей свет ультразвуковой волны в области измерения. Плотность водорослей в данном случае определяется по интенсивности обратного флуоресцентного сигнала.

В 2021 г. В. А. Крикун и П. А. Салюк [50] изобрели автономный подводный зонд-флуориметр, который наряду с регистрацией излучения флуоресценции хлорофилла *a*

позволяет определять флуоресценцию растворенных органических веществ, комбинационное рассеяние воды и интенсивность лазерного излучения. Зонд также снабжен датчиками температуры и давления забортной воды, а в качестве источника возбуждения флуоресценции выступает полупроводниковый лазер.

Принимая в расчет возможность определения флуоресцентными методами различных видов загрязнений водной среды, а также наличия в ней ФП, данный подход определенно станет неотъемлемой частью инновационных мониторинговых комплексов, способных учитывать весь спектр негативного антропогенного влияния на поверхностные водоемы. Кроме того, разработка технических решений, позволяющих определять хлорофилл *a* и плотность ФП, станет полезным дополнением к автоматизированным беспилотным или стационарным сегментам физико-химического мониторинга подверженных эвтрофированию поверхностных вод, в том числе со стороны объектов сельского хозяйства.

Особое место в области экологического мониторинга водных объектов занимают комплексные мониторинговые системы, специализирующиеся на учете фактора «цветения» и контроле численности местного ФП сообщества.

В 2022 г. были опубликованы материалы патента на изобретение системы и способа стереоскопического мониторинга с интеллектуальным анализом данных о вредном цветении озерных цианобактерий за авторством Б. Цинь и др. (B. Qin et al.) [51].

Данный комплекс предполагает получение информации, связанной с «цветением» водорослей в озере, тремя разными способами: с помощью дистанционного зондирования, автоматического мониторинга параметров водной среды, а также контактно с последующей передачей полученных данных по сети Интернет в центр информационной обработки.

Необходимо подчеркнуть, что под дистанционным зондированием в данном случае понимается спутниковая съемка. Автоматический мониторинг представлен мониторинговой сетью, образованной множеством автоматических станций, соединенных с помощью беспроводной сети. А контактный метод осуществляется посредством отбора проб вручную с последующим анализом концентрации биогенных элементов, преимущественно соединений фосфора и азота, а также иных веществ, продуцируемых цианобактериями в ходе своей жизнедеятельности.

По полученным данным происходит вычисление трехмерной численной модели озера, оценка риска и прогноз «цветения» водорослей с отображением данной информации на общедоступной платформе.

В нашей стране также ведутся разработки комплексных систем мониторинга поверхностных вод, подверженных эвтрофированию.

К примеру, Н. А. Голушков и А. Г. Кокуев [52] в 2023 г. предложили собственную интегрированную платформу мониторинга водной среды прудового хозяйства, которая состоит из 6 основных модулей. Особого внимания заслуживает модуль анализа и оценки состояния водной среды, с помощью которого определяется как общее качество воды, так и оценка уровня эвтрофикации водоема. Благодаря модулю комплексного мониторинга на ежедневной основе осуществляется автоматическое определение значений химического потребления кислорода (ХПК), биохимической потребности в кислороде (BOD), концентраций аммиачного азота и общего фосфора. Отмечается, что пространственные и атрибутивные данные наблюдаемого водного объекта в режиме реального времени поступают со спутника дистанционного зондирования и мониторингового оборудования.

К сожалению, в статье не упоминается об учете в ходе мониторингового процесса спектральных вегетационных индексов, которые успешно зарекомендовали себя при дистанционном мониторинге эвтрофированных водоемов. Однако вовлечение в рабочий процесс спутникового зондирования обуславливает их применение в будущем в рамках модернизации данной мониторинговой системы.

Следует отметить, что само по себе наличие разработок в области комплексного мониторинга эвтрофированных водных объектов создает предпосылки к формированию отдельного эвтрофикационного сегмента, входящего в состав инновационных мониторинговых комплексов. Учитывая колоссальную биогенную нагрузку, оказываемую объектами сельского хозяйства на прилегающие водоемы, подобный мониторинговый сегмент станет незаменимым помощником при осуществлении их полноценного экологического мониторинга.

Заключение. В рассматриваемый период (2020–2023 гг.) сельское хозяйство не только занимает ведущее положение по показателям водопотребления, но и играет ключевую роль в ускорении эвтрофикационного процесса водной

среды. Антропогенное эвтрофирование способствует дестабилизации водных экосистем, снижению их биологического разнообразия, ограничению доступа к биологическим и рекреационным ресурсам. Принимая во внимание многочисленность объектов АПК, различия в их специфике и техническом оснащении, а также сложность учета механизма поступления биогенных элементов в водоемы, эффективно оценить антропогенное влияние сельскохозяйственных объектов на поверхностные воды представляется возможным только с помощью регистрации соответствующих реакций водной среды и ее обитателей.

Наиболее подходящим для этих целей мероприятием выступает экологический мониторинг, являющийся важной составляющей любой программы по защите и сохранению водных ресурсов. При этом проведение мониторинга с использованием базовых подходов может оказаться далеко не всегда эффективным в силу наличия ряда существенных недостатков и необходимости их совершенствования, особенно в условиях высокой биогенной нагрузки со стороны АПК.

В связи с этим перспективой повышения эффективности экологического мониторинга водных объектов является консолидация известных методов в единый мониторинговый комплекс с привлечением инновационных решений и технологий в данной области. Это позволит достичь сочетания лучших свойств известных мониторинговых подходов, повысить качество и эффективность мониторинговых операций, а также максимально автоматизировать процесс проведения. При этом важным условием для таких комплексных систем будет являться возможность их применения на различных типах водных систем, что обусловлено широким географическим распространением объектов АПК, а также учет влияния на водную среду эвтрофикационного процесса, значительный вклад в ускорение которого вносит сельское хозяйство.

Анализ новейших изобретений в области экологического мониторинга поверхностных вод показал, что на сегодняшний день еще не удалось окончательно консолидировать все базовые подходы в едином техническом исполнении. Однако уже сейчас существуют некоторые перспективные методики и технические решения, которые, безусловно, должны войти в состав инновационных мониторинговых комплексов.

Список литературы

1. Коронкевич Н. И., Барабанова Е. А., Зайцева И. С. Оценка современного водопотребления в мире и на континентах, его влияние на годовой речной сток. Вестник Российской академии наук. 2022;92(3):256–264. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587322030057> EDN: KYKQEN
2. Горская О. И. Совершенствование методов альголизации и биомелиорации водоема-охладителя Ростовской АЭС и приплотинной части Цимлянского водохранилища. Глобальная ядерная безопасность. 2023;(2):14–23. DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-02> EDN: MHRNWW
3. Смирнова В. С., Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Чернова Е. Н. Состояние фитопланктона и цианотоксины в пятне «цветения» в озере Святозеро (бассейн Онежского озера, Россия). Вода и экология: проблемы и решения. 2021;(1(85)):50–60. DOI: <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2021.26.1.50-60> EDN: FFYZXV
4. Кумыков М. З. Эвтрофирование рыбохозяйственных водоемов и пути его профилактики. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2008;3(19-1):216–217. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14627281> EDN: MICHXH
5. Мелихов В. В., Фролова М. В., Зибаров А. А., Московец М. В. Экологическая оценка современной биотехнологии улучшения качества поливной воды для агроландшафтов Волго-Донского междуречья. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019;(3):94–101. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41321235> EDN: AZECKT
6. Мамась Н. Н., Горбенко А. Ю., Куденко Д. В. Актуальные подходы к эколого-гидрогеологическому мониторингу водных объектов. Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2023;(3):151–160. Режим доступа: <https://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=244> EDN: SNYIVQ
7. Кутявина Т. И., Ашихмина Т. Я. Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных объектов России (обзор). Теоретическая и прикладная экология. 2021;(2):13–21. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-013-021> EDN: QOYTRX
8. Потапов В. П., Кузьмин Д. Г., Сероус Т. О. Научно-практические основы проекта «цифровой Ускат» и особенности его реализации. Уголь. 2022;(11):40–47. DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-40-47> EDN: IXWAWA
9. Амашукели С. А. Развитие цифровизации в сфере использования и охраны водных объектов. Актуальные проблемы российского права. 2022;17(3):177–187. DOI: <https://doi.org/10.17803/1994-1471.2022.136.3.177-187> EDN: RFLRQW
10. Второй В. Ф., Второй С. В. Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов. АгроЭкоИнженерия. 2017;(92):158–166. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30258921> EDN: ZMEBEN
11. Шевырногов А. П., Высоцкая Г. С., Письман Т. И., Кононова Н. А., Ботвич И. Ю. Перспективы глобального и регионального мониторинга динамики фитопигментов в океане и на суше на основе дистанционного зондирования земли. Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2023;16(1):104–114. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50245730> EDN: ZCJMUS
12. Кутявина Т. И., Рутман В. В., Ашихмина Т. Я., Савиных В. П. Использование космических снимков для определения границ водоёмов и изучения процессов эвтрофикации. Теоретическая и прикладная экология. 2019;(3):28–33. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-028-033> EDN: DEDFQO
13. Кирейчева Л. В., Лентяева Е. А. Влияние сельскохозяйственного производства на загрязнение водных объектов. Природообустройство. 2020;(5):18–26. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011/2020-5-18-27> EDN: OMUCXC
14. Кирейчева Л. В., Лентяева Е. А. Оценка количества и качества дренажных и поверхностных вод, поступающих в речную сеть бассейна реки Волги с осушительных систем нечерноземной зоны РФ. Мелиорация земель – неотъемлемая часть восстановления и развития АПК Нечерноземной зоны Российской Федерации: мат-лы междунаро. научн.-практ. конф. М.: ВНИИ гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, 2019. С. 215–221.
15. Кирейчева Л. В., Яшин В. М., Лентяева Е. А., Тимошкин А. Д. Оценка диффузного загрязнения биогенными веществами с сельскохозяйственных угодий в бассейне реки Яхромы (Московская область). Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. научн. тр. М.: Студия Ф1, 2019. С. 379–384. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/frxpcc> EDN: FRXPCC
16. Джумабаев М. С. Экологический мониторинг объектов окружающей среды: сущность понятия. АгроЭкоИнфо. 2023;(3):7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54181337> EDN: UYDIYV
17. Болданова Е. В. Оценка трофности озера Байкал с использованием дистанционного зондирования. Географический вестник. 2022;(2(61)):73–89. DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-2-73-89> EDN: VKCWWC
18. Бабич О. О., Рада А. О., Куликова Ю. В., Сухих С. А. Изучение уровня эвтрофикации прибрежных вод Гданьского залива Балтийского моря с использованием данных дистанционного зондирования земли. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2023;(1(217)):35–42. DOI: <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-35-42> EDN: PJBUXF

19. Шерстобитов Д. Н., Ермаков В. В., Пыстин В. Н., Тупицына О. В. Мониторинг развития сине-зеленых водорослей в Куйбышевском водохранилище при помощи индексов дистанционного зондирования Земли. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023;31(2):232–240. DOI: <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-2-232-240> EDN: HCCIZZ
20. Курганович К. А. Спутниковый мониторинг процессов эвтрофирования участка трансграничной р. Аргунь (Хайлар) с использованием спектрального индекса цветения поверхностных водорослей (SABI), по данным дистанционного зондирования LANDSAT. Вестник Забайкальского государственного университета. 2022;28(7):26–33. DOI: <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2022-28-7-26-33> EDN: KCHXIF
21. Гоголев Д. Г., Буканова Т. В., Кудрявцева Е. А. Концентрация хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря летом 2018 года по спутниковым данным. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2020;(4):83–91. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44392366> EDN: RUSNPF
22. Панасенко Н. Д., Ганжур М. А., Ганжур А. П. Исследование применения космических снимков для определения объектов на поверхности водоемов. Инженерный вестник Дона. 2020;(12(72)):376–387. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44760082> EDN: UOYQOS
23. Калитов М. А. О применении спектрально-аналитической визуализации в дистанционном зондировании земли. Вестник Новгородского государственного университета. 2024;(1(135)):95–107. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2024.1\(135\).95-107](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2024.1(135).95-107) EDN: QAORRJ
24. Арсланова М. М., Шорникова Е. А., Музиева М. И. Анализ особенностей распределения гидрохимических и микробиологических показателей водотоков Сургутского и Октябрьского районов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Самарский научный вестник. 2020;9(2):15–19. DOI: <https://doi.org/10.17816/snv202102> EDN: MQPSAE
25. Гудкова Н. К., Горбунова Т. Л., Матова Н. И. Влияние полигонов ТКО на деградацию биогеоценозов прибрежных зон водотоков и Черного моря. Природообустройство. 2021;(5):117–124. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-5-117-124> EDN: YOUMNC
26. Свешникова Е. В., Романова Е. М., Любомирова В. Н., Романов В. В., Шленкина Т. М., Сергаченко С. Н. Оценка экологических процессов в ульяновских заливах реки Свияги. Ульяновский медицинско-биологический журнал. 2024;(1):130–147. DOI: <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2024-1-130-147> EDN: IMJDJI
27. Хотимченко С. А., Гмошинский И. В., Багрянцева О. В., Шатров Г. Н. Химическая безопасность пищи: развитие методической и нормативной базы. Вопросы питания. 2020;89(4):110–124. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10047> EDN: AYWXUM
28. Самойлов А. В., Сураева Н. М. Перспективы использования растительного биотестирования для поиска метаболических биомаркеров токсичного потенциала компонентов пищевых матриц (обзор). Достижения науки и техники АПК. 2021;35(4):65–71. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10411> EDN: PXBSUE
29. Слайковская Е. С., Герман Н. В. Оценка экологического состояния водоема в микрорайоне «Родниковая долина» г. Волгограда. Самарский научный вестник. 2022;11(2):120–123. DOI: <https://doi.org/10.55355/snv2022112117> EDN: OQFVMQ
30. Николаева А. В., Родькин М. М., Кулишин А. В., Давлетяров Р. Р. Способ проведения экологического мониторинга с помощью аквакультуры: пат. № 2758337 Российская Федерация. №2020130512: заяв.16.09.2020; опубл. 28.10.21. Бюл. № 31. 9 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
31. Гайсин М. Т., Родькин М. М. Способ проведения экологического мониторинга с применением биологических тест-объектов: пат. № 2802195 Российская Федерация. № 2022122236: заяв.16.08.22; опубл. 22.08.23. Бюл. №24. 7 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
32. Шатохин А. В., Селезнев И. А., Ивакин Я. А., Греков А. Н., Греков Н. А., Коровин А. Н. Автоматизированный биосенсорный комплекс раннего оповещения для экологического мониторинга водной среды: пат. № 2779728 Российская Федерация. №2021124407: заяв.16.08.21; опубл. 12.09.22. Бюл. № 15. 12 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
33. Трусевич В. В., Журавский В. Ю. Опыт использования пресноводных двустворчатых моллюсков-перловиц (*unio pictorum*) в качестве биосенсоров в системах автоматизированного биосенсорного контроля нефтяного загрязнения вод в системах водоснабжения населения. Экосистемы. 2023;34:193–198. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54133550> EDN: RYXFXF
34. Поляк Ю. М., Сухаревич В. И. Токсигенные цианобактерии: распространение, регуляция синтеза токсинов, способы их деструкции. Вода: химия и экология. 2017;(11-12):125–139. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yuuujo&ysclid=lx0sol1t463913884664> EDN: YUUIJO
35. Стоник И. В., Орлова Т. Ю. Сезонное накопление амнезиотоксина (домоевой кислоты) у промысловых двустворчатых моллюсков *mytilus trossulus gould*, 1850 и *mizuhopecten yessoensis jay*, 1850 в заливе Восток Японского моря. Биология моря. 2020;46(1):70–72. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0134347520010106> EDN: OMHLYX
36. Wu Sh.-J. Multi-location time-division water quality monitoring system: Patent US, no. 20220082546, 2020. URL: https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/US20220082546A1_20220317?q=Multi-location%20time-division%20water%20quality%20monitoring%20system&from=search_simple&hash=2009640586

37. Бражникова А. М., Бражников А. М. Автономный подводный аппарат класса «микро» для мониторинга экологического состояния малых водоемов: полезная модель № 205389 Российская Федерация. № 2021105037: заяв. 28.02.21; опубл. 13.07.2021. Бюл. № 20. 12 с.
Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
38. Новиков А. Е., Мелихов В. В., Медведева Л. Н., Костин В. Е., Московец М. В., Торопов А. Ю. Плавсредство для мониторинга природных и искусственных водоемов: полезная модель № 215787 Российская Федерация. № 2022127486: заяв. 21.10.2022; опубл. 27.12.2022. Бюл. № 36. 7 с.
Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
39. Воробьев С. Н., Луцаева И. В., Покровский О. С., Сорочинский А. В. Устройство для определения гидрохимико-физических параметров водной среды: полезная модель № 210918 Российская Федерация. № 2021137989: заяв. 21.12.2021; опубл. 13.05.2022. Бюл. № 14. 6 с.
Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
40. Охрименко С. Н., Охрименко Н. С., Рубанов И. Л. Универсальный буй для экологического мониторинга водоемов: пат. № 2796989 Российская Федерация. №2022132701: заяв.13.12.2022; опубл. 30.05.2023 Бюл. № 16. 5 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
41. Воронич С. С., Роева Н. Н., Хлопаев А. Г. Организация наблюдений за качеством природной воды на территории Московской области. Проблемы региональной экологии. 2024;(1):81–84.
DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-1-81-84> EDN: TSANVE
42. Трофимчук М. М. Энтропийный индекс – новые возможности в оценке экологического состояния водных экосистем. Метеорология и гидрология. 2020;(11):46–52.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44665531> EDN: YXDIPZ
43. Трофимчук М. М. Способ оценки экологического состояния водных объектов: пат. № 2721713 Российская Федерация. №2019133543: заяв. 21.10.2019; опубл. 21.05.2020. Бюл. № 15. 13 с.
Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
44. Трофимчук М. М. Практическое применение энтропийного индекса для оценки экологического состояния водных экосистем. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024;(2):23–37.
DOI: <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-23-37> EDN: FQTAFO
45. Некрасова Л. П. Мониторинг загрязнения природной воды методом флуоресцентной спектроскопии. Гигиена и санитария. 2022;101(5):578–582. DOI: <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-578-582> EDN: HVMCMP
46. Плотникова О. А., Тихомирова Е. И., Мельников Г. В. Сравнительный анализ избирательности флуоресцентных методов для экологического мониторинга экотоксикантов. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022;30(4):574–583.
DOI: <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-4-574-583> EDN: QWWSOK
47. Темердашев З. А., Павленко Л. Ф., Ермакова Я. С., Корпакова И. Г., Елецкий Б. Д. Экстракционно-флуориметрическое определение хлорофилла «а» в природных водах. Аналитика и контроль. 2019;23(3):323–333. DOI: <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.3.001> EDN: NURXRI
48. Yang W. S., Lee S. Q., Je Ch. H., Hwang G., Lee H. K., Seok Ya. W., et al. Fluorescence sensor for measuring microalgae and method of operating the same: Patent US, no. №20200191695, 2020. URL: https://searchplatform.rosapatent.gov.ru/doc/US20200191695A1_20200618?q=Fluorescence%20sensor%20for%20measuring%20microalgae%20and%20method%20of%20operating%20the%20same&from=search_simple&hash=971709134
49. Гольцев В. Н., Каладжи М. Х., Кузманова М. А., Аллахвердиев С. И. Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла «а» – теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 220 с.
50. Крикун В. А., Салюк П. А. Автономный подводный зонд-флуориметр: пат. № 2753651 Российская Федерация. №2021100300: заяв. 11.01.2021; опубл. 19.08.2021. Бюл. № 23. 11 с.
Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
51. Qin B., Wu T., Zhu G., Zhang Yu., Li W. Stereoscopic monitoring and data mining system and method for harmful lake cyanobacteria bloom: Patent US, no. 11402362, 2022. URL: https://searchplatform.rosapatent.gov.ru/doc/US0011402362B2_20220802?q=Stereoscopic%20monitoring%20and%20data%20mining%20system%20and%20method%20for%20harmful%20lake%20cyanobacteria%20bloom&from=search_simple&hash=134466233
52. Голушков Н. А., Кокуев А. Г. Интегрированная платформа мониторинга водной среды прудового хозяйства. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023;(1):57–63. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-57-63> EDN: GQZCBW

References

1. Koronkevich N. I., Barabanova E. A., Zaytseva I. S. Assessment of current water consumption in the world and on continents, its impact on annual river flow. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = Herald of the Russian Academy of Sciences. 2022;92(3):256–264. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587322030057>
2. Gorskaya O. Yu. Improvement of methods of algolization and biomelioration of the Rostov NPP cooling pond and the near dam part of the Tsimlyansk reservoir. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* = Global Nuclear Safety. 2023;(2):14–23. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-02>
3. Smirnova V. S., Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Chernova E. N. Phytoplankton state and cyanotoxins in the Svyatozero lake bloom spot (Onega lake basin, Russia). *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* = Water and Ecology: Problems and Solutions. 2021;(1(85)):50–60. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2021.26.1.50-60>
4. Kумыков М. З. Eutrophication of fish-husbandry water reservoir and ways of its prophylaxis. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2008;3(19-1):216–217. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14627281>
5. Melikhov V. V., Frolova M. V., Zibarov A. A., Moskovets M. V. Environmental assessment of modern biotechnology improve the quality of irrigation water for agricultural lands of the Volga-Don interfluv. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* = Proceedings of Nizhnevolzhskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2019;(3):94–101. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41321235>
6. Mamas' N. N., Gorbenko A. Yu., Kudenko D. V. Current approaches to ecological and hydrogeological monitoring of water bodies. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya*. 2023;(3):151–160. (In Russ.). URL: <https://www.rosniipm-smi.ru/article?n=244>
7. Kutayava T. I., Ashikhmina T. Ya. Current state and problems of monitoring of surface water bodies in Russia (review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2021;(2):13–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-013-021>
8. Potapov V. P., Kuzmin D. G., Serous T. O. Scientific and practical foundations of the digital Uskat project and specific features of its implementation. *Ugol'*. 2022;(11):40–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-40-47>
9. Amashukeli S. A. Development of digitalization in the field of use and protection of water bodies. *Aktual'nye problemy rossiyskogo prava* = Actual Problems of Russian Law. 2022;17(3):177–187. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17803/1994-1471.2022.136.3.177-187>
10. Vtoryy V. F., Vtoryy S. V. Prospects for environmental monitoring of agricultural facilities using unmanned aerial vehicles. *AgroEkoInzheneriya* = Agricultural Engineering (Moscow). 2017;(92):158–166. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30258921>
11. Shevyrnogov A. P., Vysotskaya G. S., Pisman T. I., Kononova N. A., Botwikh I. Yu. Perspective for global and regional monitoring of phytopigment dynamics in the ocean and land by earth remote sensing. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2023;16(1):104–114. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50245730>
12. Kutayava T. I., Rutman V. V., Ashikhmina T. Ya., Savinykh V. P. The use of satellite images to determine the boundaries of water bodies and study the processes of eutrophication. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2019;(3):28–33. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-028-033>
13. Kireycheva L. V., Lentyaeva E. A. The influence of agricultural production on pollution of water bodies. *Prirodobustroystvo* = Prirodobustroystvo. 2020;(5):18–26. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011/2020-5-18-27>
14. Kireycheva L. V., Lentyaeva E. A. Assessment of the quantity and quality of drainage and surface waters entering the river network of the Volga River basin from drainage systems of the non-chernozem zone of the Russian Federation. Land reclamation is an integral part of the formation and development of the agro-industrial complex of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation: Proceedings of the international scientific and practical conf. Moscow: *VNIIGidrotekhniki i melioratsii imeni A. N. Kostyakova*, 2019. pp. 215–221.
15. Kireycheva L. V., Yashin V. M., Lentyaeva E. A., Timoshkin A. D. Assessment of diffuse pollution with biogenic substances from agricultural lands in the Yakhroma River basin (Moscow region). Scientific problems of improving Russian rivers and ways to solve them: collection of scientific articles. Moscow: *Studiya FI*, 2019. pp. 379–384. URL: <https://www.elibrary.ru/frxpec>
16. Dzhumabaev M. S. Environmental monitoring of environmental objects: the essence of the concept. *AgroEkoInfo*. 2023;(3):7. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54181337>
17. Boldanova E. V. Evaluation of the trophic status of lake Baikal using remote sensing. *Geograficheskiy vestnik* = Geographical Bulletin. 2022;(2(61)):73–89. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-2-73-89>
18. Babich O. O., Rada A. O., Kulikova Yu. V., Sukhikh S. A. Study of coastal waters eutrophication level of Gdansk bay (Baltic sea) using earth remote sensing data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki* = Bulletin of Higher Education Institutes North Caucasus Region. Natural Sciences. 2023;(1(217)):35–42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-35-42>

19. Sherstobitov D. N., Ermakov V. V., Pystin V. N., Tupitsyna O. V. Monitoring of the development of blue-green algae in the Kuibyshev reservoir using remote sensing indices. *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* = RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2023;31(2):232–240. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-2-232-240>
20. Kurganovich K. A. The satellite monitoring of eutrophication processes in a section of the transboundary Argun (Khailar) river using the surface algal bloom index (SABI) according to LANDSAT remote sensing data. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* = Transbaikal State University Journal. 2022;28(7):26–33. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2022-28-7-26-33>
21. Gogolev D. G., Bukanova T. V., Kudryavtseva E. A. Kontsentratsiya khlorofilla «a» v yugo-vostochnoy chasti Baltiyskogo morya letom 2018 goda po sputnikovym dannym. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Estestvennye i meditsinskie nauki* = IKBFU's Vestnik. Series: Natural and Medical Sciences. 2020;(4):83–91. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44392366>
22. Panasenko N. D., Ganzhur M. A., Ganzhur A. P. Multichannel satellite image application for water surface objects identification. *Inzhenernyy vestnik Dona* = Engineering Journal of Don. 2020;(12(72)):376–387. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44760082>
23. Kalitov M. A. About the application of multispectral visualization in earth remote sensing. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2024;(1(135)):95–107. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2024.1\(135\).95-107](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2024.1(135).95-107)
24. Arslanova M. M., Shornikova E. A., Muzieva M. I. The analysis of spatio-temporal features of microbiological and hydrochemical indicators of the rivers within Surgutsky and Oktyabrsky districts in Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra. *Samarskiy nauchnyy vestnik* = Samara Journal of Science. 2020;9(2):15–19. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/snv202102>
25. Gudkova N. K., Gorbunova T. L., Matova N. I. Influence of MSW landfills on degradation of biogeocenoses of coastal zones of water courses and the Black sea. *Prirodoobustroystvo* = Prirodoobustroystvo. 2021;(5):117–124. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-5-117-124>
26. Sveshnikova E. V., Romanova E. M., Lyubomirova V. N., Romanov V. V., Shlenkina T. M., Sergatenko S. N. Assessment of ecological processes in the Sviyaga river (Ulyanovsk region). *Ulyanovskiy mediko-biologicheskij zhurnal* = Ulyanovsk Medico-biological Journal. 2024;(1):130–147. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2024-1-130-147>
27. Khotimchenko S. A., Gmoshinskiy I. V., Bagryantseva O. V., Shatrov G. N. Chemical food safety: development of methodological and regulatory base. *Voprosy pitaniya* = Problems of Nutrition. 2020;89(4):110–124. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10047>
28. Samoylov A. V., Suraeva N. M. Prospects for the use of plant biotesting to search for metabolic biomarkers of the toxic potential of components of food matrices (review). *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2021;35(4):65–71. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10411>
29. Slaykovskaya E. S., German N. V. The assessment of the ecological state of the reservoir in the Spring valley of Volgograd. *Samarskiy nauchnyy vestnik* = Samara Journal of Science. 2022;11(2):120–123. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.55355/snv2022112117>
30. Nikolaeva A. V., Rodkin M. M., Kulishin A. V., Davletyarov R. R. A method of environmental monitoring using aquaculture: Patent RF, no. 2758337, 2021. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
31. Gaysin M. T., Rodkin M. M. A method for conducting environmental monitoring using biological test objects: Patent RF, no. 2802195, 2023. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
32. Shatokhin A. V., Seleznev I. A., Ivakin Ya. A., Grekov A. N., Grekov N. A., Korovin A. N. Automated biosensor early warning system for environmental monitoring of the aquatic environment: Patent RF, no. 2779728, 2022. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
33. Trusevich V. V., Zhuravskiy V. Yu. Experience with freshwater bivalve mollusks (*unio pictorum*) as biosensors in systems for automated biosensor control of oil pollution of waters in systems water supply for the population. *Ekosistemy*. 2023;34:193–198. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54133550>
34. Polyak Yu. M., Sukharevich V. I. Toxic cyanobacteria: their occurrence, regulation of toxin production and control. *Voda: khimiya i ekologiya* = Water: Chemistry and Ecology. 2017;(11-12):125–139. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yuujo&ysclid=lx0sol463913884664>
35. Stonik I. V., Orlova T. Yu. The seasonal accumulation of amnesic toxin (domoic acid) in commercial bivalves *mytilus trossulus* gould, 1850 and *mizuhopecten yessoensis* jay, 1850 in Vostok bay, sea of Japan. *Biologiya morya* = Russian Journal of Marine Biology. 2020;46(1):70–72. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0134347520010106>
36. Wu Sh.-J. Multi-location time-division water quality monitoring system: Patent US, no. 20220082546, 2020. URL: https://searchplatform.ropatent.gov.ru/doc/US20220082546A1_20220317?q=Multi-location%20time-division%20water%20quality%20monitoring%20system&from=search_simple&hash=2009640586
37. Brazhnikova A. M., Brazhnikov A. M. Autonomous underwater vehicle of the "micro" class for monitoring the ecological status of small reservoirs: the utility model RF, No. 205389, 2021. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

38. Novikov A. E., Melikhov V. V., Medvedeva L. N., Kostin V. E., Moskovets M. V., Toropov A. Yu. Water craft for monitoring natural and artificial reservoirs: the utility model RF, No. 215787, 2022. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
39. Vorobev S. N., Lushchaeva I. V., Pokrovskiy O. S., Sorochinskiy A. V. A device for determining the hydrochemical and physical parameters of the aquatic environment: the utility model RF, No. 210918, 2022. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
40. Okhrimenko S. N., Okhrimenko N. S., Rubanov I. L. Universal buoy for environmental monitoring of reservoirs: Patent RF, no. 2796989, 2023. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
41. Voronich S. S., Roeva N. N., Khlopaev A. G. Organization of observations of natural water quality in the Moscow region. *Problemy regional'noy ekologii* = Regional Environmental Issues. 2024;(1):81–84. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-1-81-84>
42. Trofimchuk M. M. Entropy index: new opportunities in assessing the ecological state of aquatic ecosystems. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2020;(11):46–52. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44665531>
43. Trofimchuk M. M. A method for assessing the ecological status of water bodies: Patent RF, no. 2721713, 2020. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
44. Trofimchuk M. M. Practical implementation of the entropy index in assessing the ecological state of water ecosystems. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2024;(2):23–37. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-23-37>
45. Nekrasova L. P. Monitoring of natural water pollution by fluorescence spectroscopy. *Gigiena i sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2022;101(5):578–582. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-578-582>
46. Plotnikova O. A., Tikhomirova E. I., Melnikov G. V. Comparative analysis of fluorescent methods selectivity for ecotoxins environmental monitoring. *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* = RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2022;30(4):574–583. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-4-574-583>
47. Temerdashev Z. A., Pavlenko L. F., Ermakova Ya. S., Korpakova I. G., Eletskiy B. D. Extraction-fluorimetric determination of chlorophyll "a" in the natural waters. *Analitika i kontrol'*. 2019;23(3):323–333. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.3.001>
48. Yang W. S., Lee S. Q., Je Ch. H., Hwang G., Lee H. K., Seok Ya. W., et al. Fluorescence sensor for measuring microalgae and method of operating the same: Patent US, no. №20200191695, 2020. URL: https://searchplatform.rosapatent.gov.ru/doc/US20200191695A1_20200618?q=Fluorescence%20sensor%20for%20measuring%20microalgae%20and%20method%20of%20operating%20the%20same&from=search_simple&hash=971709134
49. Goltsev V. N., Kaladzi M. Kh., Kuzmanova M. A., Allakhverdiev S. I. Variable and delayed fluorescence of chlorophyll "a" – theoretical foundations and practical application in plant research. *Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy*, 2014. 220 p.
50. Krikun V. A., Salyuk P. A. Autonomous underwater fluorimeter probe: Patent RF, no. 2753651, 2021. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
51. Qin B., Wu T., Zhu G., Zhang Yu., Li W. Stereoscopic monitoring and data mining system and method for harmful lake cyanobacteria bloom: Patent US, no. 11402362, 2022. URL: https://searchplatform.rosapatent.gov.ru/doc/US0011402362B2_20220802?q=Stereoscopic%20monitoring%20and%20data%20mining%20system%20and%20method%20for%20harmful%20lake%20cyanobacteria%20bloom&from=search_simple&hash=134466233
52. Golushkov N. A., Kokuev A. G. Integrated platform for monitoring fish farm aquatic environment. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer science and Informatics. 2023;(1):57–63. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-57-63>

Сведения об авторе

✉ Неваев Алексей Сергеевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», ул. Л. Толстого, 42, г. Ульяновск, Российская Федерация, e-mail: contact@ulsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7208-7380>, e-mail: voitto73@yandex.ru

Information about the author

✉ Alexey S. Nevaev, post-graduate student, Ulyanovsk State University, L. Tolstoy St., 42, Ulyanovsk, Russian Federation, 432017, e-mail: contact@ulsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7208-7380>, e-mail: voitto73@yandex.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author