ВЕСТНИК МИИГАиК

Специальный выпуск

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ХРАНИТЕЛЬ НАСЛЕДИЯ «ПЛЕЩЕЕВО ОЗЕРО»

Сборник статей по материалам
исследовательского проекта
Часть 1

Москва, МИИГАиК, 2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬСНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ (МИИГАиК)

ВЕСТНИК МИИГАиК

Специальный выпуск

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ХРАНИТЕЛЬ НАСЛЕДИЯ «ПЛЕЩЕЕВО ОЗЕРО»

Сборник статей по материалам исследовательского проекта

Часть 1

Москва, МИИГАиК

2026

УДК 574
ББК 72.5 + 26.22
В38

В38 Вестник МИИГАиК, Специальный выпуск. Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро», сборник научных статей по материалам исследовательского проекта, часть 1. // М.: МИИГАиК, 2026. – 191 с.

ISBN 978-5-91188-083-5

Сборник научных статей по материалам исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» содержит 12 научных статей и 1 вводную статью с описанием целей и задач проекта в целом, а также перспектив использования результатов проекта в совершенствовании системы мониторинга озера Плещеево как эталонного объекта охранной и рекреационной деятельности национального парка. Исследовательский проект реализуется с участием студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК в партнерском взаимодействии с научными сотрудниками Национального парка «Плещеево озеро», ИБВВ РАН, ИВП РАН, экспертами АО «Оператор пространственных данных и сервисов».

Материалы, представленные в сборнике (часть 1), могут быть интересны исследователям, преподавателям, аспирантам и студентам, которые занимаются изучением вопросов мониторинга водно-болотных экосистем на основе сочетания полевых методов исследования, методов дистанционного зондирования и геоинформационного анализа.

Ответственный редактор – к.б.н. Кузнецова Г.Д., Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК).

Рецензенты:

Николаева О.Н., д.т.н., Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК);

Буланов С.А., д.г.н., Институт географии РАН.

О проекте:

УДК 574
ББК 72.5

ISBN 978-5-91188-083-5

© Коллектив авторов, 2026
© МИИГАиК, 2026

Оглавление

Г.Д. Кузнецова

Исследовательский проект «Интеллектуальный хранитель наследия “Плещеево озеро”» 4

М.И. Андреева, Г.Д. Кузнецова

Анализ системы наблюдений Национального парка «Плещеево озеро» за состоянием и изменением окружающей среды озера Плещеево для обеспечения мониторинга экологических факторов 9

С.Х. Хачатуров

Гидрологический режим озера Плещеево 21

Д.А. Тарасова

Цветение водоемов: экологические аспекты и распространение Gloeotrichia echinulata в озере Плещеево 39

Э.З. Нурмухамедова, Г.Д. Кузнецова

Климатическая характеристика водосборной площади озера Плещеево и тенденции изменений в условиях современного потепления 53

Е.Д. Лошкова, В.М. Морейдо

Дистанционный анализ температуры поверхности воды озера Плещеево 68

М.И. Андреева, А.А. Кочнев, Г.Д. Кузнецова

Гидрохимический режим озера Плещеево и его притоков 79

М.М. Никоноров, В.А. Ермоленков

Пространственно-временная динамика растительности озера Плещеево 96

В.Д. Дадайкина, Е.Д. Лошкова, В.А. Ермоленков

Состояние притоков реки Трубеж: комплексное исследование с применением дистанционного зондирования и полевых методов 107

Г.Г. Шилов

Комплексная оценка антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево 123

Е.А. Борисова, Г.И. Загребин

Геоинформационный портал как инструмент анализа пространственно-временных данных и экологического мониторинга озера Плещеево 138

Е.А. Борисова

Обводнение Берендеева болота как потенциал увеличения проточности озера Плещеева: перспективы и риски 159

С.Г. Герасимова, С.В. Серебряков

Организационно-технологическая схема реагирования органов государственной власти и органов местного самоуправления на результаты экологического мониторинга (на примере озера Плещеево) 178

Исследовательский проект «Интеллектуальный хранитель наследия “Плещеево озеро”»

Г.Д. Кузнецова [1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

Озеро Плещеево и расположенный на его берегу древний город Переславль-Залесский – один из центров формирования Русского государства – являются частью природного, духовного и культурного наследия Отечества.

Национальный парк «Плещеево озеро» как ООПТ создан в 1988г. с целью сохранения и восстановления уникального природно-исторического комплекса. В водоохранную зону парка включен весь водосборный бассейн озера Плещеево с Берендеевым болотом, Купанский болотный комплекс и город Переславль-Залесский. Именно здесь, на территории парка, происходит стык интересов современного города и уникального природного комплекса.

До 2021 г. озеро считалось одним из самых чистых водоемов в Центральной России, но уже в 2022 получило класс «загрязненный». В настоящее время на разных уровнях обсуждаются экологические риски, связанные с усилением антропогенной нагрузки на территорию водосборного бассейна озера Плещеево, которые уже имели место, и которые необходимо предотвратить в будущем. Так, например, в реке Вёкса, вытекающей из озера, в 2023 году наблюдался массовый замор рыбы вследствие взрывного роста биомассы сине-зеленой водоросли Глеотрихия щетинистая (*Gloeotrichia echinulata*), которая «любит» теплую воду, быстро «съедает» кислород и таким образом агрессивно способствует заморным явлениям, в том числе – эндемика переславской ряпушки (*Coregonus albula pereslavicus*). По результатам ознакомления с протоколами исследования проб воды и визуального осмотра акватории озера Плещеево и реки Вёкса учёные Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН (ИБВВ РАН) сделали однозначный вывод: замор произошел по причине захода отмерших масс Глеотрихии из озера Плещеево в акваторию реки Вёкса[1].

Массовое распространение этой водоросли в озере Плещеево регистрируется с 2017 года. Для экосистемы озера она несёт двойную угрозу:

[1] **Национальный парк «Плещеево озеро», официальный сайт** https://plesheevo-lake.ru/information/news/2670/

1) во-первых, это опасность исчезновения эндемика озера Плещеево – ряпушки переславской. Отмирая в конце вегетативного сезона, сине-зелёные водоросли дают большой объём органического вещества, которое при разложении интенсивно потребляет необходимый для рыбы кислород из придонных слоёв воды. В итоге ареал обитания ряпушки существенно сжимается, особенно в летний период.
2) во-вторых, Глеотрихия и другие сине-зеленые водоросли при массовом своём развитии способны синтезировать гепатотоксины медленного действия, которые оказывают широкое воздействие на позвоночных, в том числе на человека. Озеро Плещеево служит источником питьевой воды для города Переславль-Залесский, но по существующим нормам, в процессе водоподготовки, проведение анализа воды на наличие токсинов не предусмотрено, и они практически напрямую могут поступать в водопроводную систему города.

На основании проведенных ранее исследований ИБВВ РАН, сотрудники которого уже более 60 лет изучают экосистему озера Плещеево, можно предположить следующие основные причины экологических рисков:

1. Обмеление реки Трубеж (основного притока озера), которая ранее подпитывалась водами Берендеева болота.

В 1950-е годы торфоразработки на Берендеевом болоте были интенсифицированы. Была построена сеть мелиорационных каналов, которая развернула воды Берендеева болота в сторону реки Малый Киржач, отрезав истоки основного притока оз.Плещеево – реки Трубеж – от Берендеева болота. Трубеж, а за ним и озеро Плещеево стали мелеть. Для поддержания уровня воды в озере в 1970-е годы была построена (модернизирована) плотина на реке Вёкса, вытекающей из озера. Результаты этого инженерного решения наряду с другими отрицательными факторами сказались на экосистеме озера неблагоприятным образом: проточность озера стала ухудшаться, естественная циркуляция стала слабее, создались условия для роста микрофлоры и заиливания реки Трубеж и озера Плещеево.

2. Тепловое загрязнение озера как следствие изменения климата.

Согласно анализу данных Ярославской ГЦМС за период с 1824 по 2024 гг. можно видеть, что за последнее десятилетие произошло значительное изменение температуры воздуха в сторону повышения. Особенно это выражено в зимние месяцы. При этом количество жарких дней за рассматриваемый период увеличилось более чем в 2 раза[2].

3. Интенсивное загрязнение озера биогенными веществами, которые попадают в озеро с прилегающих территорий.

[2] Ярославский ГЦМС, официальный сайт
https://www.yacgms.ru/izmenenie-klimata-goroda-yaroslavlya-s-1824-po-2024-gg/

Анализ гидрохимических показателей воды в рамках ежемесячного мониторинга Национального парка показывает существенное превышение таких показателей как фосфат ионов и азотные соединения, которые служат питательной средой и играют важную роль в метаболизме Глеотрихии.

Вследствие нарушения экологического баланса пострадать может не только рыба. Озеро является источником питьевой воды для города Переславль-Залесский. Существует высокий риск, что через несколько лет его нельзя будет использовать как источник питьевого водоснабжения из-за вероятного наличия в воде цианотоксинов.

В числе мероприятий для сохранения и реабилитации озера Плещеево эксперты называют срочное прекращение поступления любых сточных вод в акваторию озера и его притоков; новое строительство, капремонт и реконструкцию всей системы водоотведения Переславля, а также населенных пунктов, расположенных в бассейне реки Трубеж; капитальный ремонт ГТС в селе Купанское на реке Вёкса для правильного его функционирования и регулирования уровня воды в озере Плещеево.

Важное место в проекте занимает исследование роли Берендеева болота в системе водосбора озера Плещеево. При обсуждении результатов многолетних исследований и современного состояния озера были высказаны предположения, что обводнение Берендеева болота (или его части) будет способствовать восстановлению притока воды в реку Трубеж, и, следовательно – улучшению проточности озера и сохранению его экосистемы. Важным этапом в этой работе должны стать сбор гидрологических данных и подготовка научных материалов для обоснования планируемых работ.

Эти и другие предложения были внесены в план мероприятий по сохранению и реабилитации озера Плещеево. 07.02.2024 Минприроды РФ выпустило приказ о создании межведомственной рабочей группы по вопросам восстановления и сохранения уникальной экосистемы озера[3], а 29 апреля 2025 года заместитель Председателя Правительства РФ Д. Патрушев подписал План мероприятий по сохранению и реабилитации озера Плещеево в Ярославской области №ДП-П11-15389 (ДОРОЖНУЮ КАРТУ), который также содержит большой блок научно-исследовательских работ.

Реализация программ оздоровления озера требует времени. Кроме того, в связи с принятыми в 2020 году планами по развитию туристско-рекреационного кластера в прибрежной зоне, созданию особой экономической зоны в окрестностях Переславля-Залесского и увеличению потока туристов, необходимо принимать во внимание потенциальное усиление антропогенной нагрузки на весь природный комплекс.

В этой связи остро стоит задача регулярного комплексного экомониторинга всего водосборного бассейна, основанного на современных технологиях, важным элементом

[3] Национальный парк «Плещеево озеро», официальный сайт
https://plesheevo-lake.ru/information/news/2806/

которого является цифровой сервис для интеграции и анализа различных данных экомониторинга, а также моделирования процессов изменений с элементами прогнозирования тех или иных последствий и рисков.

Для решения этой задачи был разработан исследовательский проект, основной целью которого является совершенствование методологии мониторинга состояния водосборного бассейна озера Плещеево как эталонного объекта охранной и рекреационной деятельности Национального парка "Плещеево озеро".

С момента создания Национального парка «Плещеево озеро» научный отдел парка проводит наблюдения за экосистемой озера, в том числе – регулярный мониторинг гидрохимических и гидрологических показателей. Кроме того, ежегодно ИБВВ РАН проводит измерения гидрофизических показателей и исследование фитопланктона, зоопланктона и ихтиофауны озера.

Основной целью данного проекта является создание геоинформационной системы для анализа данных комплексного экомониторинга и оценки экологических рисков, связанных с изменениями климата и увеличением антропогенной нагрузки на озеро и территорию его водосборного бассейна (включая водораздел Берендеева болота и реки Трубеж) с использованием организационно-сервисной модели интеграции данных наземного обследования и данных ДЗЗ в справочно-картографической ГИС. Каркас геоинформационной модели создается на основе интеграции архивных и актуализированных данных, полученных на основе полевых исследований и современных технологий дистанционного зондирования Земли. Предложенная технология позволит отслеживать корреляционную зависимость развития процессов, как отрицательных, так и положительных, в зависимости от изменяющихся условий и реализуемых мероприятий по сохранению и оздоровлению озера, и принимать необходимые меры воздействия.

В первом выпуске сборника по материалам исследовательского проекта собраны статьи, в которых представлены результаты инициативного выезда на объект исследования (студенческой исследовательской экспедиции, июль 2024 г.[4]) и 1 этапа исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро»[5]:

- анализ системы наблюдений Национального парка «Плещеево озеро» (Андреева, Кузнецова);
- анализ цветения водоемов и распространения Gloeotrichia echinulata в озере Плещеево (Тарасова);
- анализ изменения климатических условий в регионе (Нурмухамедова, Кузнецова);

[4] Реализована при поддержке программы «Открываем Россию заново», организованной Высшей школой экономики при поддержке Президентской платформы «Россия – страна возможностей», программы «Больше, чем путешествие» и Русского географического общества https://www.miigaik.ru/student-research-and-development-center/ekspeditsiya-pleshcheevo-ozero/?bitrix_include_areas=Y .

[5] Реализуется при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» https://rgo.ru/

- анализ температурного режима водной поверхности озера по данным наблюдений национального парка и данным ДЗЗ (Лошкова);
- анализ гидрологического режима озера (Хачатуров) и анализ гидрохимических показателей по данным национального парка и полевых исследований студенческой экспедиции (Андреева, Кочнев, Кузнецова);
- анализ изменения высшей водной растительности озера (Никоноров, Ермоленков) и состояния притоков реки Трубеж (Дадайкина, Лошкова, Ермоленков) на основе полевых исследований экспедиции и данных дистанционного зондирования;
- пространственный анализ потенциальных зон затопления при повторном обводнении Берендеева болота, а также анализ международного опыта ренатурализации болот (Борисова);
- принципы и технологические особенности реализации геоинформационного портала, направленного на интеграцию и пространственно-временной анализ экологических данных в водосборе озера Плещеево (Борисова, Загребин).

В условиях роста рекреационной нагрузки и климатической нестабильности экологический мониторинг приобретает ключевое значение как механизм раннего предупреждения и устойчивого управления территориями. На примере Национального парка «Плещеево озеро» представлен анализ институциональных, технологических и управленческих разрывов между сбором данных о состоянии окружающей среды и принятием решений на муниципальном и региональном уровнях (Серебряков, Герасимова).

Исследовательский проект «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещееево озеро» рассчитан на длительный период, и результаты проводимых исследований будут представлены в последующих выпусках сборника.

Результаты проекта позволят усовершенствовать методологию мониторинга состояния водосборного бассейна озера Плещеево как эталонного объекта охранной и рекреационной деятельности национального парка.

УДК 574

Анализ системы наблюдений Национального парка «Плещеево озеро» за состоянием и изменением окружающей среды озера Плещеево для обеспечения мониторинга экологических факторов





М.И. Андреева[1]*, Г.Д. Кузнецова[2]

[1] Национальный парк «Плещеево озеро», Переславль-Залесский (Ярославская обл.), Россия
[2] Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия
*marina.flowercraft@gmail.com

Ключевые слова национальный парк, озеро Плещеево, система мониторинга экологических факторов, экологический мониторинг

Аннотация Озеро Плещеево является важным природным объектом комплексного назначения, который обеспечивает источник питьевой воды, возможности для отдыха и является охраняемой природной территорией. В статье представлен анализ системы наблюдений Национального парка "Плещеево озеро" за состоянием и изменениями окружающей среды, определены сильные и слабые стороны существующей системы мониторинга экологических факторов, в том числе тех, которые влияют на качество жизни местного населения. Сформулированы некоторые предложения по модернизации и расширению системы мониторинга.

1 Введение

Основываясь на обзоре российских источников[1] можно утверждать, что понятие «мониторинг» приобретает различное значение в зависимости от того, к какому объекту, явлению или процессу оно относится. В самом общем виде, исходя из этимологии слова, мониторинг означает отслеживание каких-либо объектов или явлений. Экологический мониторинг – информационная система наблюдений, оценки и прогнозирования изменений в состоянии окружающей среды, созданная для выделения антропогенной составляющей

[1] Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – Москва: Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с; Хотунцев, Ю. Л. Экология и экологическая безопасность / Ю. Л. Хотунцев. – 2-е изд., перераб. – Москва: Издательский центр «Академия», 2004. – 480 с.; Бондарик, Г. К. Инженерно-геологические изыскания / Г. К. Бондарик, Л. А. Ярг. – Москва: КДУ, 2007. – 424с.

этих изменений на фоне природных процессов[2]. Объектом экологического мониторинга является природная среда, характеризующаяся определенным территориальным масштабом, а также геофизическими, геохимическими и биологическими свойствами. Основными задачами, которые должна решать система экологического мониторинга, является накопление, систематизация и анализ информации о состоянии окружающей среды, о причинах наблюдаемых и вероятных изменений состояния (источниках и факторах воздействия). На основании анализа накопленных данных проводится оценка фактического состояния среды и оценка прогнозируемого состояния[3]. Задача организации стабильного и эффективного функционирования системы экологического мониторинга является многокомпонентной.

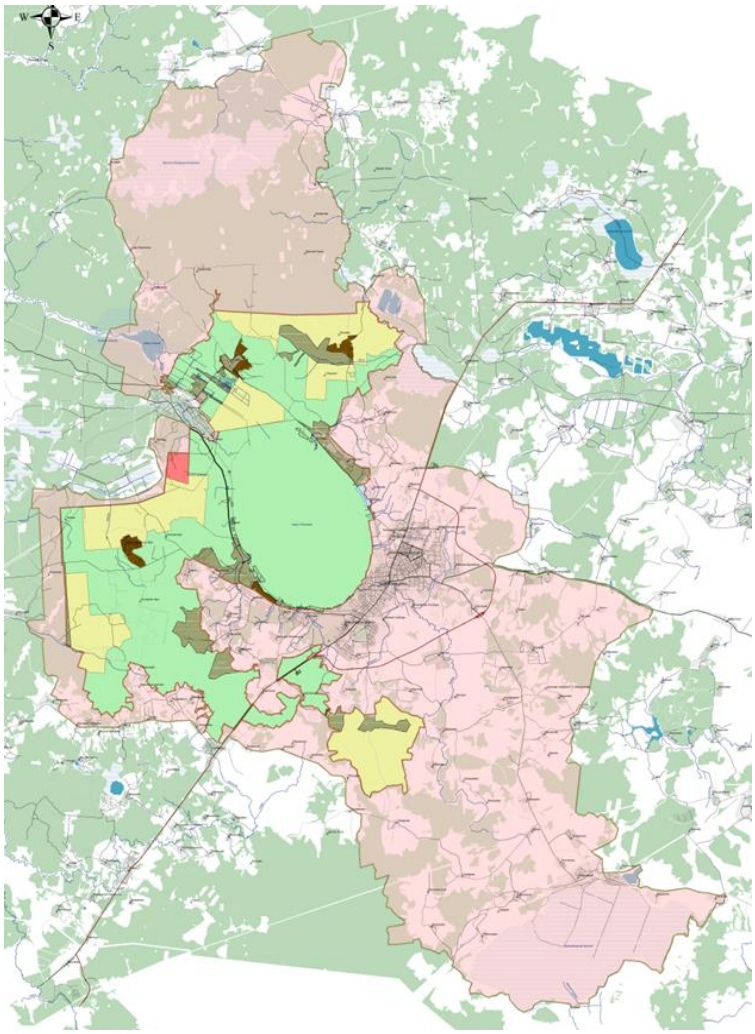


Рис.1. Площадь водосбора озера Плещеево составляет448 км^2

Fig. 1. The catchment area of Lake Pleshcheyevo is 448 km^2

Объектом мониторинга Национального парка «Плещеево озеро» является окружающая среда озера Плещеево, которое представляет собой обособленный водоем, расположенный на юге Ярославской области в бассейне верхней Волги в 130 км от Москвы. Размер озера – 6,5*9,55 км, имеет форму практически правильного овала. Площадь зеркала

[2] Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – М.: Гидрометеоиздат, 1984.
[3] Васильева Е.А. и др. Как организовать общественный экологический мониторинг: Руководство для общественных организаций / Под ред. М.В. Хотулевой. – М.: Союз, 1997.

воды – 5098 га. Максимальная глубина — 24,5 м. Объем воды — 541 млн. м^3. Площадь водосбора озера Плещево составляет 448 км^2 и совпадает с водоохраной зоной Национального парка «Плещеево озеро».

Озеро Плещеево славится своим уникальным обитателем — переславской ряпушкой, которая является эндемиком и занесена в Красную книгу Российской Федерации. Это озеро имеет комплексное назначение: оно входит в состав Национального парка, является объектом рекреационного использования и служит источником воды для города Переславль-Залесский, расположенного на его южном берегу.

По последним данным озеро пополняется водами 17 притоков, вытекает из него одна река Нерль Волжская, которая в верхнем своем течении от озера Плещеево до озера Сомнино носит название Вёкса Плещеевская.

2 Система мониторинга экологических факторов Национального парка «Плещеево озеро»

Национальный парк «Плещеево озеро» был создан в 1988 году. Согласно Уставу[4] основными видами деятельности Национального парка, в том числе, являются:

- осуществление государственного экологического мониторинга окружающей среды;
- осуществление научно (научно-исследовательской) деятельности в области охраны окружающей среды в целях разработки мероприятий по сохранению и развитию природного потенциала и рекреационного потенциала Российской Федерации.

1 января 1993 г. в структуре Национального парка был создан отдел по контролю состояния окружающей среды и аналитическая лаборатория в его составе. Основная работа по гидрохимическому мониторингу озера и его притоков началась с 1997 г., по гидрологическому мониторингу — с 1998 г. в 2000 г. было заключено соглашение с Ярославским отделением Росгидромета (ЯЦГМС). Тогда же были согласованы основные точки отбора проб для гидрохимического мониторинга.

На данный момент можно выделить следующие виды мониторинга, осуществляемые Национальным парком и партнерами: метеорологический, гидрологический, гидрохимический, санитарно-эпидемеологический, биологический и мониторинг туристического потока (количества посетителей) (рис.2).

[4] Национальный парк «Плещеево озеро». Документы https://plesheevo-lake.ru/o-parke/dokumenty/ [Дата обращения: 18.09.2025]



Рис. 2. Система мониторинга состояния окружающей среды озера Плещеево
Fig. 2. Environmental monitoring system of Lake Pleshcheyevo

Биологический мониторинг не является в прямом смысле мониторингом, но Институт биологии внутренних вод имени И.Д. Папанова РАН (ИБВВ РАН) проводит свои исследования на озере с 1962 г. более 50 лет. Данные накапливаются, и уже есть возможность проследить изменения, которые произошли в озерной системе за этот период. С 2012 г. ежегодно проводится мониторинг численности и пространственного распределения переславской ряпушки в период стратификации водоема. Исследования остальных биокомпонентов экосистемы озера — фитопланктона, зоопланктона, бактериопланктона, бентоса, высшей водной растительности — ведутся по мере финансирования.

Метеорологический мониторинг осуществляется на основании данных Переславской метеостанции, которая является филиалом Ярославского отделения Гидромета. Она была основана в 1919 г., и за период ее существования накоплен большой массив данных по метеоусловиям окрестностей озера Плещеево.

Из минусов метеорологического мониторинга можно отметить расположение метеостанции на удалении примерно 2 км от озера. У Национального парка нет своих метеостанций на берегу озера, поэтому при обработке показателей мониторинга используются данные городской метеостанции, несмотря на то, что они не в полной мере отражают метеорежим озера.



Рис. 3. Сотрудники ИБВВ РАН проводят исследования на озере Плещеево

Fig. 3. The staff of the IBVV RAS conducts research on Lake Pleshcheyevo



Рис. 4. Метеостанция на территории города Переславль Залесский

Fig. 4. Meteorological station on the territory of Pereslavl Zalessky

Санитарно-эпидемиологический мониторинг. Поскольку озеро является объектом рекреационного назначения, а также источником питьевой воды для города, санитарно-эпидемиологический мониторинг мест для купания ведется подразделением Роспотребнадзора ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии Ярославской области». Сотрудники центра отбирают в летнее время пробы в местах купания на озере и на реке Трубеж. Данные в Национальный парк не предоставляются, и Национальный парк не имеет четкой картины, в каких местах были взяты пробы для анализа и каков результат. Из минусов также можно отметить удаленность лабораторий, в которых проводится анализ проб, а это влияет на время и качество результатов анализа.

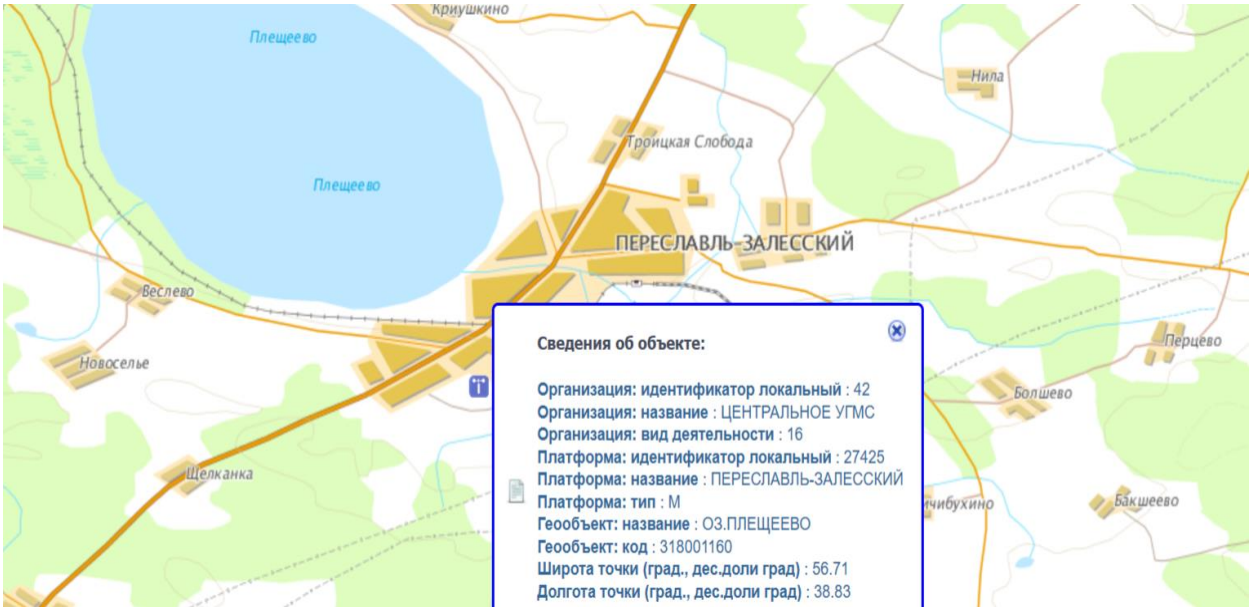


Рис. 5. Расположение метеостанции в г. Переславль-Залесский по отношению к озеру Плещеево
Fig. 5. Location of the weather station in Pereslavl-Zalessky in relation to Lake Pleshcheyevo

Гидрохимический мониторинг на сегодняшний день осуществляется экоаналитической лабораторией национального парка «Плещеево озеро» и Ярославским отделением Росгидромета. На рис. 6 красными точками отмечены места отбора проб лабораторией Национального парка для мониторинга качества воды озера Плещеево, его притоков и ливневых стоков города. С 2000 г. качество воды в озере Плещеево контролируется в трех точках: 1 км от устья р. Трубеж, в районе оголовка водозабора и в глубоководной точке. Каждая проба отбирается на двух уровнях вертикали — 0,5 м от поверхности и 0,5 м от дна. С 2023 г. были добавлены еще 2 точки напротив самых загрязненных водотоков — дренажных канав, которые несут ливневые стоки с территории города, в 500 м от устья р. Марюха и в 500 м от городского пляжа. В этих точках пробы отбираются только на глубине 0,5 м от поверхности.

Во всех точках пробы отбираются ежемесячно, кроме периодов становления и распала ледового покрова, при условии наличия водотока.

В соответствии со ст. 5 ФЗ №102-ФЗ измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, должны выполняться по референтным методикам измерений и другим аттестованным методикам[5]. После отбора пробы воды анализируются в лаборатории Национального парка в соответствии с методиками, внесенными в Реестр ПНДФ (Реестр методик количественного химического анализа и оценки состояния объектов окружающей среды, допущенных для государственного экологического контроля и мониторинга) по 18 показателям различными методами:

[5] Федеральная служба по надзору в сфере природопользования РОСПРИРОДНАДЗОР. Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия https://metod.fcao.ru/ [Дата обращения: 18.09.2025]

- потенциометрический метод — pH;
- флуориметрический метод — нефтепродукты;
- титриметрический метод — растворенный кислород и $БПК_5$, перманганатная окисляемость, хлориды, общая жесткость и ионы кальция;
- фотометрический метод — ионы аммония, нитриты, нитраты, фосфаты, общее железо;
- турбодиметрический метод — сульфаты;
- вольтамперометрический метод — ионы меди, кадмия, цинка и свинца.

Полученные результаты сравниваются с нормативами предельно-допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного значения, утвержденных приказом Минсельхоза РФ №552 от 13.12.2016 г. «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (ПДКрх)[6].

Кроме озера проводится мониторинг качества воды всех притоков озера первого порядка и самых крупных притоков второго порядка. Пробы отбираются ежемесячно, если есть течение воды. Пробы воды в р. Трубеж и ее притоках анализируют по всем 18 показателям. В малых притоках озера - только по 7 показателям: pH, биогенные вещества (ионы аммония, нитриты, нитраты, фосфаты), содержание растворенного кислорода и $БПК_5$.

ЯЦГМС проводит отбор и анализ проб по 34 показателям 1 раз в квартал в 5 точках (3 точки совпадают с точками Национального парка, и еще в 1 км от истока р. Векса и в 4,5 км от истока р. Вёкса в так называемой «малой яме», они отмечены желтыми точками на рис. 7), а также в устье р. Трубеж. Сводные данные предоставляются в Национальный парк. На основании полученных данных по среднегодовым показателям рассчитывается удельный комбинаторный индекс загрязнения водоема (УКИЗВ), по которому проводятся сравнения загрязненности различных водоемов. По УКИВЗ вода делится на классы «от чистой» (1 класс) – до «грязной» (4 класс). Последние годы озеро Плещеево находилось в категории «слабо загрязненная» в многоводные годы переходя в класс «условно чистая». В 2022 - 2023 гг. качеству воды озера Плещеево была присвоена категория «загрязненная». В 2024 г. качество воды вернулось в категорию «слабо загрязненная».

Таким образом, создана достаточно большая сеть гидрохимических наблюдений за состоянием озера, которая позволяет выявлять источники антропогенного загрязнения водоема. Однако частота отбора проб не позволяет оперативно отслеживать изменения химического состояния воды для быстрого реагирования, что особенно актуально для отслеживания показателей биогенных загрязнителей в притоках озера, поскольку они наиболее подвержены антропогенному загрязнению. Также в арсенале экоаналитической

[6] Информационно-правовое обеспечение «Гарант» https://base.garant.ru/71586774/ [Дата обращения 18.09.2025]

лаборатории не хватает освоенных методик по определению взвешенных веществ, химического потребления кислорода (ХПК) и синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), которые входят в перечень определяемых показателей, рекомендованных для мониторинга поверхностных водоемов.

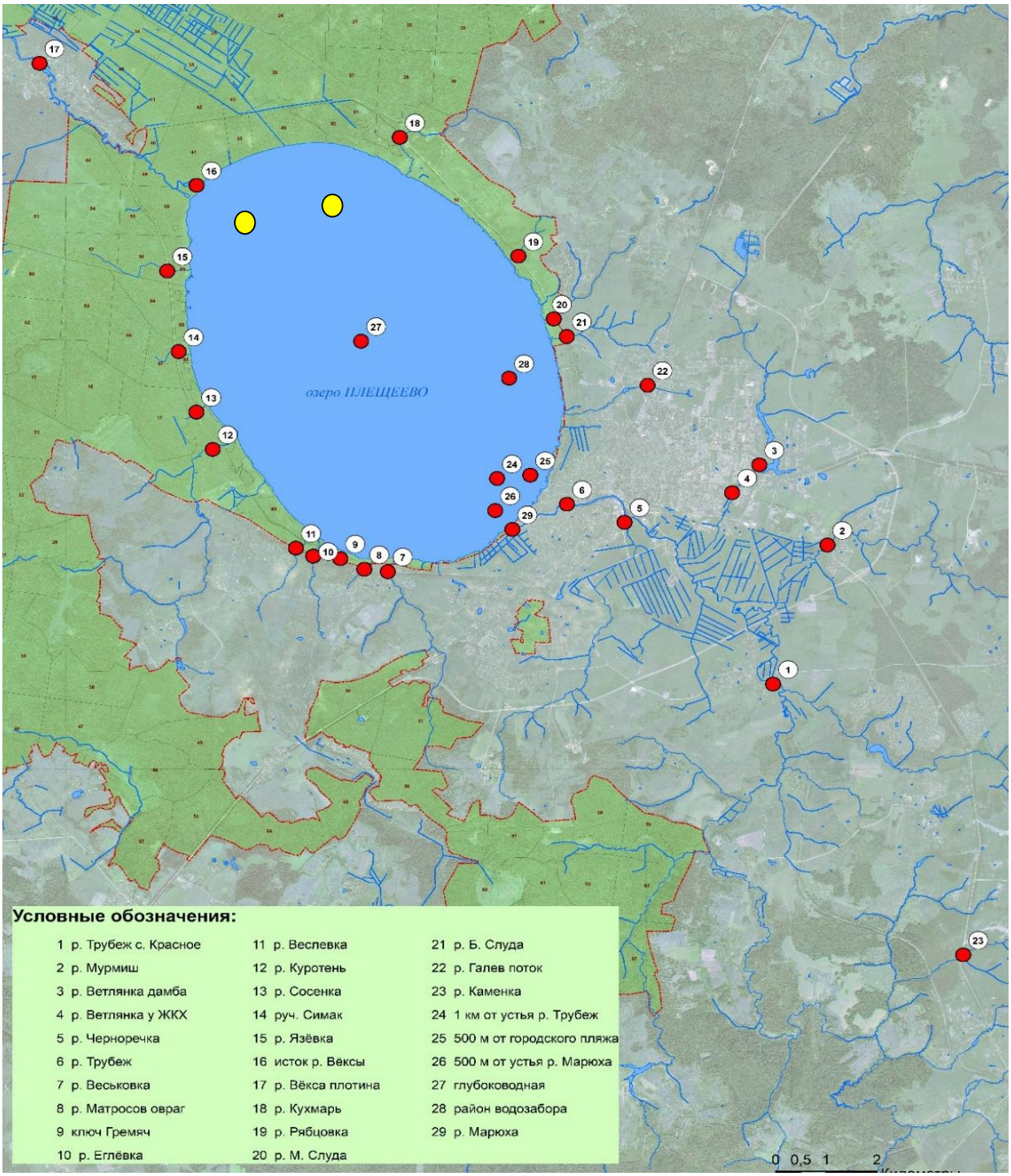


Рис. 6. Точки отбора проб в рамках гидрохимического мониторинга, проводимого экоаналитической лабораторией ФГБУ «Национальный парк «Плещеево озеро»

Fig. 6. Sampling points within the framework of hydrochemical monitoring conducted by the ecoanalytical laboratory of the Federal State Budgetary Institution "Pleshcheyevo Lake National Park"

Гидрологический мониторинг проводится Национальным парком и Ярославским отделением РОСГИДРОМЕТ (ЯЦГМС). На рис. 7 отмечены точки гидрологических замеров на притоках озера и на р. Вёкса. В этих точках измеряется профиль сечения и скорость потока, которые позволяют рассчитать расходы воды и стоки.

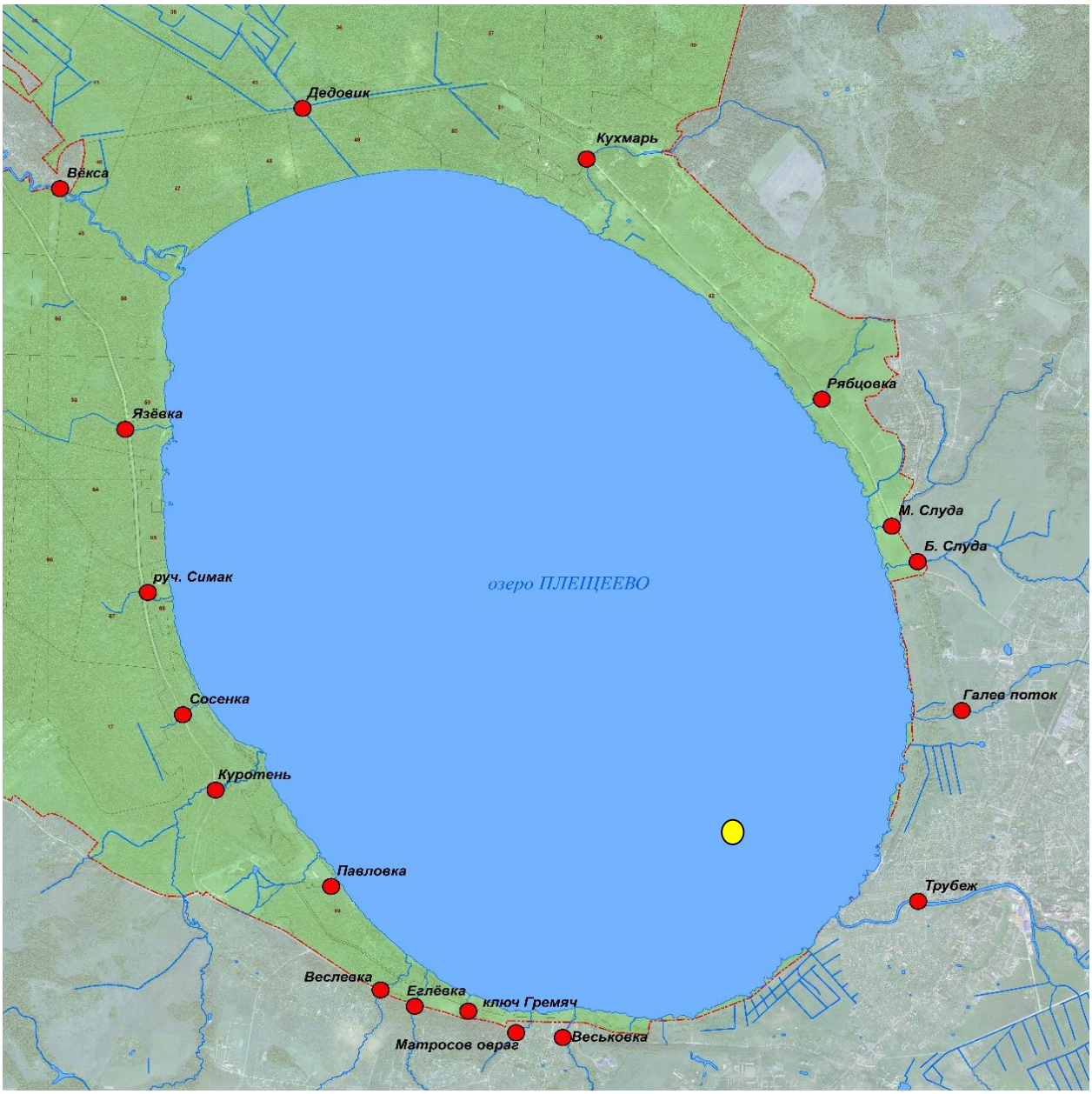


Рис. 7. Точки гидрологических замеров на притоках озера Плещеево и на р. Вёкса (красные метки). Желтая метка – расположение уровенного поста

Fig.7. The points of hydrological measurements on the tributaries of Lake Pleshcheyevo and on the river Veksa (red markers). The yellow marker is the location of the level post

Минусом этого метода является ручной способ измерений и отсутствие автоматизации. В этой связи измерения проводятся один раз в день (не два, как этого требует методика гидрологических измерений). В межень измерения проводятся 2 раза в

месяц, в период паводка — чаще. Данные разовых замеров интерполируются на период, когда замеры не проводились. Таким образом проводится оценка годового стока.

Кроме того, проводятся наблюдения за ледовыми явлениями на озере, его притоках и на р. Вёкса, а также температурного режима воды и содержания растворенного кислорода.

Ярославское отделение ГИДРОМЕТ проводит наблюдение за уровенным режимом озера Плещеево с 1936 г. Для этого на озере установлен постоянный уровнемерный пост (желтая метка на рис. 7). Также ведется наблюдение за ледовыми явлениями на р. Трубеж. Сводные данные предоставляются в Национальный парк ежемесячно и ежегодно.

Существующая система гидрологических наблюдений позволяет провести общую оценку гидрологического режима озера. Однако отсутствие систематических данных по стокам в озеро и стоку р. Вёксы не позволяет дать точную оценку. Приводимые в отчетах цифры по стокам имеют большую погрешность.

Определение содержания растворенного кислорода, проводимое Национальным парком классическим методом, является фрагментарным (1 раз в месяц) также имеет большую погрешность. Кроме того, данные по растворенному кислороду в придонных слоях в период аноксии[7] не совпадают с данными измерений ИБВВ РАН, которые проводятся автоматизированным методом при помощи многофункционального датчика YSI EXO2.

Мониторинг рекреационной нагрузки. Национальный парк ведет подсчет турпотока (количества посетителей) по объектам и в целом на парк. По рекомендациям необходимо закладывать пробные площади и мониторить изменения флоры и фауны, но пока возможностей для такого мониторинга у Национального парка нет.

Обобщенные данные за год по всем видам мониторинга, а также данные научно-исследовательских работ заносятся в Летопись природы Национального парка "Плещеево озеро", которая ведется на основании методического пособия Филонова К.П., Нухимовской Ю.Д. "Летопись природы в заповедниках СССР»[8], но с небольшими изменениями. В структуре Летописи природы Национального парка "Плещеево озеро" выделяется 11 разделов:

1) Территория национального парка;
2) Пробные и учетные площадки;
3) Постоянные (временные) маршруты;

[7] Период аноксии озера — это период, когда в водоёме наблюдается дефицит растворённого кислорода (РК) в глубоких слоях, вплоть до полного его отсутствия. Это явление характерно для озёр с ярко выраженной зимней и летней стратификацией растворенного кислорода.

[8] Летопись природы в заповедниках СССР : Метод. пособие / К. П. Филонов, Ю. Д. Нухимовская; Отв. ред. В. Е. Соколов, К. Д. Зыков; АН СССР, Комис. по координации науч. исслед. в гос. заповедниках СССР и др. - Москва: Наука, 1990. - 142,[1] с.; 21 см.; ISBN 5-02-005470-4ос. https://djvu.online/file/Y6bpHetEIBF85 [Дата обращения: 18.09.2025]

4) Воздух:
5) Почвы;
6) Воды;
7) Флора и растительность;
8) Фауна и животное население;
9) Состояние заповедного режима;
10) Фенологические наблюдения;
11) Историко-культурное наследие.

В случае, если по какому-то из разделов за описываемый год не было наблюдений, он остается не заполненным, но сохраняется в структуре Летописи.

3 Выводы

Национальным парком «Плещево озеро» выстроена большая сеть наблюдений для проведения мониторинга состояния окружающей среды озера Плещеево, которая в целом выполняет задачи по общей оценке ключевых показателей экологических факторов, в т.ч. влияющих на качество жизни населения.

Однако существующая система мониторинга не является полной, собираемые данные имеют большую погрешность, по некоторым показателям — не совпадают с данными исследований партнеров (например, показатели растворенного кислорода, измеряемые ИБВВ РАН в автоматическом режиме более точным многофункциональным датчиком YSI EXO2).

Модернизация и дооснащение приборной базы Национального парка (установка в глубоководной точке 2 автоматических логгеров, измеряющих с шагом 1 метр температуру воды в озере и растворенный кислород, а также установка 2 метеостанций, освоение новых методик комплексного химического анализа и др.) позволит выстроить более точную систему мониторинга экологических факторов и оценки состояния окружающей среды, что, безусловно, будет способствовать оперативному реагированию и принятию управленческих решений в реализации мероприятий по сохранению и реабилитации озера Плещеево.

Важным аспектом в мониторинге состояния озера является измерение флуоресценции пигментов низших водорослей и определение доминирующих видов, которое позволит отслеживать их появление и размножение в озере и предупреждать население и муниципальные органы управления о начале цветения и рисках взрывного роста их биомассы.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках реализации исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» https://rgo.ru/.

Analysis of the observation system of the National Park “Pleshcheyevo Lake» for the state and environmental changes of Lake Pleshcheyevo to ensure monitoring of environmental factors

Marina I. Andreeva[1]*, Galina D. Kuznetsova[2]**
[1] National Park “Pleshcheyevo Lake”
[2] Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)
*marina.flowercraft@gmail.com, **srdc@miigaik.ru

Keywords national park, Lake Pleshcheyevo, environmental factors monitoring system, environmental monitoring

Abstract Lake Pleshcheyevo is a significant natural site that provides a source of drinking water, recreational opportunities, and protected natural area. This article presents an analysis of the current integrated monitoring system for the Pleshcheyevo Lake National Park. It identifies the strengths and weaknesses of the current monitoring system for environmental factors, including those that affect the quality of life for the local population. Additionally, it makes some suggestions for modernizing and expanding the system.

Acknowledgements

The research was carried out within the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage" with the financial support of the Russian Geo-Geographical Society, an All-Russian public organization https://rgo.ru/ .

УДК 910.3 / UDC 911.9

Гидрологический режим озера Плещеево

С.Х. Хачатуров[1] *
[1] Национальный парк «Плещеево озеро», Переславль-Залесский (Ярославская обл.), Россия
*suren.nauka@mail.ru



Ключевые слова гидрологический режим, Плещеево озеро, водный баланс, проточность озера

Аннотация В статье представлен анализ гидрологического режима озера Плещеево и его притоков, проведена оценка водного баланса и проточности озера на основе архивных данных и современных наблюдений Национального парка «Плещеево озеро» за период 2019-2024 гг.

1 Введение

Озеро Плещеево представляет собой обособленный проточный водоём, его водосборный бассейн полностью входит в водосборную площадь реки Волга. Гидрологический режим озера, его уровень, площадь водного зеркала и объём определяются, в основном, климатическими особенностями региона, геологическим строением водосбора и величиной площади водосборного бассейна. По данным ИБВВ РАН площадь водосборного бассейна (поверхностный сток), включая водоём, составляет 408 км^2 [1] Площадь водосбора озера Плещеево по данным Государственного водного реестра составляет 425 км^2. Водное питание озера Плещеево тесно связано с подземными водами. Формирование подземных вод, питающих озеро, происходит на площади около 448 км^2, что на 10% больше, чем площадь бассейна самого озера. В настоящее время площадь водосбора озера Плещеево определена по данным спутниковой съёмки – SRTM. В целом водосборная площадь (без учёта акватории озера) составила 344,69 км^2, а с учётом площади акватории озера Плещеево, вся водосборная площадь озера Плещеево (поверхностный сток) составляет: 344,69 км^2 + 50,37 км^2 = 395,06 км^2.

Следует отметить, что водосборная площадь озера Плещеево мала. В связи с прекращением поверхностного стока из Берендеева болота в истоке р.Трубеж (в ручье Чернавка), площадь водосборного бассейна р.Трубеж и, соответственно, поверхностного стока озера Плещеево уменьшилась примерно на 50,6 км^2.

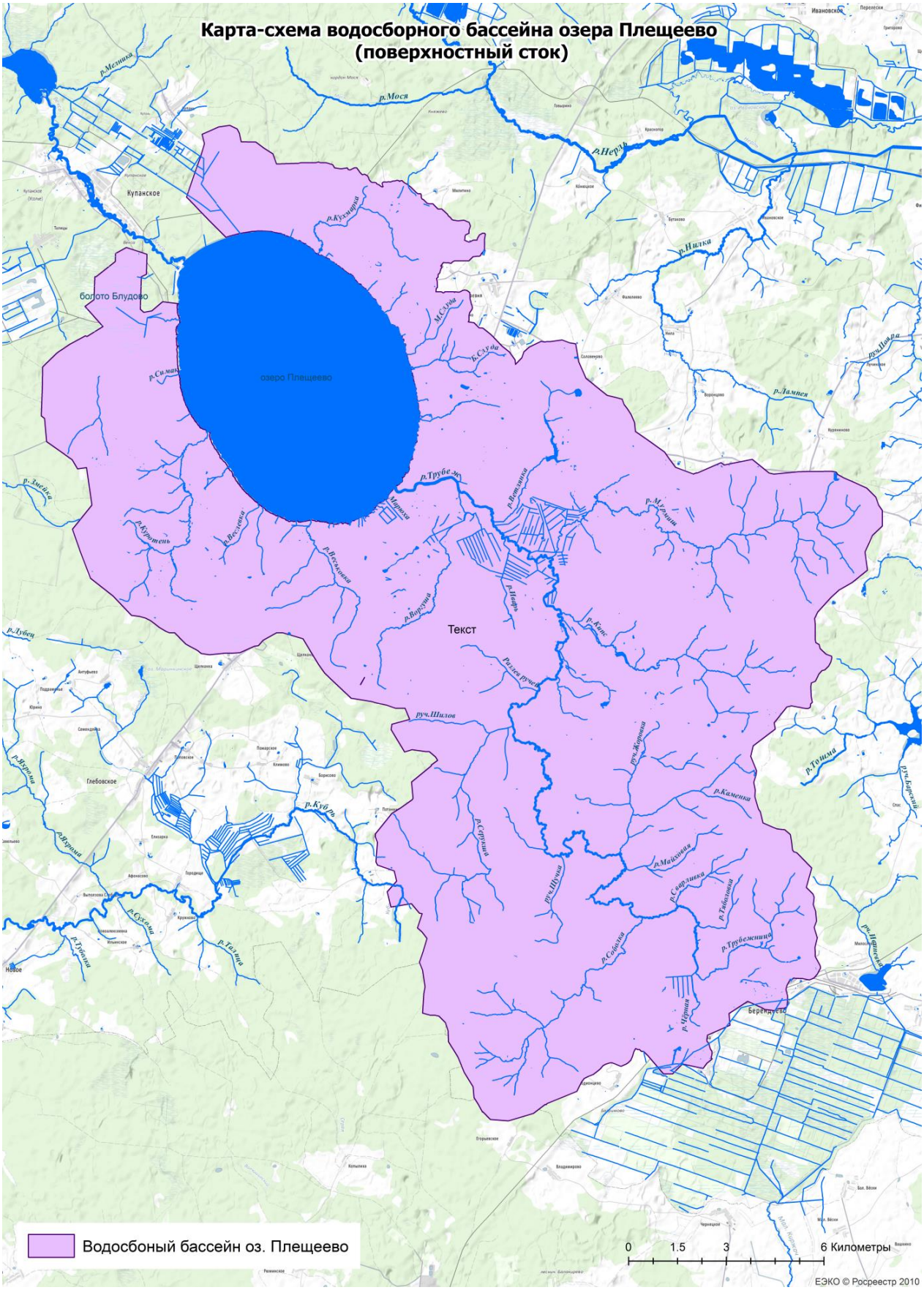


Рис. 1. Водосборный бассейн озера Плещеево
Fig. 1. Drainage basin of Lake Pleshcheyevo

Для европейской части России характерны маловодные и многоводные периоды, которые могут иметь разную периодичность от нескольких лет до нескольких десятилетий и более. Это накладывает отпечаток как на гидрологический режим самого озера, так и на всю систему его водосбора в целом. Исходя из сложившегося гидрологического режима озера Плещеево, весной, в период снегового половодья на реках, питающих озеро, резко возрастает приток воды, а летом наоборот, увеличивается расход за счёт испарения. Это отражается на сезонном колебании уровня озера. Сезонные колебания уровня воды в озере связаны с изменением составляющих водного баланса озера и определяются типом внутригодового режима речного стока.

Колебания уровня воды в озере – это основная характеристика режима озера. Среднемноголетний уровень воды в озере Плещеево (по данным Ярославского ЦГМС) составляет 137,47 м (БС). Между тем, повсеместно вокруг озера, за исключением северо-западной стороны в направлении Волжско-Нерльской низины, отметки земли колеблются от 140 м (БС) до 190 м (БС) и более. Чаша озера Плещеево расположена в котловине и соответственно подземные и грунтовые стоки воды направлены и разгружаются в его чашу. Поэтому озеро Плещеево почти со всех сторон подпёрто подземными и грунтовыми водами, что предотвращает боковую фильтрацию воды из котловины озера, за исключением северо-западного берега в сторону Волжско-Нерльской низины. Именно такое физико-географическое расположение озера Плещеево делает его относительно неуязвимым к обмелению.

2 Результаты

2.1 Водное питание озера Плещеево

Питание озера Плещеево преимущественно поверхностное, атмосферное и подземное.

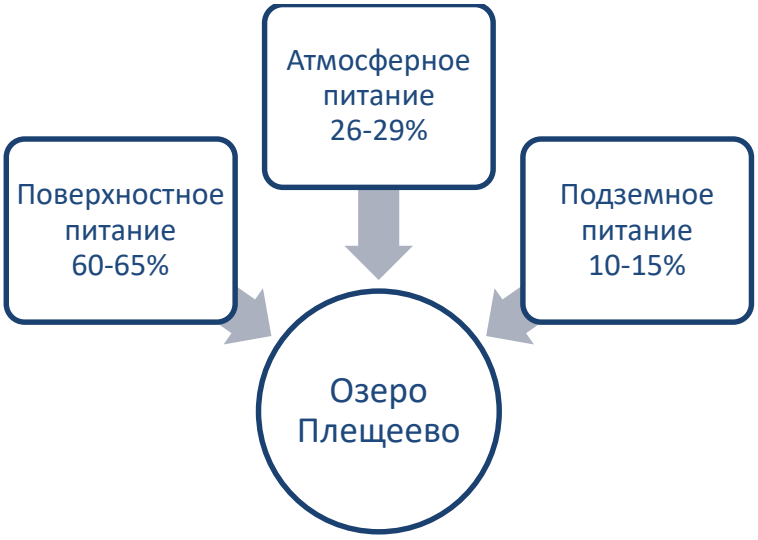


Рис. 2. Водное питание озера Плещеево
Fig. 2. Water supply of Lake Pleshcheyevo

Поверхностное питание составляет примерно 60-65 % и осуществляется за счёт стока притоков: р.Трубеж (главного притока озера Плещеево) и 16 малых рек и ручьёв.

Атмосферное питание составляет примерно 26 - 29 % и происходит за счёт осадков (снега и дождя) выпадающих непосредственно на водную поверхность (акваторию) озера. Объём атмосферных осадков, выпадающих на акваторию озера, как в абсолютном, так и в относительном исчислении, существенно меняется и в многолетнем, и в сезонном режиме.

Подземное питание происходит за счёт разгрузки подземных и грунтовых вод в котловину озера. Режим подземных вод по сравнению с поверхностным стоком имеет свои особенности. Для сезонного хода уровня подземных вод характерны весенний (апрель-май) и осенний (ноябрь) максимумы. Абсолютный минимум наблюдается в марте, так как в зимнее время запас подземных вод только расходуется. Начало весеннего подъёма уровней зависит от режима температуры воздуха и приходится на период устойчивого перехода среднесуточной температуры через нулевую отметку. Весенний максимум уровня чаще всего наступает через 1-2 месяца после начала весеннего подъёма. Амплитуда весеннего подъёма уровня грунтовых вод может различаться от нескольких десятков сантиметров до 1-1,5 м. Затем наступает летне-осенний спад уровня, обусловленный прекращением весеннего инфильтрационного питания и началом интенсивного испарения грунтовых вод. Он длится до августа-октября, а иногда и до ноября. С началом осенних дождей и значительным уменьшением испарения начинается осенний подъём уровня, продолжающийся до декабря, когда формируется осенне-зимний максимум.

2 2 Гидрографическая сеть бассейна озера Плещеево

Гидрографическая сеть бассейна озера Плещеево представлена речной системой реки Трубеж (имеет 29 притоков I-го, II-го и III-го порядка), обуславливающей основной поверхностный приток воды в озеро, и 16-ю малыми реками и ручьями:

- малые реки Веськовка, Куротень, Язёвка, Кухмарь, Малая Слуда, Большая Слуда;
- ручьи Матросов овраг, Ключ Гремяч, Еглевка, Веслевка, Павловка, Сосенка, Симак, Рябцовка, Галев Поток, Валовая канава (Дедовик);
- река Нерль (Вёкса Плещеевская), вытекающая из озера.

Реки водосборного бассейна озера Плещеево относятся к Верхневолжскому подтипу восточно-европейского гидрологического типа. Для них характерно смешанное питание: поверхностное, атмосферное, подземное и болотное.

Русла р. Трубеж, всех малых рек и ручьёв характеризуются большой извилистостью, пойменные берега обычно крутые, высотой до 2-х метров и более. Ширина русел малых рек и ручьёв составляет 2 – 8 метров, глубина около 1 метра. Скорость течения воды при прохождении паводка составляет 0,5 – 1,0 м/сек и более, в межень 0,1 - 0,2 м/сек и менее.

Основной рекой бассейна озера Плещеево является река Трубеж, площадь ее водосборного бассейна поверхностного стока – 247,02 км^2, что составляет 62,5 % водосбора озера Плещеево. Из озера вытекает одна типично озёрная река Нерль (Вёкса Плещеевская), которая является правым притоком реки Волга. Протяжённость Вёксы до озера Сомино составляет 8,2 км, далее она пересекает небольшое заболоченное озеро Сомино, ниже которого река называется Нерлью Волжской.

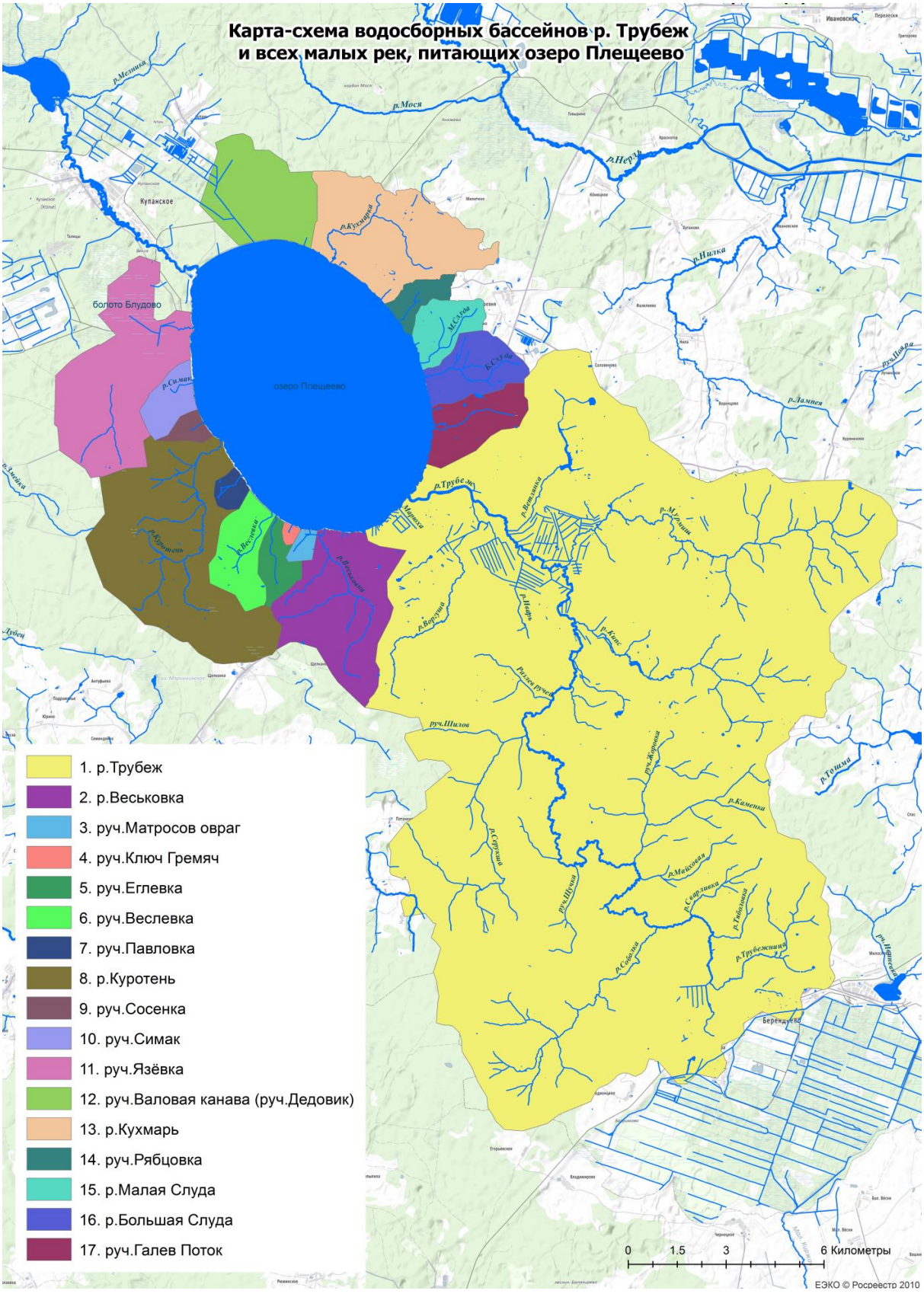


Рис. 3. Карта-схема водосборных бассейнов р.Трубеж и всех малых рек и ручьёв, впадающих в озеро Плещеево

Fig. 3. The map diagram of the catchment basins of the river.Trubezh and all small rivers and streams flowing into Lake Pleshcheyevo

Согласно данным государственного водного реестра общая протяжённость р.Нерль (Вёкса Плещеевская) составляет 112 км. Гидрологический режим реки Нерль (Вёкса Плещеевская) регулируется озером Плещеево и зависит от стока реки Трубеж и водорегулирующей плотины, находящейся в с. Купанское Переславль-Залесского муниципального округа Ярославской области.

Водный режим р.Трубеж, малых рек и ручьёв в бассейне озера Плещеево находится в прямой зависимости от погодных условий года, и в первую очередь от осадков и температуры воздуха. Кроме того, имеют значение физико-географические особенности их водосборной площади.

Длина р.Трубеж (по данным Государственного водного реестра) составляет – 36 км, длина всех 16-и малых рек и ручьёв, впадающих в озеро Плещеево, менее 10 км. Водосборные бассейны р.Трубеж, всех малых рек и ручьёв, впадающих в озеро Плещеево, приведены на рисунке 3.

Водный режим р. Трубеж и малых рек, как и всех рек Верхневолжья, характеризуется ярко выраженными фазами водного режима: весеннее половодье, летне-осенняя межень, прерываемая дождевыми паводками и низкая зимняя межень с зимним ледоставом (рис.4).



Рис.4. Фазы водного режима рек водосборного бассейна озера Плещеево
Fig.4. Phases of the water regime of the rivers of the Lake Pleshcheyevo drainage basin

Наиболее важной фазой водного режима водотоков является весеннее половодье. В период весеннего половодья питание речной сети осуществляется главным образом за счёт почвенно-поверхностных вод, формирующихся с поверхности склонов и в почвенных слоях. С началом интенсивного снеготаяния резко повышаются уровни, расходы воды увеличиваются и соответствуют пиковым.

Река Трубеж имеет хорошо выраженный пик весеннего половодья и два периода низкого стояния уровня – летнюю и зимнюю межени. В летне-осенний период нормальный ход может нарушаться кратковременными дождевыми паводками. Интенсивность паводков иногда не уступает весеннему половодью. В меженные периоды скорость течения воды в устье р.Трубеж не превышает 2-3 см/сек. При нагонных северо – западных ветрах воды р.Трубеж на своём устьевом участке могут течь в обратную сторону.

Во внутригодовом ходе уровней р.Нерль (Вёкса Плещеевская) резких колебаний не наблюдается. По сравнению с р.Трубеж период весеннего половодья на р.Нерль (Вёкса Плещеевская) смещён примерно на месяц, волна её половодья более растянута, чем на

р.Трубеж. В этом проявляется буферный эффект озера Плещеево. Поступающие стоки воды в озеро Плещеево вначале разливаются по акватории водоёма, постепенно повышают уровень и увеличивают объём воды в озере. С повышением уровня воды в озере, происходит постепенное увеличение вытекающих из озера расходов воды, которые подчинены гидравлическим законам свободного истечения воды из этого водоёма.

Протекающие через болотные массивы малые реки, вскрывая горизонт грунтовых вод, обеспечивают себе устойчивый минимальный сток. Ручьи Веслевка, Симак, Галев Поток в летний период почти ежегодно пересыхают, и вода в русле этих ручьёв отсутствует, поскольку русла этих рек не глубокие и не вскрывают грунтовые и подземные горизонты. Их водосборные бассейны спланированы, обустроены, русла ручьёв зарегулированы, на них устроены многочисленные запруды и водоёмы. В отдельные маловодные годы в летне-осенний период также могут пересыхать малые реки Малая Слуда и Язёвка и ручей Валовая канава (Дедовик). Кроме того, в русле малых рек: Куротень, Язёвка, Кухмарь, Большая Слуда и ручье Валовая канава (Дедовик) бобрами возведены плотины, которые препятствуют свободному течению воды в этих водотоках, приводят к значительным потерям воды на испарение и фильтрацию, изменению их гидрологического режима, уменьшению приточности воды в озеро Плещеево.

Перечень рек и ручьёв, впадающих в озеро Плещеево и вытекающих из него, расположенные на территории национального парка Плещеево озеро и его охранной зоне приведены в таблице 1.

Таблица 1. Перечень рек и ручьёв, впадающих в озеро Плещеево и вытекающих из него
Table 1. List of rivers and streams flowing into and out of Lake Pleshcheyevo

	Наименование рек, ручьёв и родников	Место впадения (берег)	Длина[1], км	Площадь водосбора, км^2	[2]Среднегодовой сток, за период 2019-2024 гг., тыс. м^3	[3]Среднегодовой сток по данным ИБВВ РАН 1985, тыс. м^3	Питание рек и ручьёв
Реки и ручьи, впадающие в оз. Плещеево							
1	Река Трубеж	ЮВ	36,0	247,02	52127,8	48600,0	Снеговое, дождевое, подземное
2	Река Веськовка	ЮЗ	6,72	11,03	1319,0	2270,6	Снеговое, дождевое, подземное
3	Ручей Матросов овраг	ЮЗ	0,2	0,65	51,8	н/св.	
4	Ручей Ключ Гремяч	ЮЗ	0,26	0,27	991,9	220,8	Частично снеговое, дождевое, подземное
5	Ручей Еглевка	ЮЗ	2,24	2,07	138,4	473,0	Снеговое, дождевое, подземное
6	Ручей Веслевка	ЮЗ	2,47	4,31	141,8	н/св.	

[1] Длина рек и ручьёв (за исключением р.Трубеж), впадающих в озеро Плещеево, и их водосборные площади определены по данным спутниковой съёмки – SRTM, с помощью программного обеспечения Arc Gis (поверхностный сток).
[2] Среднегодовой сток за 2019-2024 гг. приведен по данным ФГБУ «Национальный парк «Плещеево озеро»
[3] Среднемноголетний сток приведён по данным ИБВВ РАН (1989) [1]

7	Ручей Павловка	ЮЗ	1,1	0,97	248,8	н/св.	Снеговое, дождевое, подземное
8	Река Куротень	З	9,32	23,10	2162,0	3532,0	Снеговое, дождевое, подземное
9	Ручей Сосенка	З	0,9	0,91	6,1	н/св.	Снеговое, дождевое
10	Ручей Симак	З	0,2	2,40	261,4	н/св.	Болотное, снеговое, дождевое
11	Река Язёвка	З	1,71	15,64	1763,9	410,0	
12	Ручей Валовая канава (Дедовик)	С	2,7	8,7	1011,1	914,5	
13	Река Кухмарь	СВ	6,84	13,54	458,0	1702,9	Снеговое, дождевое, подземное
14	Ручей Рябцовка	СВ	1,26	1,72	57,0	н/св.	Снеговое, дождевое, подземное
15	Река Малая Слуда	В	2,84	3,14	176,5	н/св.	Снеговое, дождевое, подземное
16	Река Большая Слуда	В	3,95	4,60	909,3	н/св.	
17	Ручей Галев Поток	ЮВ	2,8	4,62	116,7	н/св.	Снеговое, дождевое, подземное
Всего:		-	81,5	344,69	61941,5	62400,0	
Река, вытекающая из оз. Плещеево							
1	Река Нерль[4] (Вёкса Плещеевская), от оз. Плещеево до р.Волга	СЗ	112	3270,0	н/св.	н/св.	Сток из озера, частично снеговое, дождевое, подземное
	в т.ч. от оз. Плещеево до оз. Сомино	СЗ	8,2	н/св.	56512,5	80000,0	

2.3 Режим уровня озера Плещеево

Наблюдения за уровнем воды в озере Плещеево ведутся с 1932 года и к настоящему времени (2024) период наблюдения составляет 93 года.

Гидрологический режим озера и его уровень, определяются, в основном, климатическими особенностями региона, геологическим строением водосбора и величиной площади водосборного бассейна. Сезонный ход уровня воды в озере Плещеево зависит от водного режима и водности источников, питающих озеро, а также от выклинивающихся в котловину озера стоков грунтовых и подземных вод. Кроме того, на уровень воды озера Плещеево оказывает определённое влияние городской водозабор и артезианские скважины, расположенные в водосборном бассейне озера, количество которых ежегодно растёт, а также эксплуатация ГТС (шлюза-регулятора) на р.Нерль (Вёкса Плещеевская) в с. Купанское Переславль-Залесского муниципального округа Ярославской области.

Весной, в период снегового половодья на реках, питающих озеро, приток воды в озеро резко возрастает, летом наоборот, увеличивается расход за счёт испарения. Это отражается на сезонном колебании уровня озера. Такой режим уровня озера типичен для водоёмов Европейской территории России. Наибольших значений он обычно достигает в

[4] Длина и площадь водосбора по реке Нерль (Вёкса Плещеевская) приведена по данным Государственного водного реестра.

период со 2 апреля по 10 мая, спустя примерно 10 суток после начала половодья. В дальнейшем уровень воды плавно понижается и в октябре-декабре становится минимальным. В отдельные особенно дождливые годы можно наблюдать летнее или осеннее повышение уровня за счет дождевых паводков. В многоснежные годы с дружной весной интенсивность весеннего подъёма уровня может достигать 5-10 см/сутки. В малоснежные годы она не превышает 2-5 см/сутки. Летне-осеннее повышение уровня почти всегда уступает весеннему, интенсивность его намного меньше, растягивается оно на более длительный срок.

Амплитуда внутригодовых колебаний уровня невелика и в среднем составляет 65 см[5]. Колебания уровня воды в озере Плещеево зависят от водности р. Трубеж и всех остальных рек и ручьёв, впадающих в озеро, и находится в прямой зависимости от погодных условий года, и в первую очередь – от осадков и температуры воздуха. Максимальные уровни зафиксированы: весной 1926 г. (28 и 29 апреля) на отметке 138,19 м (БС), в 2013 г – на отметке 138,20 м (БС). Минимальные уровни наблюдались: в 1973 г – на отметке 136,94 м (БС), в 1975 г. – 136,99 м (БС) и 1976 г. – 136,95 м (БС). По данным Ярославского ЦГМС, за весь период инструментальных наблюдений самый максимальный уровень воды в озере Плещеево наблюдался в 2013 году (с 28 апреля по 2 мая) на отметке – 138,20 м (БС). А самый минимальный был зафиксирован в 1973 году на отметке – 136,94 м (БС). По данным Ярославского ЦГМС (месячный бюллетень за апрель 2017г.), при достижении уровня воды в озере Плещеево отметки = 138,07 м (БС) – считается опасным явлением (ОЯ).

Следует отметить, что характер изменения уровня в многоводные и маловодные периоды практически не меняется.

Среднегодовые уровни воды в озере Плещеево за период 1932-2024 гг. до строительства и после строительства гидротехнического сооружения (ж/б шлюза-регулятора) в теле земляной плотины на р. Нерль (Вёкса Плещеевская) в с. Купанское в Переславль-Залесском муниципальном округе Ярославской области приведены в таблице 2.

Исходя из данных, приведенных в таблице 2, был построен график среднегодовых уровней воды за период 1932-2024 гг. (93 год). Показатели среднегодовых уровней воды приведены над нулём графика поста, равного отметке 136,92 м (БС).

По графику среднегодовых уровней воды за 1932-2024 гг. видно, что заметное повышение уровня озера Плещеево отмечается с 1976 года - с момента окончания строительства гидротехнического сооружения (ж/б шлюза-регулятора) в теле земляной плотины на р. Нерль (Вёкса Плещеевская) в с. Купанское в Переславль-Залесском муниципальном округе Ярославской области.

Кроме того, на отрезке 1959-1975 гг. можно наблюдать устойчивый тренд к понижению уровня воды в озере с 55 до 18 см над нулём поста. Согласно архивным данным, с конца 1959-х годов на Берендеевом болоте, из которого берет начало р. Трубеж (основной приток озера Плещеево) началась интенсификация торфоразработок, в 1959 году был построен торфобрикетный завод, а в 1960-1970 – в целях понижения уровня грунтовых вод были

[5] по данным Ярославского ЦГМС

проведены осушительные мелиорации, сопровождающиеся строительством открытых дренажных канав, а также магистральных, валовых и нагорных каналов. В результате, был нарушен природный водный баланс и произошла техногенная трансформация рельефа Берендеево болота, перераспределение стока воды из бассейна р. Трубеж (и соответственно озера Плещеево) в бассейн р. Клязьмы (в р. Малый Киржач). Питание р. Трубеж за счет поверхностных вод болота Берендеево было практически отрезано. Это стало одной из главных причин обмеления озера.

Таблица 2. Показатели среднегодовых уровней воды приведены над нулём графика поста равного отметке 136,92 м (БС).
Table 2. The indicators of the average annual water levels, which are above the zero point on the fasting schedule and equal to 136.92 meters (BS).

За период 1932 – 1975гг. (44 года)				За период 1976 – 2024гг. (49 лет)			
Годы	Уровень, см	Годы	Уровень, см	Годы	Уровень, см	Годы	Уровень, см
1932	44	1954	30	1976	48	1998	85
1933	46	1955	43	1977	52	1999	71
1934	42	1956	48	1978	58	2000	58
1935	52	1957	45	1979	58	2001	74
1936	43	1958	48	1980	63	2002	62
1937	28	1959	55	1981	51	2003	61
1938	28	1960	43	1982	55	2004	72
1939	31	1961	38	1983	59	2005	74
1940	29	1962	46	1984	62	2006	61
1941	38	1963	43	1985	68	2007	69
1942	44	1964	21	1986	69	2008	71
1943	40	1965	31	1987	70	2009	59
1944	32	1966	38	1988	55	2010	64
1945	35	1967	22	1989	58	2011	57
1946	43	1968	27	1990	70	2012	79
1947	45	1969	33	1991	80	2013	80
1948	35	1970	39	1992	67	2014	64
1949	30	1971	32	1993	79	2015	59
1950	48	1972	30	1994	73	2016	73
1951	42	1973	27	1995	66	2017	85
1952	42	1974	26	1996	54	2018	79
1953	56	1975	18	1997	73	2019	67
						2020	81
						2021	70
						2022	68
						2023	58
						2024	68

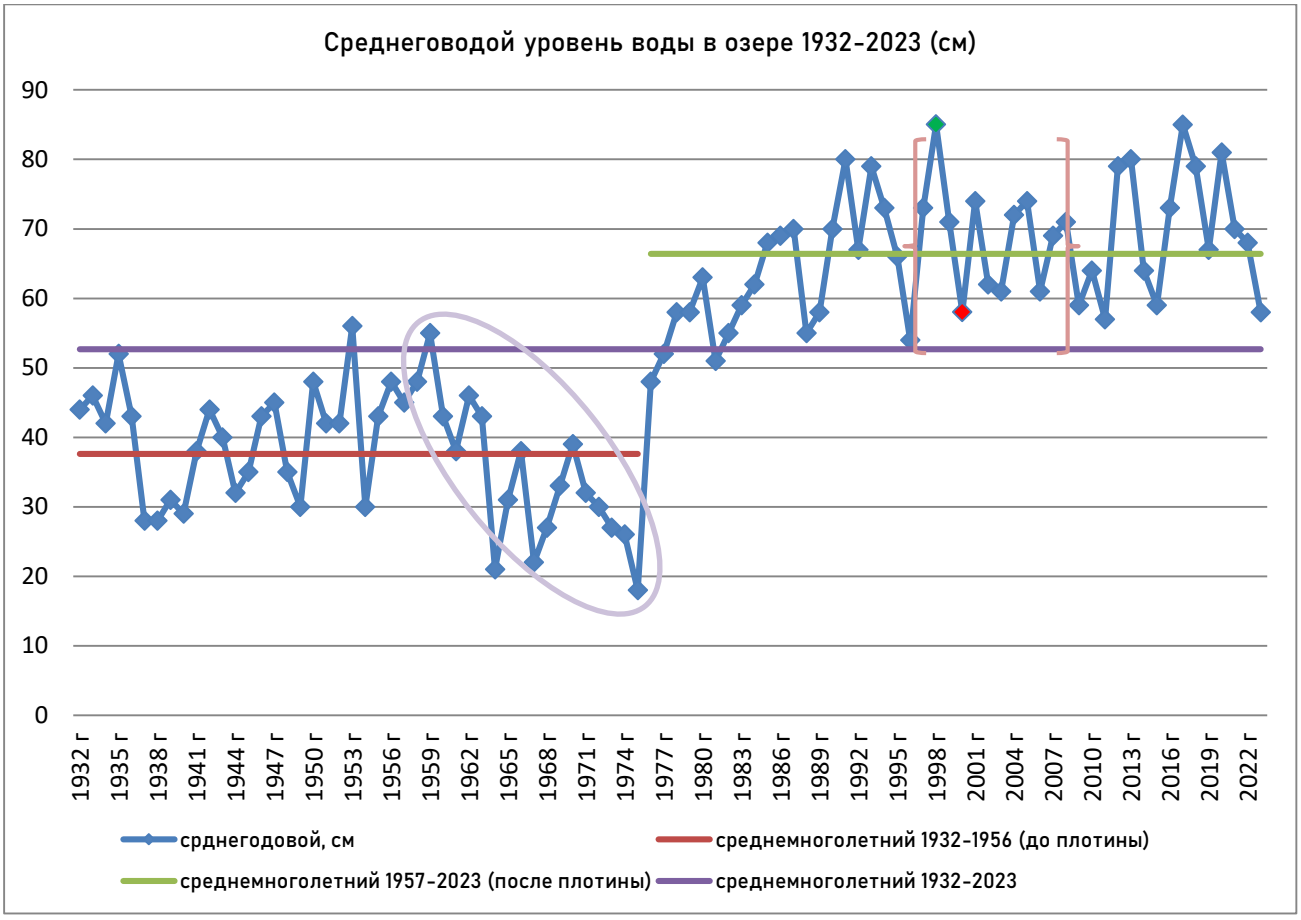


Рис. 5. Среднегодовой уровень воды в озере Плещеево за период 1932-2024 гг.
Fig. 5. The average annual water level in Lake Pleshcheyevo for the period 1932-2024

Кроме того, в окрестностях с. Купанское, в том числе и на водосборе ручья Валовая канава с 1931 г., в течение нескольких десятилетий также велась активная разработка торфяных болот. Для добычи торфа были проведены осушительные мелиорации, сопровождающиеся строительством открытых дренажных канав в целях понижения уровня грунтовых вод, что также оказало существенное влияние на отток воды из чаши озера в северо-западном направлении, в сторону Волжско-Нерльской низины. В те годы добыча торфа также проводилась в Блудовом болоте (исток р. Язёвка) и других. Поэтому было принято решение о строительстве регулируемой плотины на р. Нерль (Вёкса Плещеевская).

Характерной особенностью режима уровня в озере Плещеево является наличие двух типов годового хода уровня в зависимости от водности года.

Первый тип – минимальный уровень наблюдается в октябре – ноябре и с декабря начинается его медленное повышение. Интенсивный весенний подъём уровня отмечается в конце марта – начале апреля и максимальных значений он достигает в середине апреля. Затем наблюдается постепенное понижение уровня до минимальных значений. Этот тип годового хода уровня характерен для маловодных и средних по водности лет.

Второй тип – минимальный уровень приходится на ноябрь – декабрь, а в отдельные годы – на январь – февраль. Интенсивный подъём уровня начинается в апреле, но максимальный уровень отмечается во второй его половине или в начале мая. Второй

максимум уровня может наблюдаться в июле или осенью, вследствие интенсивных дождевых паводков. Этот тип хода годового уровня характерен для многоводных лет.

Между тем в последние годы отмечаются изменения годового хода уровня, что связано с погодными условиями – потеплением климата, повышением температуры воздуха, особенно в зимний период и увеличением количества выпадающих осадков.

В 2019 году ход уровня соответствовал первому типу годового хода (маловодному году). В 2020 году ход уровня воды соответствовал второму типу годового хода уровня (многоводному году). Вместе с тем, наблюдавшиеся сроки начала подъёмов уровня воды в 2020 году в озере, как весеннего, так и летнего, значительно отличались от вышеуказанных сроков и были смещены на более ранние сроки. Это произошло из-за аномально тёплой погоды, наблюдавшейся в зимне-весенний период 2020 года. Интенсивный подъём уровня воды в озере Плещеево в 2020 году начался (раньше обычных сроков) в конце февраля и достиг максимума 24 марта с отметкой 137,90 м. (БС). С 3 апреля начался постепенный спад уровня, который продолжался до 31 мая и достиг отметки 137,77 м. (БС). Соответственно понижение уровня воды в озере Плещеево после первого подъёма за данный период составила 0,13 метра. Второй подъём уровня воды начался с 1 июня (также раньше обычных сроков) и достиг максимума 28 июня с отметкой 137,93 м (БС), превысив максимальный весенний уровень на 3 см. Спад уровня начался со 2 августа (значительно позже обычных сроков) и продолжался до конца года. Отмеченный ход уровня в течение 2020 года не наблюдался за последнее десятилетие. В целом в 2020 г. уровень воды в озере Плещеево не понижался ниже отметки среднемноголетнего уровня - 137,47 м (БС), по состоянию на 31 декабря 2020 года – соответствовал отметке 137,51 м (БС).

В 2021 году ход уровня наблюдался в обычном режиме и соответствовал второму типу годового хода уровня (многоводному году). В 2022 году ход уровня соответствовал первому типу годового хода уровня (маловодному году). Между тем, в 2022 году произошло не характерное падение уровня воды в озере Плещеево. С одной стороны – из-за недобора осадков и продолжительных высоких температур воздуха, наблюдавшихся в летний период, спровоцировавших маловодье на всех притоках озера Плещеево, с другой стороны – из-за ненадлежащей эксплуатацией ГТС (шлюза-регулятора) на р.Нерль (Вёкса Плещеевская) в с. Купанское. В 2023 году ход уровня наблюдался в обычном режиме и соответствовал первому типу годового хода уровня (маловодному году). В 2024 году ход уровня соответствовал второму типу годового хода уровня (многоводному году).

В 2019, 2020, 2021, 2023 и 2024 годах уровень воды в озере Плещеево не понижался ниже среднемноголетней величины, которая составляет – 137,47 м (БС). В маловодном 2022 году уровень воды в озере Плещеево в период с 15 по 25 сентября уровень воды снижался до отметки 137,28 м (БС), что не наблюдалось за последние 19 лет. Графики уровня воды за 2019 - 2024 гг. приведены на рис. 6.

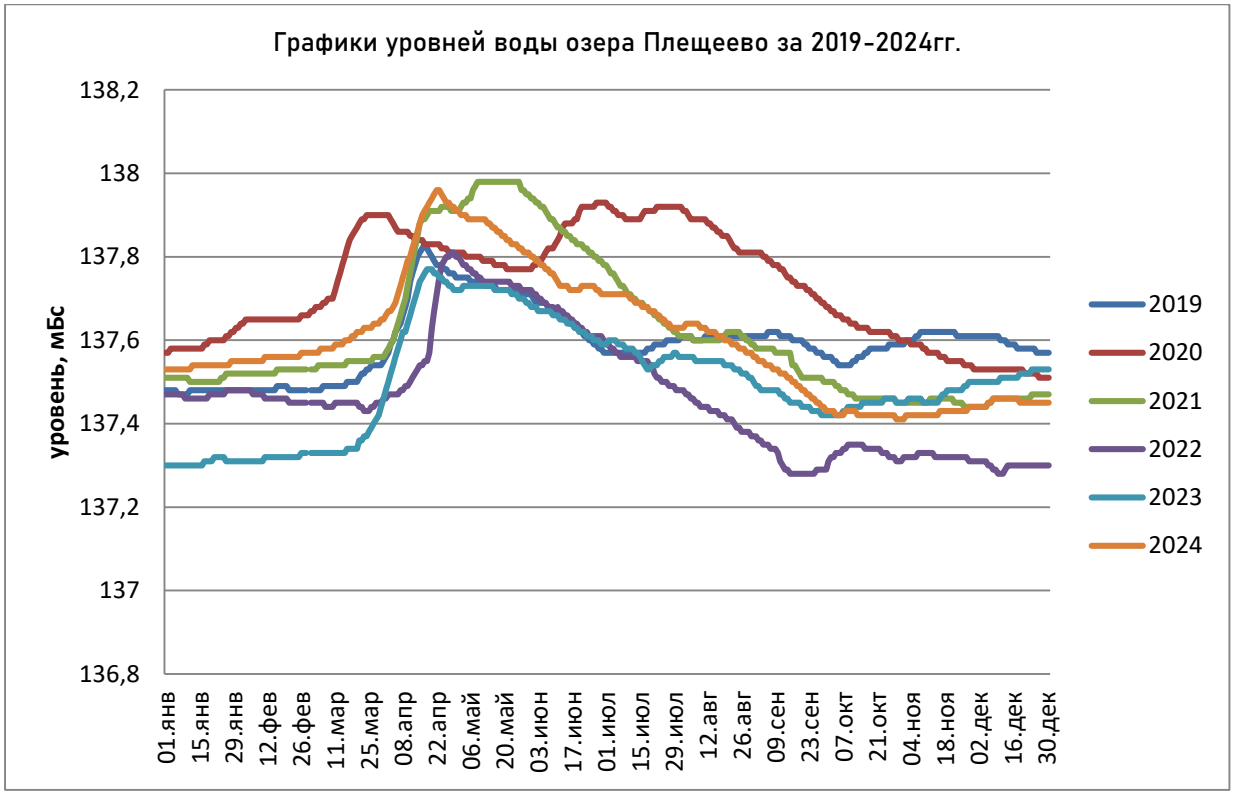


Рис. 6. Графики уровня воды озера Плещеево за 2019 – 2024 гг.
Fig. 6. Graphs of the water level of Lake Pleshcheyevo for 2019-2024.

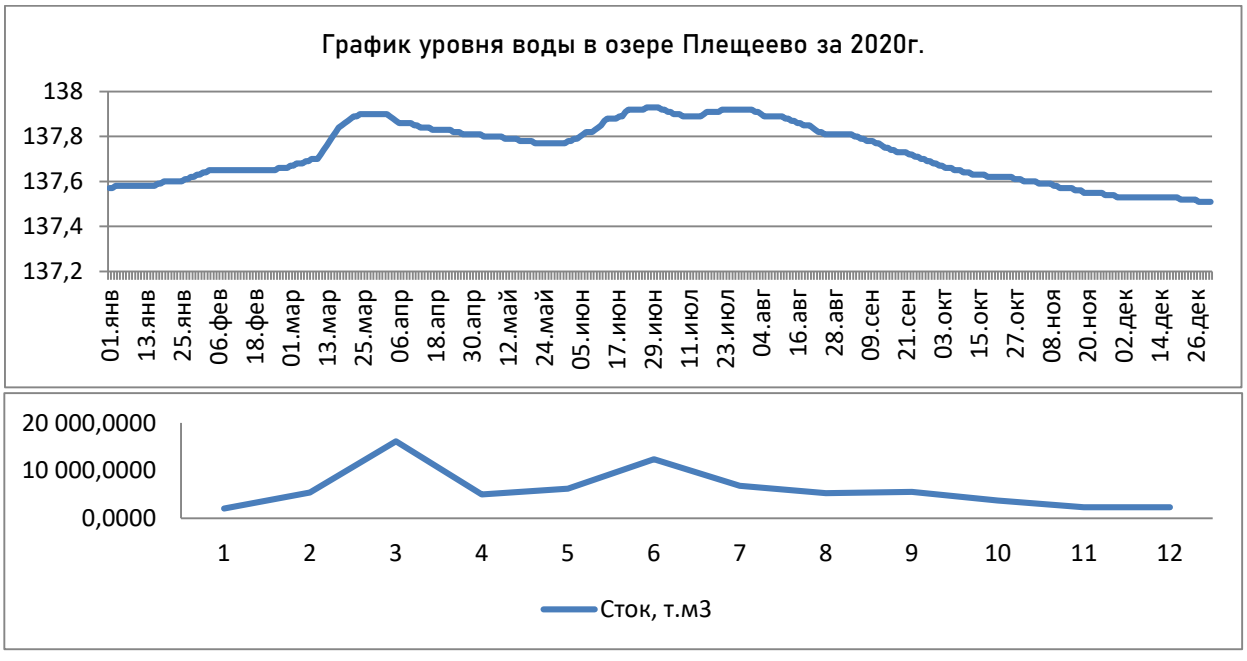


Рис. 7. Сравнение графика внутригодового хода уровня воды в озере Плещеево с гидрографом стока р.Трубеж за 2020 год
Fig. 7. Comparison of the graph of the intraannual course of the water level in Lake Pleshcheyevo with the hydrograph of the river runoff.Trubezh for 2020

Сравнивая, приведённые графики рис. 7 внутригодового хода уровня в озере Плещеево и стока р. Трубеж за 2020 год следует отметить, что сезонный ход уровня воды в озере Плещеево зависит от водности источников, питающих озеро, и повторяет график стока реки Трубеж (главного притока озера), имеющий преимущественно поверхностное питание.

Кроме того, для озера Плещеево характерны периодические многолетние и сезонные колебания уровня, которые зависят от величины стоков р.Трубеж и всех остальных притоков, питающих озеро. Немаловажное значение на уровень воды в озере также оказывает приток воды в котловину озера из подземных горизонтов.

2.4 Водный баланс озера Плещеево

Анализ водного баланса озера является ключевым при его изучении. Необходимо знать, сколько воды попадает в водоём с поверхностным и подземным стоком, с атмосферными осадками и сколько вытекает из него и испаряется. Количество воды, попадающей в водоём и уходящей из него, бывает примерно равным, это и составляет его водный баланс. Однако, в случае, если количество воды, попадающей в водоём будет больше, чем уходящей из него, то произойдёт аккумуляция (наполнение) запаса (объёма) воды в водоёме. В случае, если количество воды, уходящей из водоёма, будет больше количества воды, попадающей в водоём, то произойдёт уменьшение запасов воды в водоёме.

Попытка составления водного баланса предпринималась неоднократно в прошлом столетии. Однако из-за отсутствия длительных и надёжных наблюдений за стоком р.Трубеж (основной приток) и р. Нерль (Вёкса Плещеевская – единственный исток), стоком малых рек и ручьёв, впадающих в озеро, а также отсутствие данных о подземном притоке и подземном оттоке из озера (боковой фильтрации) не представлялось возможным составить водный баланс озера Плещеево близкий к действительному.

Согласно оценке среднемноголетнего водного баланса, составленного в 1985 г. сотрудниками ИБВВ АН СССР [1], приходная часть составляет всего 92,8 млн. м^3, из них:

- сток из р.Трубеж составляет 48,6 млн. м^3 (52,4%);
- сток из всех остальных малых рек и ручьёв – 13,8 млн. м^3 (14,6%);
- осадки на водное зеркало – 30,4 млн. м^3 (32,8%).

Расходная часть всего 104,7 млн. м^3, из них:

- сток р.Нерль (Вёкса Плещеевская) – 80,0 млн. м^3 (76,4%);
- испарение с водного зеркала – 24,7 млн. м^3 (23,6%).

Баланс по (поверхностный приход – расход) **Δ**Пов составил: 104,7 – 92,8 = 11,9 млн. м^3. При этом полная смена вод озера по оценкам на 1989 г. происходит примерно за 5,5 лет (см. таблица 3).

Предложенный водный баланс озера Плещеево в среднемноголетнем исчислении, выполненный В.Л. Рохмистровым [2] в 2000 году, показал, что ежегодно в него поступает с поверхностным стоком 93,6 млн. м^3 воды, осадки на водное зеркало составляют 29,5 млн. м^3. Соответственно, приходная часть составляет 123,1 млн. м^3. Расходная часть составляет всего 142,5 млн. м^3, из них:

- сток р.Нерль (Вёкса Плещеевская) – 107,9 млн. м^3;
- городской водозабор – 5,7 млн. м^3;
- испарение с водного зеркала – 28,9 млн. м^3.

Баланс по (поверхностный приход – расход) **Δ**Пов составил: 142,5 – 123,1 = 19,4 млн. м^3. При этом полная смена вод озера происходит примерно за 3,8 года (см. таблица 3).

Значительная работа по уточнению водного баланса озера Плещеево проделана сотрудниками Национального парка «Плещеево озеро». Начиная с 2019 года и по настоящее время проводится гидрологический мониторинг на всех притоках, впадающих в озеро Плещеево, а также на вытекающей из него р. Нерль (Вёкса Плещеевская). На каждой исследуемой реке и ручье для измерения поверхностного стока и взятия проб воды для химического анализа на содержание загрязнителей был выбран створ с учётом гидрометрических требований (прямолинейный участок на водотоке, с одинаковым сечением русла водотока на данном участке, с равномерным движением воды и отсутствием подпора). Были проведены измерения глубины и ширины русла рек и ручьёв, а также промеры глубин воды.

Глубина водного потока на малых реках и ручьях была измерена с помощью рейки гидрометрической ГР-56-01, на отдельных маленьких ручейках – с помощью промерной линейки длиной 1 метр. На крупных водотоках, реках Трубеж и Нерль (Вёкса Плещеевская) тросом с разметкой с металлическим грузом 0,5 кг. По данным измерений были построены поперечные профили живого сечения водного потока по всем рекам и ручьям и определены их площади в местах промерных створов. Скорость течения воды в русле реки/ручья определяется аналитическим способом по наибольшей поверхностной скорости течения, с использованием поверхностных поплавков.

Фактические расходы воды на всех реках и ручьях определяются расчётным способом. Среднемесячные показатели определяются как среднее арифметическое по всем замерам за месяц. На основании вычисленных среднемесячных стоков производится построение гидрографов стоков воды для р.Трубеж и всех остальных притоков озера Плещеево и р.Нерль (Вёкса Плещеевская).

В связи с отсутствием данных о подземном притоке и подземном оттоке (боковой фильтрации), то при составлении водного баланса эти показатели не учитывались. Данные наблюдений и расчетов за период 2019-2024 гг. также представлены в таблице 3.

Уравнение водного баланса рассматривалось в упрощённом виде с учетом только основных составляющих прихода и расхода, а также изменения запаса воды в озере за расчётный период (год).

$(Q_{пр} + P_{оз}) – (Q_о + V_{гв} - + E_{оз)} = \Delta V_{оз} \pm \Delta W$, где:

$Q_{пр}$ – приток речных вод в озеро (суммарный годовой сток всех притоков), млн. м^3;

$P_{оз}$ - осадки, выпадающие на водное зеркало озера, млн. м^3;

$Q_о$ - речной отток из озера (сток р. Нерль (Вёкса Плещеевская), млн. м^3;

$V_{гв}$ - объём городского водозабора, млн. м^3;

$E_{оз}$ - испарение с водного зеркала озера, млн. м^3;

$\Delta V_{оз}$ – разница в объеме воды в озере в конце и в начале года;

± W - невязка водного баланса озера.

Суммарный поверхностный приток воды в озеро Плещеево из р.Трубеж и всех малых рек и ручьёв $Q_{пр,}$ а также отток воды из озера через р. Нерль (Вёкса Плещеевская) определялись по данным гидрологического мониторинга, проводимого Национальным парком «Плещеево орзеро».

Данные по объёму городского водозабора $V_{гв}$ предоставлены эксплуатирующей организацией за расчётный период.

Объем осадков, выпадающих на поверхность озера, $P_{оз}$ определялся расчётным путём по формуле: $P_{оз} = F_{вз} * К_{ос}$, где $F_{вз}$ - площадь водного зеркала, $К_{ос}$ – количество выпавших осадков на водное зеркало за расчётный период (по данным метеостанции, находящейся в г. Переславль-Залесский). В связи с отсутствием современных данных по испарению воды с поверхности озера, для определения этой расходной величины также были использованы расчетные методы[6].

Площадь водного зеркала $F_{вз}$, а также объем воды в озере $V_{оз}$ рассчитывалась по таблицам [1] на основании данных по уровню воды в озере, предоставленных филиалом Ярославского ЦГМС.

На основании результатов проведённого в 2019 – 2024 гг. гидрологического мониторинга на р.Трубеж и всех остальных притоках озера, а также на р.Нерль (Вёкса Плещеевская) вытекающая из озера, а также данных, предоставленных партнерскими организациями, сотрудниками научного отдела парка были определены основные составляющие приходной и расходной части водного баланса озера Плещеево.

Важной гидрологической характеристикой озера, во многом определяющей особенности функционирования его экосистемы, является величина внешнего водообмена. Она представляет собой отношение объёма водной массы озера Плещеево к общему расходу воды из него за год и показывает, за какой период времени может произойти полная смена воды в водоёме. В 2019 году, согласно расходу воды из озера (сток в истоке р.Нерль (Вёкса Плещеевская) + городской водозабор + испарение), эта величина составила 7,4 года, в 2020 году – 4,9 года, 2021 году – 5,8 года, 2022 году – 6,1 года, 2023 году – 6,1 и 2024 году – 6,0 лет. Средняя величина внешнего водообмена за период 2019-2024 гг. составила 6,0 лет. Проточность озера, рассчитанная по данным ИБВВ РАН [1] за 1983-1985 гг., составила 5,5 лет; по данным Рохмистрова [2] – 3,8 лет. Однако, на наш взгляд, эти данные требуют более тщательного рассмотрения.

В целом, результаты подтверждают, что озеро Плещеево относится к водоёмам замедленного водообмена и является весьма восприимчивым к антропогенному воздействию.

[6] Государственный гидрологический институт Главного управления гидрометслужбы при Совете Министров СССР, «Указания по расчёту испарения с поверхности водоёмов», Ленинград, 1969г.

Таблица 3. Сопоставительная таблица водного баланса озера Плещеево за 1970, 1985, 2000, 2019-2024 гг.
Table 3. Comparative table of the water balance of Lake Pleshcheyevo for 1970, 1985, 2000, 2019-2024.

Составляющие водного баланса	По данным ИБВВ АН СССР[1]		По данным Рохмистрова [2]		По данным ФГБУ «Национальный парк «Плещеево озеро»											
	1985 год		2000 год		2019 год		2020 год		2021 год		2022 год		2023г.		2024г.	
	Млн. $м^3$	Доля в %	Млн. $м^3$	Доля в %	Млн. $м^3$	Доля в %	Млн. $м^3$	Доля в %	Млн. $м^3$	Доля в %	Млн. $м^3$	Доля в %	Млн. м3	Доля в %	Млн. м3	Доля в %
Сток р.Трубеж	48,6	52,4	85,5	69,5	32,1	46,9	73,1	60,0	53,3	53,4	48,9	58,9	54,3	56,4	50,9	57,5
Суммарный сток всех малых рек и ручьёв	13,8	14,9	8,1	6,6	5,3	7,7	11,8	9,7	11,1	11,1	9,2	11,1	10,4	10,8	10,5	11,9
Осадки на водное зеркало	30,4	32,8	29,5	24,0	31,1	45,4	36,9	30,3	35,5	35,5	24,9	30,0	31,5	32,7	27,1	30,6
Суммарный приход, P	92,8	100	123,1	100	68,5	100	121,8	100	99,9	100	83	100	96,2	100,0	88,5	100
Сток р.Нерль (Вёкса Плещеевская)	80	76,4	107,9	75,7	39,3	53,2	77	69,1	60	63,8	52,7	60,6	53,2	60,9	56,9	62,0
Городской водозабор	0	0,0	5,7	4,0	7,3	9,9	7	6,3	6,6	7,0	7	8,1	7	8,0	7,6	8,3
Испарение с водного зеркала	24,7	23,6	28,9	20,3	27,3	36,9	27,5	24,7	27,4	29,1	27,2	31,3	27,2	31,1	27,3	29,7
Суммарный расход, R	104,7	100	142,5	100	73,9	100	111,5	100	94	100	86,9	100	87,4	100	91,8	100
Баланс по (поверх. приход - расход), Δ Пов	-11,9		-19,4		-5,4		10,3		5,9		-3,9		8,8		-3,3	
Объем воды в озере(рассчет по уровню), V:																
- на начало года	-	-	-	-	542	-	546,5	-	543,5	-	541,6	-	533	-	544,5	-
- на конец года	576	-	[538,8]	-	546,5	-	543,5	-	541,6	-	533	-	544,5	-	540,6	-
Изменение объема воды за год, Δ V	-	-	-	-	4,5	-	-3	-	-1,9	-	-8,6	-	11,5	-	-3,9	-
Невязка баланса ± Δ W	-3,2		1,2		9,9		-13,3		-7,8		-4,8		2,8		-0,6	
Проточность	5,5		3,78		7,4		4,9		5,8		6,1		6,1		5,9	

Исследование выполнено в рамках исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» https://rgo.ru/.

Библиография

1. Экосистема озера Плещеево. – Л.: Наука, 1989. – 264 с.

2. Рохмистров В.Л. Плещеево озеро: гидрологический очерк. – Ярославль: Издание ВВО РЭА, 2002. – 90 с.

The Hydrological Regime of Lake Pleshcheevo

Suren H. Khachaturov[1] *****
[1] Pleshcheyevo Lake National Park, Pereslavl-Zalessky (Yaroslavskaya reg.), Russia
*****suren.nauka@mail.ru

Keywords hydrological regime, Pleshcheyevo lake, water balance, lake flow rate

Abstract The article provides an analysis of the hydrological regime of Lake Pleshcheyevo and its tributaries, as well as an assessment of the water balance and flow rate of the lake, based on archival data and recent observations from the National Park "Pleshcheyevo Lake" over the period 2019-2024.

УДК 574.5/ UDC 502.3

Цветение водоемов: экологические аспекты и распространение Gloeotrichia echinulata в озере Плещеево



Д.А. Тарасова[1]*

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

* tarasowadarja@gmail.com

Ключевые слова фитопланктон, эвтрофикация, циаобактерии, цианотоксины, глеотрихия

Аннотация Озеро Плещеево — важный природный объект, выполняющий функции источника питьевой воды, зоны рекреации и охраняемой природной территории. В последние годы в озере отмечаются признаки нарастающей эвтрофикации, а с 2017 года — массовое развитие колониальной цианобактерии *Gloeotrichia echinulata*. В статье рассматриваются возможные причины появления этого вида, включая особенности жизненного цикла и стратегии питания *G. echinulata*. Отдельное внимание уделяется её роли как вида, модифицирующего экосистему, и потенциальной токсичности. На основе анализа данных предлагается рассматривать вспышку *G. echinulata* как индикатор глубоких изменений в экосистеме озера. Подчеркивается необходимость постоянного мониторинга, оценки экологических рисков и разработки стратегии адаптивного управления.

1 Введение

Эвтрофикация представляет собой одну из наиболее важных и серьезных экологических проблем, стоящих перед водными системами суши во всем мире [1]. Этот процесс представляет собой чрезмерное поступление биогенных веществ, в частности соединений азота и фосфора, в водные объекты. На глобальном уровне поступление фосфора в реки и океаны увеличилось примерно в три раза по сравнению с историческими показателями, достигнув 22 млн тонн в год [2]. Основные источники этих веществ подразделяются на две категории: внешние (аллохтонные), поступающие с хозяйственно-бытовыми сточными водами, поверхностным и подземным стоком с территорий, в том числе с земель сельскохозяйственного пользования и населенных пунктов [1], а также внутренние (автохтонные), связанные с динамикой биогенов в самом водоеме. Например, к внутренним

процессам относится высвобождение фосфора из донных отложений [3]. Сброс неочищенных промышленных стоков, а также ливневых и сточных вод с территории городов, существенно меняет важнейшие для функционирования характеристики водоемов.

Последствия эвтрофикации очень серьезны. Эвтрофикация приводит к снижению видового разнообразия, быстрому обмелению и доминированию детритных пищевых цепей. Одним из наиболее заметных и опасных проявлений эвтрофикации является массовое развитие микроводорослей или «цветение» воды, часто вызываемое цианобактериями (сине-зелеными водорослями) [4]. Такие «цветения» изменяют абиотические факторы водного объекта, напрямую влияя на рост, разнообразие и плотность биотических компонентов, и, как следствие, на структуру и характеристики водной среды. Это серьезный урон для рыболовства и туризма, а также для здоровья человека, поскольку некоторые виды цианобактерий выделяют токсины, опасные для людей и других живых организмов [5,6]. Наиболее опасными считаются гепатотоксины (микроцистин, цилиндроспермопсин) и нейротоксины (сакситоксины). Самым изученным из них является гепатотоксин микроцистин, считающийся потенциальным канцерогеном для человека [7,8,9]. Известно, что он способен продуцироваться представителями родов *Microcystis*, *Anabaena*, *Planktothrix* и *Nostoc* [10], а также *Dolichospermum* и *Oscillatoria*, однако виды, продуцирующие цианотоксины в одних климатических условиях, не всегда способны к синтезу токсинов в других условиях [11]. Согласно СанПиН 1.2.3685-21, в России для питьевых вод, вод водных объектов хозяйственнопитьевого и культурно-бытового водопользования, плавательных бассейнов и аквапарков предельно допустимая концентрация MC-LR составляет 1 мкг/л. Еще одним серьезным последствием является гипоксия (образование бескислородной зоны) или даже аноксия, возникающая в результате разложения отмирающей биомассы водорослей[1]. Низкий уровень растворенного кислорода является показателем эвтрофикации [12,13].

Масштабы проблемы эвтрофикации являются глобальными. Она затрагивает озера и реки по всему миру. Примерами являются озеро Мирик, озеро Белландур, озеро Робертсон, реки Кавери и Ганг в Индии [1], озеро Пейпси в Эстонии [14] и озеро Констанц в Германии[2]. Недавние исследования с использованием спутниковых снимков показали, что за последние 40 лет (1984-2021 г.) десятки тысяч озёр по всему миру изменили свой цвет, что свидетельствует об изменениях в их экологическом состоянии [15]. Изучались спутниковые снимки, охватывающие 67579 водоёмов площадью более одного квадратного километра, что составляет около 39% всей озёрной поверхности планеты. С помощью искусственного интеллекта исследователи оценили динамику изменения цвета водоёмов, связывая её с такими факторами, как температура воздуха, количество осадков, объём воды и плотность

[1] Ansari A., Gill S. Eutrophication: Causes, Consequences and Control Volume-2. 2014.
[2] Kümmerlin R. Taxonomical response of the phytoplankton community of Upper Lake Constance (Bodensee-Obersee) to eutrophication and reoligotrophication // Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Adv. Limnol. 1998. V. 53. P. 109–117.

населения в бассейне озера. За почти 38 лет более половины (60%) исследованных водоёмов изменили свой цвет. Наиболее заметные изменения цвета отмечались в густонаселённых районах, что указывает на прямое воздействие антропогенных факторов на экологическое состояние водоёмов. Исследование продемонстрировало значительную динамику в изменении цвета озёр по всему миру, что отражает изменения в их экологическом состоянии и подчёркивает влияние как природных, так и антропогенных факторов на водные экосистемы.

Существующие взгляды на причины развития эвтрофикации подчеркивают ключевую роль фосфора как лимитирующего элемента для большинства пресноводных экосистем. Увеличение содержания фосфора способствует доминированию цианобактерий. Исторически производители моющих средств оспаривали роль фосфора, утверждая, что лимитирующим элементом является углерод, но многочисленные исследования, включая крупномасштабные эксперименты на озерах, убедительно доказали критическую роль фосфора [3]. Основными источниками поступления фосфора являются интенсивное использование фосфатсодержащих моющих средств и сельскохозяйственных удобрений.

Например, в Уругвае моющие средства составляли 58% суточной нагрузки фосфора в Рио-де-ла-Плата, а использование фосфорных удобрений достигало 40000 тонн в год [1]. Экспериментальные исследования показали, что даже распространенные моющие средства значительно увеличивают сухой вес, содержание хлорофилла и поглощение N, P, K водными растениями. Внутренние процессы в водоемах, например, высвобождение фосфора из донных отложений, играют значительную роль в биогеохимических круговоротах элементов на уровне водной экосистемы [16,17]. Кроме того, глобальное потепление усугубляет проблему, способствуя более интенсивному цветению водорослей, в том числе за счет активации акинет (покоящихся клеток) цианобактерий, которые зимуют в донных отложениях и прорастают при благоприятных условиях[3]. Актуальность рассмотрения механизмов эвтрофикации особенно важна на примере конкретных водоёмов. Значение озера Плещеево как источника питьевой воды, а также центра туризма и отдыха в Переславле-Залесском, делает проблему массового развития цианобактерий особенно острой и требующей научного внимания.

2 Материалы и методы

В ходе работы был проведён комплексный анализ научной литературы, посвящённой экологическому состоянию озера Плещеево, включая исследования биогенной нагрузки, биологической продуктивности, явлений цветения, а также структурно-функциональных характеристик сообществ фитопланктона, зоопланктона и других гидробионтов. Особое внимание уделялось публикациям, рассматривающим динамику альгоценозов,

[3] Dokulil M., Teubner K. Eutrophication and climate change: present situation and future scenarios // Eutrophication: causes, consequences and control. Springer, Dordrecht. 2011. P. 1–16.

гидробиологические показатели и влияние антропогенных факторов на экосистему озера. В их числе – отчеты о проведенных научно-исследовательских работах ИБВВ РАН на оз. Плещеево. Детально изучены публикации, описывающие экологические аспекты жизнедеятельности цианобактерии *Gloeotrichia echinulata*, включая особенности её жизненного цикла, сезонную динамику развития и пространственно-временную встречаемость в экосистеме озера. Дополнительно в рамках научно-исследовательской экспедиции «Интеллектуальный хранитель наследия "Плещеево озеро"» (Национальный парк «Плещеево озеро», г. Переславль-Залесский, Ярославская обл.) были проведены полевые рекогносцировочные наблюдения для уточнения современного состояния водоема.

2.1 Трофический статус озера Плещеево

Анализ многолетних наблюдений за содержанием хлорофилла «а», проведенных Институтом биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина в озере Плещеево[4,5,6], позволяет выделить несколько ключевых периодов. В 1980-е годы концентрация хлорофилла «а» была наиболее высокой по сравнению с последующими десятилетиями. В 1990-е годы и в 2014 году этот показатель находился на значительно более низком уровне, что свидетельствует о снижении продуктивности водоема. В 2015 году среднее за вегетационный сезон содержание общего хлорофилла «а» составило 4.16±2.06 мкг/л, что соответствует характеристикам мезотрофного водоема. Однако максимальная фотосинтетическая активность фитопланктона в этом году достигла значений, характерных для эвтрофных водоемов, что отличает 2015 год от 1980-х и 2014 года, когда показатели не превышали уровня умеренной мезотрофии.

В 2017 году динамика содержания хлорофилла «а» была следующей: в мае — от 1.09 до 7.95 мкг/л (среднее 2.80±1.58 мкг/л), в июне — от 2.50 до 4.77 мкг/л (среднее 3.44±0.79 мкг/л), в августе — от 1.57 до 4.30 мкг/л (среднее 2.66±0.73 мкг/л), в сентябре — от 1.65 до 18.23 мкг/л (среднее 3.95±3.81 мкг/л). В целом, колебания концентрации хлорофилла «а» в течение года были незначительными и свидетельствовали о мезотрофном статусе водоема на большинстве станций, за исключением одной из исследуемых станций, где осенью наблюдались эвтрофные значения. Анализ данных за последние четыре года (2014–2017) подтверждает эту тенденцию: концентрация хлорофилла «а» составила 3.7±1.6 мкг/л (2014), 4.2±2.1 мкг/л (2015), 3.5±1.2 мкг/л (2016) и 3.1±1.4 мкг/л (2017). Эти значения сопоставимы с ранее полученными и позволяют отнести озеро к мезотрофному типу.

Структура фитопланктона также претерпела изменения. В 2014 году отмечались незначительные биомассы фитопланктона и отсутствие выраженных пиков развития

[4] Экосистема озера Плещеево. Л.: Наука, 1989. 264 с
[5] Отчет ИБВВ РАН о НИР по теме: «Мониторинг биогенной нагрузки на оз. Плещеево». Борок, 2017. 112 с.
[6] Отчет ИБВВ РАН о НИР по теме: «Комплексное исследование экосистемы оз. Плещеево». Борок, 2015. 220 с.

водорослей, что подтверждает мезотрофный статус водоема. В 2015 году средняя за вегетационный сезон биомасса фитопланктона составила 2.62 мг/л, что также соответствует мезотрофному типу. Это значение выше, чем в предыдущем году (1 мг/л). Сравнительный анализ с 1980-ми и 1990-ми годами выявил увеличение вклада криптофитовых водорослей в биомассу, что может свидетельствовать о росте трофии, так как криптомонады способны к миксотрофному питанию. В целом, массовое развитие синезеленых водорослей (с преобладанием видов рода *Anabaena* и *Aphanizomenon flos – aquae*) было характерным для озера в летний период, что подтверждается исследованиями 1989, 1992, 1996, 2016 г. Однако в 2017 году впервые за четырехлетний период наблюдений была зарегистрирована активная вегетация синезеленых водорослей, в частности, вида *Gloeotrichia echinulata*, что ранее не отмечалось. Массовое «цветение» этого вида наблюдалось в конце лета по всей акватории озера.

Зоопланктонное сообщество озера Плещеево по большинству показателей также соответствует мезотрофному типу. Однако расчеты по фаунистическому индексу трофности А.Х. Мяэметса[6] указывают на эвтрофный статус водоема. В 2017 году среднее значение коэффициента трофности в открытой литоральной зоне составило 1.88, что характеризует ее как эвтрофную, а отдельные участки — как гипертрофные. Анализ таких показателей, как соотношение биомассы Cyclopoida к биомассе Calanoida (BCycl/BCal) и отношение биомассы зоопланктона к биомассе фитопланктона (Bz/Bph), подтверждает усиление процессов эвтрофирования, что связано с увеличением доли всеядных копепод.

Многолетние данные по бентосу указывают на принадлежность литорали и сублиторали озера к β-мезосапробной зоне, а профундали — к α-мезосапробной. В 2013–2016 годах по шкале трофности С.П. Китаева[7] и данным биомассы макробентоса озеро соответствует α-мезотрофному типу. В 2017 году 71% видов бентоса литорали являлись индикаторами β-мезосапробной зоны, что подтверждает стабильность этой характеристики.

Отмечается, что притоки оз. Плещеево преимущественно питаются талыми водами во время весеннего половодья и имеют низкий меженный уровень. Они являются постоянным источником биогенных и органических веществ. Наибольшие концентрации минеральных форм азота и фосфора наблюдаются в периоды высокой воды, когда происходит активный смыв органики с водосборной площади, что приводит к повышенному содержанию взвешенных веществ как в притоках, так и в озере.

В озере Плещеево отмечается явление придонной гипоксии в периоды летней и зимней стагнации, что фиксируется с первой половины XX века. С 2014 по 2017 год летняя придонная гипоксия проявляется ежегодно, а высота анаэробного слоя достигает 10 м. В

[6] Мяэметс А. Х. Изменения зоопланктона // Антропогенное воздействие на малые озера. Л.: Наука, 1980. С. 54–64.
[7] Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.

2015 году наблюдались повышенная температура и гипоксия гиполимниона, что способствует ускорению эвтрофикации. Кратковременные похолодания и ветровое перемешивание оказывают большее влияние на развитие придонной гипоксии, чем высокая средняя температура воздуха в течение вегетационного сезона. Дополнительным фактором риска является возможное попадание «поровой» воды в гиполимнион при гомотермии и сильных ветрах, что может привести к повышению уровня трофии. Глобальное потепление, сопровождающееся частой сменой циклонов и антициклонов с сильными ветрами, а также «размытием» переходных периодов между сезонами, усиливает риск эвтрофикации. Заросли макрофитов в литоральной зоне и микрофитобентос в зоне заплеска играют важную буферную роль, максимально утилизируя поступающие с водосбора биогены. Рекреационная нагрузка, а также поступление биогенов с водосбора, включая сточные воды и поверхностный сток, являются основными факторами, влияющими на динамику биогенных элементов в озере.

2.2 Gloeotrichia echinulata: особенности вида и вспышка цветения в озере Плещеево

Gloeotrichia echinulata — колониальная цианобактерия, относящаяся к порядку Nostocales и семейству *Rivulariaceae*, которая характеризуется нитчатой формой, способностью к фиксации азота и образованию покоящихся стадий, известных как акинеты [18]. В отличие от большинства видов *Gloeotrichia*, обитающих в прибрежной зоне и прикрепленных к субстратам, *G. echinulata* является единственным истинно планктонным видом, содержащим газовые вакуоли, что обеспечивает ей плавучесть и делает важным компонентом планктона в озерах по всему миру [19,20]. Жизненный цикл *G. echinulata* включает как пелагическую, так и бентосную фазы [18] (рис. 1).

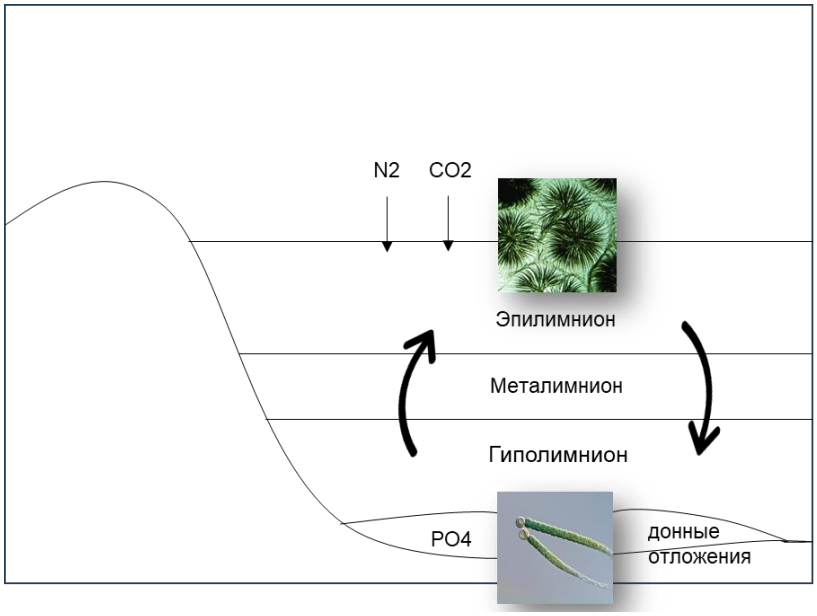


Рис. 1. Схематическое представление жизненного цикла *G. Echinulata*

Fig. 1. Schematic representation of the life cycle *G. Echinulata*

Акинеты, образующиеся пелагическими колониями, оседают на дно озера и перезимовывают в осадках, а весной они прорастают и развиваются на поверхности осадка

перед тем, как формируют газовые вакуоли и мигрируют в водную толщу [21]. Одной из наиболее значимых экологических особенностей *G. echinulata* является ее уникальная стратегия поглощения и переноса фосфора (P)[8] . В период роста на поверхности осадка проростки *G. echinulata* активно поглощают избыточное количество фосфора из богатой этим элементом поровой воды донных отложений. Запасной фосфор может составлять около 45% от общего содержания фосфора в покоящихся колониях, достигая 8,5 мкг P на мг сухой массы или 81 нг P на колонию[9]. Этот внутренний запас фосфора затем используется колониями во время их роста в пелагической зоне, поскольку эффективность поглощения питательных веществ непосредственно из водной толщи у них низкая. Кроме того, *G. echinulata* способна к фиксации атмосферного азота, что является еще одним важным источником питательных веществ, который может стать доступным для других фитопланктонных организмов в водной толще [21].

G. echinulata давно известна как доминирующий компонент фитопланктонного сообщества в эвтрофных озерах, часто образуя массовые цветения летом. Однако в последние десятилетия наблюдается увеличение численности *G. echinulata* и образование цветений в олиготрофных и мезотрофных озерах северо-востока США и Канады [19]. Это явление является необычным для систем с низким содержанием питательных веществ. Исследования показали, что *G. echinulata* широко распространена в низкопитательных озерах северо-востока США, присутствуя в водной толще в 27 из 37 обследованных озер [21]. Хотя плотность колоний обычно низкая (менее 5 колоний на литр), иногда она может достигать уровней, достаточных для образования поверхностной пены (до 250 колоний на литр в обследованных озерах, и до 5000 колоний на литр в литоральной зоне озера Эркен из-за ветрового скопления) [20]. Пик численности и рекрутмента *G. echinulata* в озере Санапи (олиготрофное озеро) наблюдался в конце августа, что отличается от более ранних пиков, характерных для эвтрофных систем. Рекрутмент колоний происходит преимущественно с мелководных участков (глубина 1–2 м) как в олиготрофных, так и в эвтрофных озерах, с ограниченным рекрутментом с больших глубин (>5 м) из-за недостатка света. Вклад рекрутмента из донных отложений в общую численность пелагической популяции *G. echinulata* в озере Санапи составляет 20–45%, что соответствует диапазону, наблюдаемому в эвтрофных озерах (3–50%), и значительно выше, чем для большинства других видов фитопланктона [19]. Наличие фосфора в донных отложениях, вероятно, стимулирует прорастание акинет и последующий рекрутмент, что подтверждается полевыми наблюдениями и лабораторными экспериментами.

[8] Istvanovics V., Pettersson M., Rodrigo D, Pierson J. *Gloeotrichia echinulata*, a colonial cyanobacterium with a unique phosphorus uptake and life strategy // Journal of Plankton Research. 1993. V. 15. P. 531–552.
[9] Pettersson K., Herlitz E., Istvánovics V. The role of *Gloeotrichia echinulata* in the transfer of phosphorus from sediments to water in Lake Erken // Springer Netherlands, Dordrecht. 1993. ISBN 978-94-011-1598-8. S. 123–129.

Кроме того, *G. echinulata* производит микроцистин-LR (MC-LR), хотя и в низких концентрациях [22]. Исследования показали, что MC-LR обнаруживается во всех образцах *G. echinulata*, хотя его концентрации значительно варьируются между озерами. Несмотря на то, что текущие концентрации MC-LR в водной толще, обусловленные *G. echinulata*, как правило, значительно ниже норм, рекомендованных Всемирной организацией здравоохранения для питьевой воды, увеличение плотности *G. echinulata* до уровня массового цветения может привести к концентрациям, способным оказывать негативное воздействие на водные организмы и представлять риск для здоровья человека, вызывая, например, раздражение кожи у купающихся [21].



Рис.2а. Колонии *G. Echinulata* можно наблюдать в пробах воды невооруженным глазом. Гидробиологическое обследование озера Плещеево в экспедиции, июль 2024

Fig.2a. Colonies of G. Echinulata can be observed in water samples with the naked eye. Hydrobiological examination of Lake Pleshcheyevo in expedition, July 2024

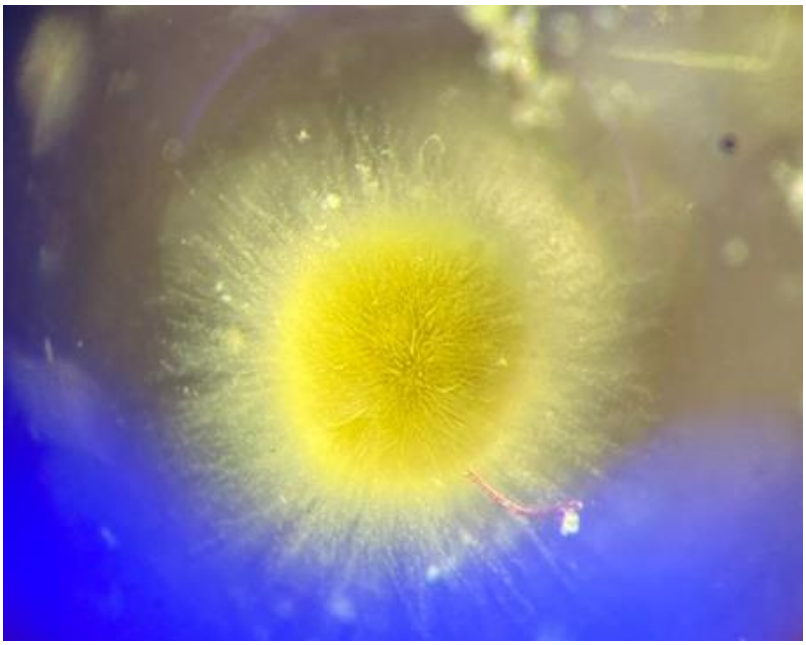


Рис. 2б. Колония *G. echinulata*, отобранная в процессе гидробиологического обследования озера в ходе экспедиции, июль 2024. Микроскоп МБС-9, увеличение 90х.

Fig. 2b. Colony of *G. echinulata*, selected during the hydrobiological survey of the lake during the expedition, July 2024

С 2017 года в озере Плещеево ежегодно наблюдается цветение воды, вызванное цианобактериями *Gloeotrichia echinulata*, что вызывает особую тревогу в связи с нарастающей биогенной нагрузкой и гипоксией (рис. 2а и 2б).

Ранее это явление не отмечалось. Кроме того, а августе 2023 г. в Администрацию ФГБУ «Национальный парк «Плещево озеро» поступило обращение о том, что на р. Вёкса наблюдается замор рыбы. Поскольку озеро с 1988 года является источником открытого водозабора для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения города Переславль-Залесский, качество воды и возможная токсичность продуктов жизнедеятельности цианобактерий вызывает серьезную обеспокоенность.

В работе [23] с использованием методов молекулярной биологии (ПЦР с универсальными праймерами HEP и mcyAC) было показано, что в ДНК, выделенной из колоний *G. echinulata* в озере Плещеево, не обнаружились гены, ответственные за синтез микроцистинов. В то же время в планктонной ДНК был обнаружен ген биосинтеза *mcyE*, принадлежащий видам *Microcystis* и *Dolichospermum*. Авторы отмечают, что случаи отравления животных и людей при купании в водоеме или при употреблении воды из него в период цветения вероятнее связаны с воздействием метаболитов других цианобактерий, поэтому вопрос о токсичности *G. echinulata* остается спорным.

Исследования показывают, что многие представители фитопланктона, включая некоторые цианобактерии, реагируют на повышенную доступность питательных веществ, обусловленную фиксацией азота *Gloeotrichia* и переносом фосфора из донных отложений. В эксперименте с мезокосмами было замечено, что нитчатые цианобактерии *Anabaena* и *Oscillatoria* увеличивали биомассу сразу после добавления *G. echinulata*. *Gloeotrichia* может выделять биоактивные вторичные метаболиты или антибактериальные/противогрибковые соединения, которые способствуют росту фитопланктона [24]. Таким образом, общие данные показывают, что *Gloeotrichia* действует как вид, способный изменять структуру и стабильность сообщества фитопланктона, в том числе способствуя росту других цианобактерий.

3 Результаты и обсуждение

Результаты анализа экологического состояния озера Плещеево свидетельствуют о его переходном положении между мезотрофным и эвтрофным типами. Хотя значения хлорофилла «а», биомассы фитопланктона и зоопланктона в последние годы соответствуют мезотрофии, наблюдаются признаки нарастающего эвтрофирования: устойчивое проявление гипоксии, рост доли всеядных копепод и увеличение фаунистического индекса трофности. Особенно тревожным является зафиксированное с 2017 года массовое развитие колониальной цианобактерии *Gloeotrichia echinulata*, ранее не наблюдавшейся. Это свидетельствует о качественном изменении фитопланктонного сообщества и возможной перестройке всей водной экосистемы.

Причины появления *G. echinulata* именно в 2017 году, по-видимому, многофакторны и представляют собой результат взаимодействия абиотических и биотических факторов. Во-первых, важным условием стал высокий уровень воды в литоральной зоне,

наблюдавшийся в 2017 году. Продолжительное стояние воды на мелководьях создало благоприятные условия для прорастания акинет *Gloeotrichia* в донных отложениях, с последующей миграцией колоний в толщу воды. Это особенно важно с учётом двойной жизненной стратегии этого вида, включающей бентосную и пелагическую фазы. Во-вторых, озеро Плещеево демонстрирует признаки нарастающего эвтрофирования, подтверждённые многолетними исследованиями ИБВВ РАН. Увеличение внешнего и внутреннего поступления биогенных веществ, особенно фосфора — лимитирующего элемента для пресных водоёмов, — создаёт питательную среду для цианобактерий. *G. echinulata* способна аккумулировать фосфор из поровой воды в донных отложениях и использовать его в пелагической фазе, тем самым увеличивая внутреннюю нагрузку на озеро и усиливая круговорот биогенов, включая передачу азота и фосфора другим компонентам фитопланктона.

Важным контекстом является и глобальное изменение климата, проявляющееся в изменении температурного и гидрологического режима. Интересно, что 2017 год оказался наиболее холодным за период 2004–2017 гг. Несмотря на то, что массовые цветения цианобактерий обычно ассоциируются с потеплением, понижение температуры могло изменить устойчивость термоклина, способствовать стабилизации стратификации и усилить гипоксические процессы. Это, в свою очередь, приводит к более активному высвобождению фосфора из донных отложений.

Дополнительную роль сыграли гидрологические особенности года: весной притоки озера принесли большое количество взвешенного материала и биогенов, что особенно заметно при высоких водах. Кроме того, в структуре биологической фильтрации могли произойти изменения. Заросли макрофитов, играющие буферную роль в утилизации биогенов, в 2017 году, возможно, испытали нагрузку или сокращение площади, что могло снизить их эффективность. Ослабление этой функции ведёт к усилению воздействия поступающих биогенов на пелагическое сообщество.

Важно отметить, что *G. echinulata* может играть активную роль в модификации экосистемы. Помимо поглощения и переноса фосфора, она способна фиксировать атмосферный азот, выделять биоактивные вещества, изменяющие структуру фитопланктонного сообщества, и стимулировать рост других цианобактерий. В экспериментах было показано, что её присутствие увеличивает биомассу других водорослей и усложняет сеть взаимодействий в фитопланктоне. Несмотря на потенциальную токсичность *G. echinulata*, в частности синтез микроцистина-LR, молекулярно-генетические исследования показали отсутствие соответствующих генов у её популяций в Плещеевом озере. Тем не менее, в планктонной ДНК были обнаружены гены токсичности других цианобактерий (*Microcystis*, *Dolichospermum*), что делает актуальным мониторинг токсичности водоема в целом, особенно в периоды цветения.

4 Выводы

Таким образом, массовое цветение *Gloeotrichia echinulata* в 2017 году можно рассматривать как следствие комплексного воздействия: высокого уровня воды, изменения климата, усиления трофии, поступления биогенов и, возможно, ослабления буферных механизмов. Возникновение этого феномена может служить индикатором сдвига экосистемы озера в сторону эвтрофного состояния.

Разложение массы бурно развившихся сине-зеленых водорослей сопровождается рядом опасных явлений: дефицитом кислорода, выделением токсинов, бактериальным загрязнением, образованием ароматических веществ. Вода, насыщенная продуктами метаболизма водорослей, аллергенна, токсична. Все это свидетельствует о недопустимости использования в питьевых целях воды из мест скопления водорослей и водоемов, подверженных сильному цветению, поскольку токсическое вещество водорослей не обезвреживается системами обычной водоочистки и может попадать в водопроводную сеть.

Массовое развитие водорослей в водоеме значительно затрудняет рекреационное использование водного источника, а также является причиной помех в техническом водоснабжении. С учётом важности Плещеева озера как источника питьевой воды и объекта в составе особо охраняемой природной территории, выявленные изменения требуют постоянного мониторинга, оценки экологических рисков и разработки стратегии адаптивного управления качеством водной среды.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» (МИИГАиК). Публикация осуществлена при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общест во» https://rgo.ru/.

Автор выражает признательность наставникам проекта к.б.н. Кузнецовой Г.Д., доценту кафедры космического мониторинга и экологии МИИГАиК, и д.г.н. Браткову В.В., зав. кафедрой географии МИИГАиК, а также научному сотруднику лаборатории гидрологии и гидрохимии Института биологии внутренних вод им. Папанина РАН Цветкову А.И.

Библиография

1. Khan F., Ansari A. Eutrophication: An Ecological Vision // The Botanical Review. 2005. V. 71. P. 449–482.

2. Solomon A. Eutrophication: Causes, Consequences, Physical, Chemical and Biological Techniques for Mitigation Strategies // Environmental Challenges. 2023. V.12. 100733.

3. Schindler D. Recent advances in the understanding and management of eutrophication // Limnology and Oceanography. 2006. V. 51. P. 356–363.

4. Ho H., Park C., Yoo K., Kim N., Hwang S. Survival and Development Strategies of Cyanobacteria through Akinete Formation and Germination in the Life Cycle // Water. 2024. V. 16(5). 770.

5. Svirčev Z., Drobac D., Tokodi N., Mijović B., Codd G.A., Meriluoto J. Toxicology of microcystins with reference to cases of human intoxications and epidemiological investigations of exposures to cyanobacteria and cyanotoxins // Archives of Toxicology. 2017. V. 91. I. 2. P. 621–650.

6. Svirčev Z., Lali D., Bojadžija Savić G., Tokodi N., Drobac Backović D., Chen L., Meriluoto J., Codd G. Global geographical and historical overview of cyanotoxin distribution and cyanobacterial poisonings // Archives of Toxicology. 2019. V. 93. P. 2429–2481.

7. Zhang S., Du X., Liu H., Losiewic M., Chen X., Ma Y., Wang R., Tian Z., Shi L., Guo H. The latest advances in the reproductive toxicity of microcystin-LR // Environ. Res. 2021. V. 192. 110254.

8. Lone Y., Koiri R., Bhide M. An overview of the toxic effect of potential human carcinogen Microcystin-LR on testis // Toxicol. Rep. 2015. V. 2. P. 289–296.

9. Mbukwa E., Msagati T., Mamba B. Quantitative Variations of Intracellular Microcystin-LR, -RR and -YR in Samples Collected from Four Locations in Hartbeespoort Dam in North West Province (South Africa) During the 2010/2011 Summer Season // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2012. V. 9. P. 3484–3505.

10. Волошко Л.Н., Плющ А.В., Титова Н.Н. Токсины цианобактерий (Cyanobacteria, Cyanophyta) // Альгология. 2008. Т. 18. № 1. С. 3–20.

11. Kutyavina T, Ashikhmina T. Distribution of toxigenic cyanobacteria in water bodies of the East European Plain // Theoretical and Applied Ecology. 2024. P. 154–164.

12. Coffin, M., Courtenay S., Pater C., Heuvel M.R.v.D. An empirical model using dissolved oxygen as an indicator for eutrophication at a regional scale // Mar. Pollut. Bull. 2018. V. 133. P. 261–270

13. Rosales D., Ellett A., Jacobs J., Ozbay G., Parveen S. Pitula, J. Investigating the Relationship between nitrate, total dissolved nitrogen, and phosphate with abundance of pathogenic Vibrios and harmful algal blooms in Rehoboth Bay, Delaware // Appl. Environ. Microbiol. 2022. V. 88. e00356-22.

14. Agasild H., Panksep K., Tõnno I., Blank K., Kõiv T., Freiberg R., Laugaste R., Jones R., Nõges P., Noges T. Role of potentially toxic cyanobacteria in crustacean zooplankton diet in a eutrophic lake // Harmful Algae. 2019. V. 89. 101688.

15. Shen X., Ke C.-Q., Duan Z., Cai Y., Li H., Xiao Y. Satellite observations reveal widespread color variations in global lakes since the 1980s // Water Resources Research. 2025. V. 61. e2023WR036926.

16. Huerta Buitrago B., Rodríguez Mozaz S., Nannou C., Nakis L., Ruhí i Vidal A., Acuña i Salazar V., Sabater S., Barceló i Cullerés D. Determination of a broad spectrum of pharmaceuticals and endocrine disruptors in biofilm from a waste water treatment plant-impacted river // Sci. Total Environ. 2016. V. 540. P. 241–249.

17. Hupfer M., Lewandowski J. Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments – a long-lasting paradigm in limnology // Int. Rev. Hydrobiol. 2008. V. 93. P. 415–432.

18. Karlsson-Elfgren I. Benthic growth of *Gloeotrichia echinulata* Cyanobacteria // Hydrobiologia. 2003. V.506–509. P. 189–193.

19. Carey C., Weathers K., Cottingham K. *Gloeotrichia echinulata* blooms in an oligotrophic lake: Helpful insights from eutrophic lakes // Journal of Plankton Research. 2008. V. 30. P. 893–904.

20. Eiler A., Olsson J., Bertilsson S. Diurnal variations in the auto- and heterotrophic activity of cyanobacterial phycospheres (*Gloeotrichia echinulata*) and the identity of attached bacteria // Freshwater Biology. 2006. V. 51(2). P. 298-311

21. Carey C., Ewing H., Cottingham K., Weathers K., Thomas Q., Haney J. Occurrence and toxicity of the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* in low-nutrient lakes in the northeastern United States // Aquatic Ecology. 2012. V. 46.

22. Carey C., Haney J., Cottingham K. First report of microcystin-LR in the cyanobacterium Gloeotrichia echinulata // Environ. Toxicol. 2007. V. 22. P. 337–339.

23. Sidelev S.I., Korneva L.G., Chernova E.N. First Data on Cyanotoxins and Genes of Their Biosynthesis in the Phytoplankton of the Mesotrophic Lake Pleshcheyevo (Russia) during the Bloom Formation of Cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* // Inland Water Biol. 2024. V. 17. P. 1161–1171.

24. Carey C., Brown B., Cottingham K. The cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* increases the stability and network complexity of phytoplankton communities // Ecosphere. 2017. V. 8. e01830.

Blooming of Waterbodies: Ecological Aspects and Distribution of Gloeotrichia Echinulata in Lake Pleshcheyevo

Darya A. Tarasova[1] *
[1] Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia
*tarasowadarja@gmail.com

Keywords phytoplankton, eutrophication, cyanobacteria, cyanotoxins, gloeotrichia

Abstract Lake Pleshcheyevo is a significant natural site serving as a drinking water source, recreational area, and protected territory. In recent years, signs of increasing eutrophication have been observed, and since 2017, a proliferation of the colonial cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata*—previously unrecorded in this ecosystem—has occurred. This article examines potential causes for the emergence of this species, including life cycle characteristics and feeding strategies of *G. echinulata*. Particular focus is given to its role as an ecosystem-modifying species and its potential toxicity. Analysis suggests that the *G. echinulata* outbreak serves as an indicator of profound ecological shifts within the lake. The necessity for continuous monitoring, environmental risk assessment, and development of an adaptive management strategy is emphasized.

Acknowledgements

The author expresses his gratitude to the mentors of the project, PhD Kuznetsova G.D., Associate Professor of the Department of Space Monitoring and Ecology of the MIIGAiK, and PhD Bratkov V.V., Head of the Department of Geography of the MIIGAiK, as well as a researcher at the Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry of the Institute Biology of Inland Waters named after Papanina RAS to Tsvetkov A.I.

The research was carried out within the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage". The publication was carried out with the financial support of the Russian Geo-Geographical Society, an All-Russian public organization https://rgo.ru

УДК 551.583.1/ UDC 551.58

Климатическая характеристика водосборной площади озера Плещеево и тенденции изменений в условиях современного потепления




Э.З. Нурмухамедова*, Г.Д. Кузнецова[2]**

[1] Уфимский университет науки технологий (УУНиТ), Уфа, Россия

[2] Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

*lmira18.01.02@gmail.com, **srdc@miigaik.ru

Ключевые слова озеро Плещеево, экологический мониторинг, изменение климата, аномалия температуры, режим осадков, термический режим, опасные гидрометеорологические явления, цианобактерии, *Gloeotrichia echinulata*

Аннотация В работе представлены результаты анализа многолетних климатических характеристик водосборного бассейна озера Плещеево за период с 1960 по 2023 гг. на основе данных метеорологической станции Переславль-Залесский. Проведена оценка динамики среднегодовых и сезонных температур воздуха, количества атмосферных осадков, а также частоты и интенсивности опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ). Установлено, что современный климатический период (2000-2023 гг.) характеризуется достоверным повышением среднегодовой температуры воздуха на 1.2°С по сравнению с базовым периодом 1960-2000 гг. Выявлена тенденция к увеличению годовой суммы осадков. Проанализированы случаи экстремальных климатических явлений. Особое внимание уделено видам-индикаторам, таким как цианобактерия *Gloeotrichia echinulata*. Установлено, что наблюдаемые климатические тренды (потепление, особенно в зимне-весенний период, увеличение интенсивности ливневых осадков) создают идеальные условия для интенсивного цветения воды, в т.ч. с доминированием *G. echinulata*. Полученные результаты согласуются с общерегиональными проявлениями глобального потепления на Европейской территории России и имеют важное прикладное значение для разработки мер адаптации и охраны экосистем особо охраняемых природных территорий.

1 Введение

Антропогенное изменение климата является одной из наиболее актуальных проблем современности, оказывающей влияние на все регионы мира, включая территорию России [1]. Проблеме изменения климата сопутствует целый комплекс междисциплинарных проблем, охватывающих экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития территории. Особый интерес представляют исследования климата в районах расположения особо охраняемых природных территорий (ООПТ), где изменения термического и гидрологического режимов могут оказывать прямое воздействие на состояние уязвимых экосистем и биоразнообразие [2]. Известно, что глобальное потепление влияет на изменение водного и климатического режима [3]. Особую значимость приобретает увеличение частоты и интенсивности опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ), что представляет определенные риски как для экосистем, так и для населения и инфраструктуры1 [4];

Водосборная площадь озера Плещеево, являющегося ключевым охраняемым объектом Национального парка «Плещеево озеро», испытывает комплексное влияние как глобальных климатических трендов, так и локальных факторов, связанных с расположенными на берегах озера городом Переславлем-Залесским и окрестными поселениями и рекреационной нагрузкой[2]. Озера в целом являются высокочувствительными индикаторами глобальных изменений, интегрируя воздействия как климатических сдвигов, так и антропогенной нагрузки. Одним из наиболее наглядных и проблемных последствий является цветение воды, вызываемое массовым развитием цианобактерий (сине-зеленых водорослей). Среди них *Gloeotrichia echinulata* — колониальная, гетероцистная, планктонная цианобактерия, получившая в последние десятилетия широкое распространение в озерах северной умеренной зоны [5], включая водоемы Европейской части и Северо-Запада России. В озере Плещеево массовый рост этой водоросли наблюдается ежегодно с 2017 г., и вызывает ряд неблагоприятных для экосистемы озера последствий.

Развитие G. echinulata тесно связано с климатическими параметрами:

- Температура: оптимальный рост наблюдается при температурах воды выше 20°C.
- Стратификация: образует гетероцисты и фиксирует атмосферный азот (N_2) в условиях дефицита доступного азота в воде, что часто усиливается при стабильной стратификации водоема [6].
- Свет: требует высоких уровней освещенности.

[1] РД 52.04.563-2002. Инструкция о порядке предоставления информации об опасных гидрометеорологических явлениях. – М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2002.
[2] Экосистема озера Плещеево / Под ред. Н.В. Буторин, В.Л. Скляренко. – Л.: Наука, 1989. – 264 с. ISBN: 5-02-026582-9

— *Жизненный цикл:* часть жизненного цикла проходит в донных осадках (в виде акинет), где перезимовывает. Прогрев мелководий напрямую влияет на скорость "прорастания" и всплытия колоний.

Таким образом, изменения климата, выражающиеся в потеплении воды, увеличении продолжительности безледоставного периода и стабильности летней стратификации, являются прямым драйвером успешности G. echinulata.

Целью данной работы является оценка современных климатических тенденций на водосборной площади озера Плещеево на основе анализа многолетних метеорологических данных и их сопоставление с региональными и глобальными трендами, а также оценка корреляции между наблюдаемыми климатическими изменениями и риском перестройки его экосистемы в сторону усиления цветения цианобактерий.

2 Материалы и методы

В данной работе были использованы данные многолетних наблюдений (1960-2023 гг.) холодного периода (ХП) и теплого периода (ТП) на метеорологической станции Переславль-Залесский, которая расположена в г. Переславль-Залесский на приподнятом плато на юго-восточном берегу Плещеева озера примерно в 2 км от берега (56°42′51′′с.ш.38°49′30′′в.д.). Станция входит в сеть Центрального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (рис. 1).

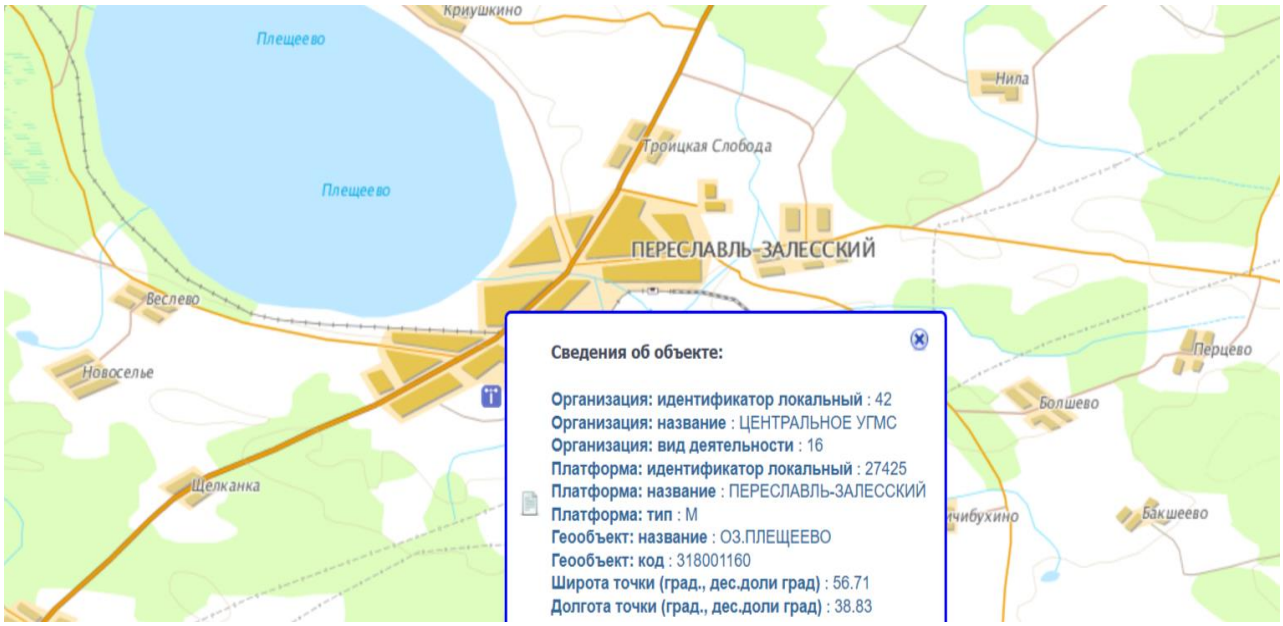


Рис. 1. Расположение метеостанции (МС) в г. Переславль-Залесский по отношению к озеру Плещеево

Fig. 1. Location of the weather station (WS) in Pereslavl-Zalessky in relation to Lake Pleshcheyevo

3 Результаты и обсуждение

3.1 Температурный режим

Бассейн Плещеева озера находится в зоне достаточного увлажнения, в подзоне смешанных лесов[3]. Климат региона умеренно-континентальный с холодной зимой и умеренно теплым летом. Существенное влияние на погоду и климат района оказывает западный перенос воздушных масс, сопровождающийся обычно активной циклонической деятельностью, значительными осадками, частыми положительными аномалиями температуры воздуха зимой и отрицательными летом[4].

По данным метеостанции среднегодовая температура воздуха в г. Переславль-Залесском составляет 4,5 °С. Наиболее холодный месяц в году – январь (-9.2 °С), самый теплый – июль (18.1 °С). Устойчивый переход температуры воздуха через 0°С приходится на первые числа апреля. Осеннее понижение температуры воздуха происходит медленнее, чем ее весеннее повышение. Устойчивый переход температуры воздуха от положительных значений к отрицательным приходится в среднем на третью декаду октября. Распределение среднемноголетней температуры по месяцам представлено в таблице 1.

Таблица 1. Среднемноголетняя температура воздуха (°С) по данным метеостанции г. Переславль-Залесский (период 1960–2023 гг.)
Table 1. Average annual air temperature (°C) according to the Pereslavl-Zalessky meteorological station (1960-2023)

Мес.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
T, °C	-9,2	-8,2	-2,9	5,0	12,1	16,0	18,1	16,2	10,6	4,5	-2,0	-6,6	4,5

Анализ межгодовой изменчивости температуры воздуха за период 1960-2023 гг. по данным метеостанции «Пересалвль-Залесский» выявил четкую тенденцию к потеплению (рис. 2). Так, среднегодовая температура воздуха в период 2000-2023 гг. составила 5.2 °С, что на 1.2 °С выше, чем за предыдущий сорокалетний период (1960-2000 гг.). Повышение средних месячных температур наблюдается для всех месяцев, за исключением июня, с наибольшим ростом в зимние и весенние месяцы (на 1.0-2.2 °С). Также наблюдается тенденция увеличения числа аномальных отклонений среднегодовой температуры от среднемноголетней в положительную сторону, в особенности последние 20 лет. Значения рассеиваются относительно центра на 1,17°С (рис.3). Полученные результаты полностью согласуются с выводом Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) о том, что темпы потепления на территории суши значительно превышают

[3] Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Верхне-Волжский район. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973.
[4] Экосистема озера Плещеево / Под ред. Н.В. Буторин, В.Л. Скляренко. – Л.: Наука, 1989. – 264 с. ISBN: 5-02-026582-9

среднемировые показатели [1], а также с исследованиями, констатирующими усиление потепления в зимне-весенний сезон на Европейской территории России [2].

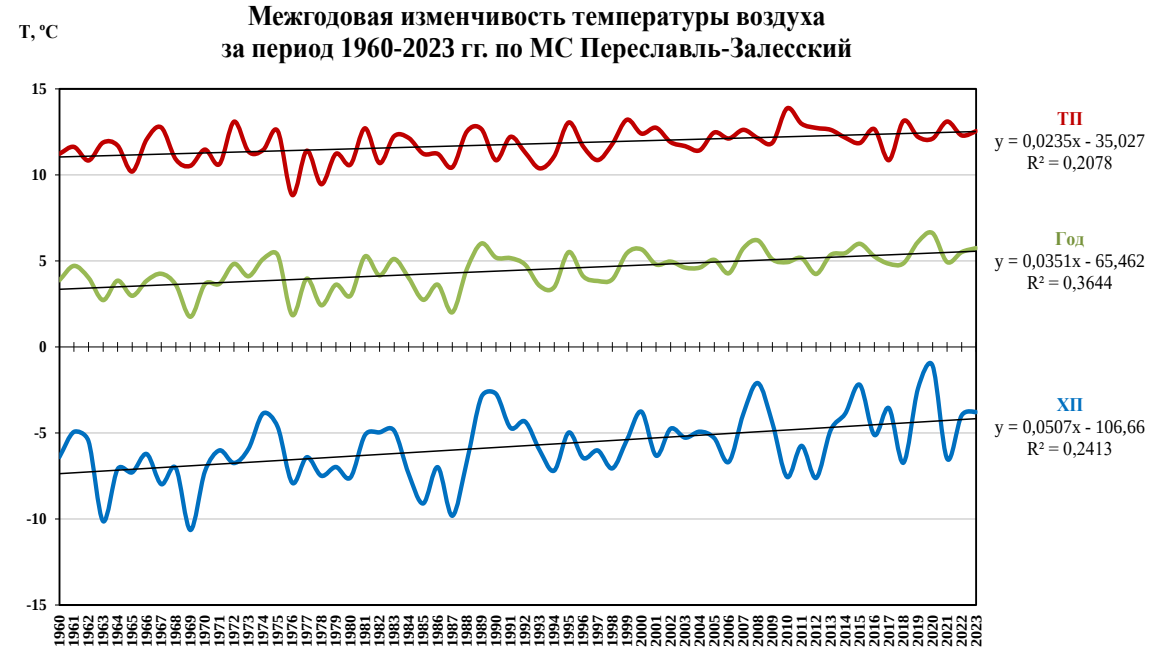


Рис. 2. Межгодовая изменчивость температуры воздуха за период 1969-2023 гг. по данным МС Переславль-Залесский

Fig 2. Interannual variability of air temperature for the period 1969-2023 according to the data of the WS Pereslavl-Zalessky

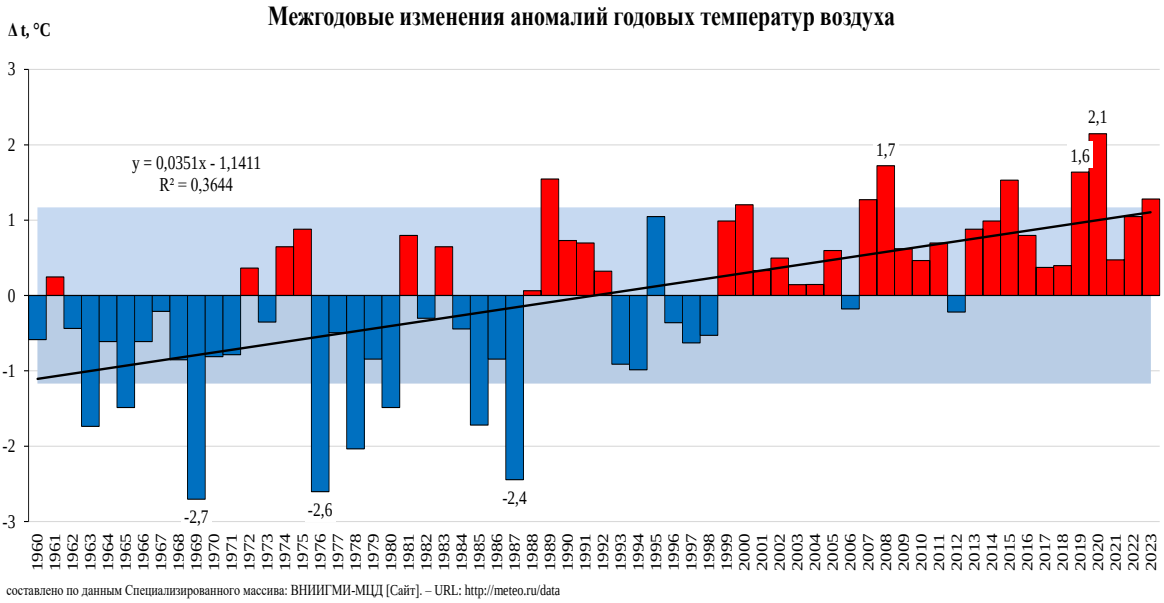


Рис. 3. Межгодовые изменения аномалий годовых температур воздуха по данным МС Переславль-Залесский за период 1960-2023 гг.

Fig. 3. Interannual changes in annual air temperature anomalies according to the WS Pereslavl-Zalessky for the period 1960-2023.

3.2 Режим осадков

Среднегодовая сумма осадков за период 1991-2020 гг. составила 621 мм, при этом около 70% из них выпадает в теплый период года с ярко выраженным максимумом в июле (81 мм). Минимум осадков наблюдается в феврале-апреле (таблица 2, рис.4).

Таблица 2. Среднемноголетнее количество осадков (мм) по данным МС Переславль-Залесский за период 1960–2023 гг.

Table 2. Average annual precipitation (mm) according to the WS Pereslavl-Zalessky for the period 1960-2023.

Мес.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
R, мм	38	30	29	37	51	69	81	67	59	58	48	44	611

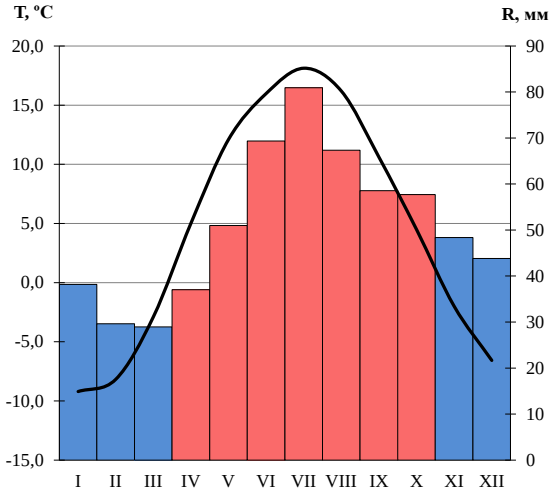


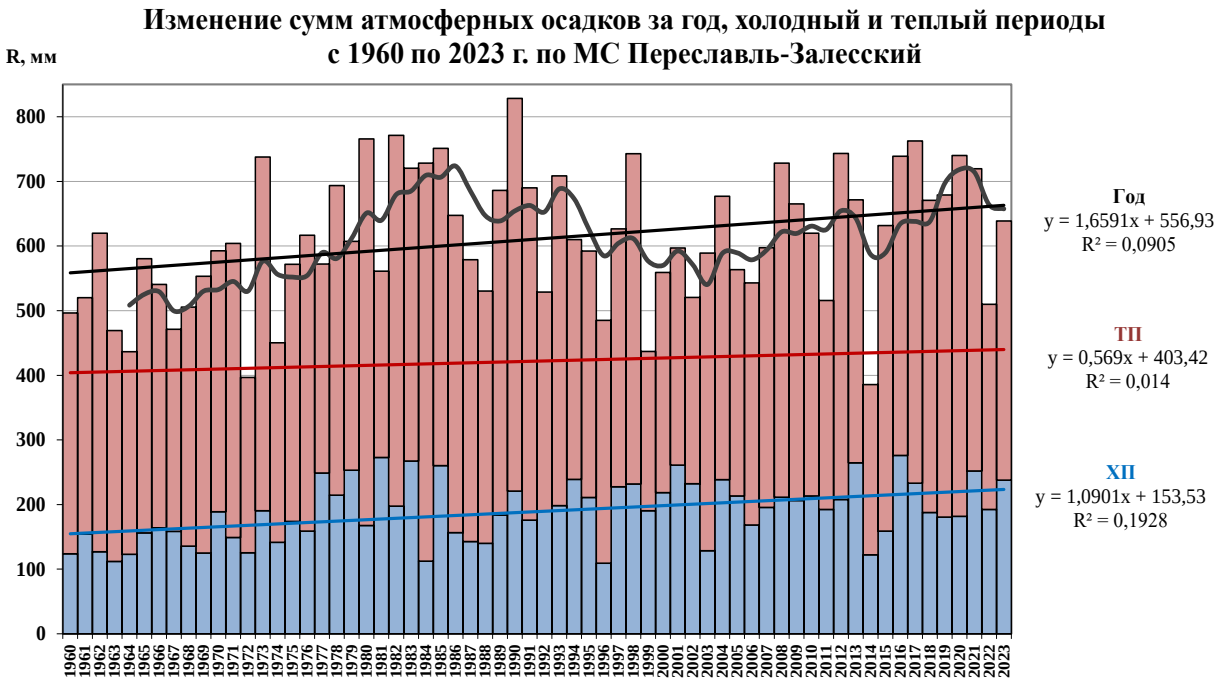
Рис. 4. Распределение по месяцам среднемноголетнего количества осадков (мм) и температуры (t°C) воздуха по данным МС г. Переславль-Залесский за период 1966 – 2023 гг.

Fig. 4. Monthly distribution of the average multiannual precipitation (mm) and air temperature according to the WS Pereslavl-Zalessky for the period 1966-2023

Анализ сумм атмосферных осадков за год, за холодный (ХП) и теплый (ТП) периоды с 1960 по 2023 гг. по данным МС Переславль-Залесский показал тенденцию к увеличению количества выпадающих осадков как в годовом разрезе, так и отдельно в холодный и теплый периоды (рис. 5).

Аналогичную тенденцию отклонения от нормы в сторону увеличения количества осадков показывают межгодовые изменения аномалий годовых атмосферных осадков (рис.6).

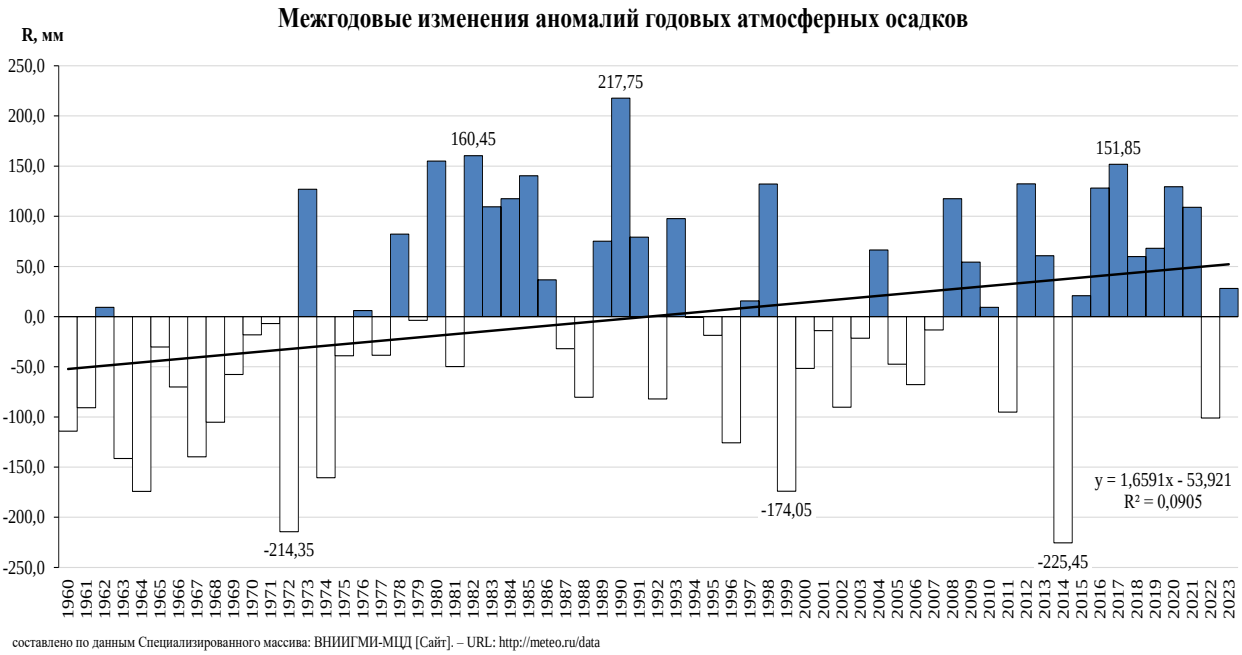
Это соответствует общему тренду на увеличение увлажненности в средних широтах Северного полушария в условиях потепления климата, связанному с ростом влагоемкости атмосферы [1]. Однако увеличение количества осадков не всегда компенсирует возросшее испарение из-за более высоких температур, что может приводить к увеличению контрастности условий увлажнения.



составлено по данным Специализированного массива: ВНИИГМИ-МЦД [Сайт]. – URL: http://meteo.ru/data

Рис. 5. Изменение сумм атмосферных осадков за год, за холодный (ХП) и за теплый (ТП) периоды с 1960 по 2023 гг. по данным МС Переславль-Залесский

Fig. 5. Change in precipitation amounts for the year, for the cold (CP) and warm (WP) periods from 1960 to 2023 according to the WS Pereslavl-Zalessky



составлено по данным Специализированного массива: ВНИИГМИ-МЦД [Сайт]. – URL: http://meteo.ru/data

Рис.6. Межгодовые изменения аномальных годовых атмосферных осадков за период 1960-2023 гг. по данным МС Переславль-Залесский

Fig 6. Interannual changes in abnormal annual precipitation for the period 1960-2023 according to the WS Pereslavl-Zalessky

3.3 Опасные гидрометеорологические явления

На территории за период наблюдений были зафиксированы случаи опасных явлений, соответствующих критериям РД 52.04.563-2002[5]:

Очень сильный дождь - значительные жидкие или смешанные осадки (дождь, ливневый дождь, дождь со снегом, мокрый снег) с количеством выпавших осадков не менее 50 мм (в селеопасных горных районах – 30 мм.) за период времени не более 12 ч.

Сильная жара - случаи в период с мая по август со значениями максимальной температуры воздуха не менее +35°С в течение более 5 суток. В большинстве случаев сильная жара достигает критерия опасного явления при продолжительных (более 5–7 суток) периодах антициклональной погоды. В таких ситуациях аномально высокая температура воздуха наблюдается на фоне дефицита осадков. Обычными последствиями продолжительных и интенсивных летних волн тепла являются развитие почвенной и атмосферной засухи, неконтролируемое распространение лесных пожаров, маловодье на реках.

Аномально-жаркая погода - периоды с апреля по сентябрь, в течение 5 дней и более которых значение среднесуточной температуры воздуха выше климатической нормы на 7°С и более.

Описанные явления наблюдались на территории водосборного бассейна озера Плещеево согласно данным архива ВНИИГМИ-МЦД.

Очень сильный дождь (≥50 мм за 12 часов) наблюдался 4 раза, последние случаи зарегистрированы в 2015 и 2016 гг., что может указывать на возрастание интенсивности ливневых осадков в последнее десятилетие.

Не только в Переславле-Залесском – во многих субъектах ЦФО России отмечаются тенденции к увеличению интенсивности осадков, в частности, к возрастанию суточного количества жидких осадков. При этом, отмечают климатологи, одновременно растет и число дней без осадков в теплый период года [2].

Дата	Продолжительность, час	Показатель, мм
11.07.1984	6 ч	74,0 мм
22.06.1985	6 ч	58,8 мм
27.07.2015	3 ч	65,0 мм
18.08.2016	3 ч	55,0 мм

Таблица 3. Случаи очень сильного дождя по данным МС Переславль-Залесский за период 1980-2023 гг.
Table 3. Cases of very heavy rain according to the WS Pereslavl-Zalessky for the period 1980-2023.

[5] РД 52.04.563-2002. Инструкция о порядке предоставления информации об опасных гидрометеорологических явлениях. – М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2002.

Случаи *сильной жары* (максимальная температура ≥ +35°С в течение ≥5 суток) согласно данным ВНИИГМИ-МЦД, за период наблюдений не зарегистрированы, однако единичные дни с экстремально высокой температурой (> +35°С) отмечались в 1981 и 2010.

Аномально-жаркая погода (периоды ≥5 дней с среднесуточной температурой выше климатической нормы на 7°С и более) анализировалась для месяцев с апреля по сентябрь. Всего выявлено 26 таких случаев.

Период	Продолжитель-ность, дни	Диапазон температур, t°C
21-25.05.1963	5	20,2-21,5
01-07.09.1963	7	17,8-20,9
01-05.09.1968	5	18,8-20,8
08-12.08.1972	5	24,4-25,8
19-24.08.1972	6	23,3-26,5
02-06.09.1977	5	18,9-20,0
24-31.05.1979	8	19,0-22,5
23-30.04.1980	8	12,5-17,0
23-28.04.1983	6	12,0-15,7
24-29.04.1986	6	12,2-18,8
18-26.04.1995	9	12,9-18,0
25-31.05.1995	7	20,6-30,5
01-06.09.1995	6	17,4-21,2
10-16.06.1998	7	22,8-26,8
17-21.04.1999	5	12,0-15,0
23-30.04.1999	8	12,5-17,3
17-27.04.2000	11	13,7-18,1
22-30.04.2001	9	11,8-18,8
26-31.05.2007	6	19,6-25,5
23-30.07.2010	8	24,7-27,5
01-12.08.2010	12	23,4-26,7
21-29.04.2012	9	12,6-17,3
25-30.06.2013	6	22,7-24,3
19-26.05.2014	8	19,7-22,3
27-31.05.2015	5	19,5-21,4
20-27.06.2021	8	22,8-27,1

Таблица 4. Случаи аномально-жаркой погоды на территории Переславля-Залесского по данным архива ВНИИГМИ-МЦД за период 1960-2023гг.

Table 4. Cases of abnormally hot weather in the territory of Pereslavl-Zalessky according to the VNIIGMI-MCD archive for the period 1960-2023.

В целом наибольшая повторяемость аномально-жарких периодов наблюдается в апреле (35% всех случаев) и мае (23%), что связано с увеличением частоты и продолжительности блокирующих антициклонов в весенний сезон [7]. Наибольшая продолжительность (11-12 суток) зафиксирована в апреле 2000 г. и августе 2010 г.

Кроме представленных выше ОЯ, в последнее тридцатилетие на территории ЦФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, а также с высокой степенью пожароопасности, в том числе – на территории осушенных водно-болотных угодий) [2]. Как указывается во Втором оценочном докладе Росгидромета [8] и других источниках, аридизация климата и рост повторяемости экстремальных погодных явлений представляют сегодня основные направления климатических изменений на территории ЦФО России.

Собрав представленные выше данные по ОЯ на один график, можно видеть, что за период с 1991 по 2023 гг. участились случаи аномально жаркой погоды. Общая продолжительность (в днях) аномально-жаркой погоды за период 1960-1990 гг. составила 47 дней, в то время как общая продолжительность за период 1991-2021 гг. составила уже 126 дней, что превышает показатель предшествующего тридцатилетия почти в 3 раза. Что касается 2017 года, который характеризуется первым массовым появлением в озере Плещеево *G. echinulata*, то в 2017 году не было зафиксировано каких-то аномальных климатических явлений, однако в течение нескольких предшествующих лет наблюдались периоды аномально-жаркой погоды (2010, 2012, 2013, 2014, 2015). После этого в 2015 и 2016 годах - выпадение аномально больших осадков в виде дождей в течение 3 часов, что составило примерно 14-15% от количества осадков в ТП в эти годы.

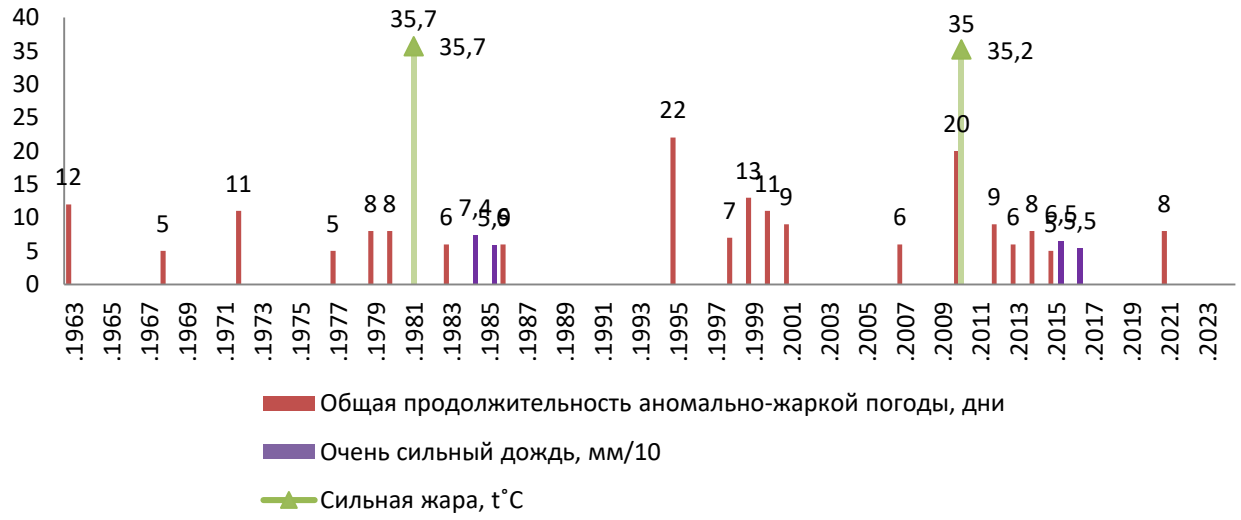


Рис. 7. Опасные гидрометеорологические явления на территории водосборного бассейна озера Плещеево («аномально-жаркая погода», «очень сильный дождь», «сильная жара») по архивным данным за период 1960-2023 гг.

Fig. 7. Dangerous hydrometeorological phenomena in the drainage basin of Lake Pleshcheyevo ("abnormally hot weather", "very heavy rain", "intense heat") according to archival data for the period 1960-2023.

В целом на основе данных по МС Переславль-Залесский Залесский можно выделить ключевые для озера тренды:

1) Прямое влияние климатических трендов на условия в озере:

— Увеличение среднегодовой температуры воздуха на 1.2°C, возможно, будет приводить к более раннему сходу льда.

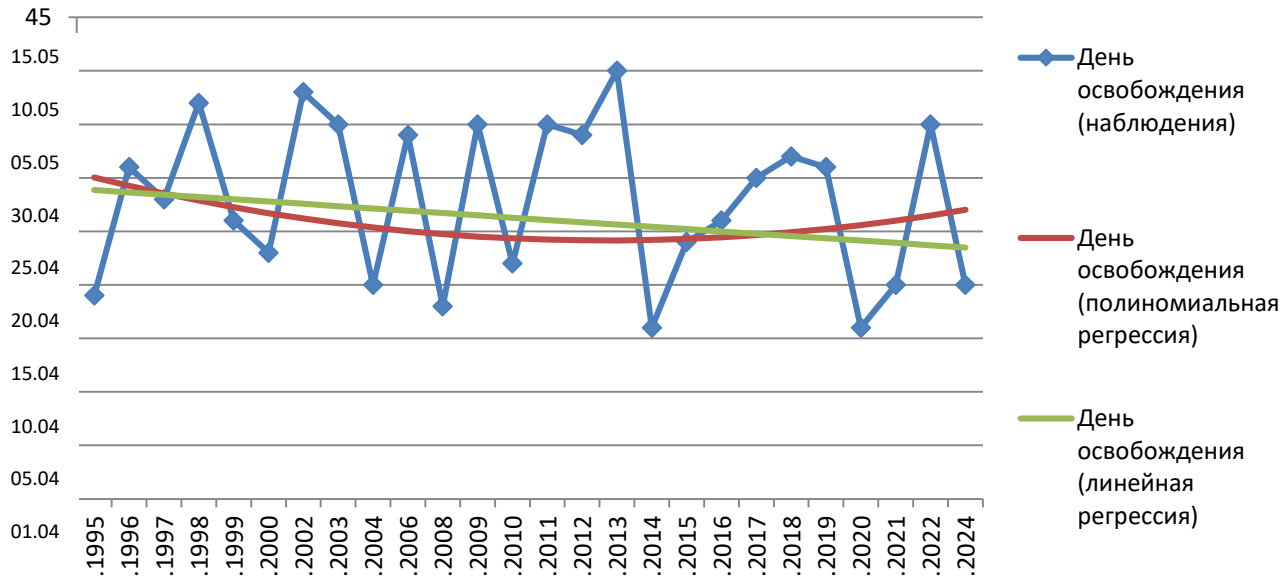


Рис. 8. Полное освобождение озера от льда. По оси X – год, по оси Y – день полного освобождения озера от льда (дд.мм).
Fig. 8. Complete liberation of the lake from ice. On the X-axis is the year and on the Y-axis is the date when the lake was completely clear of ice (dd.mm).

На рисунке 8 можно видеть, что за период наблюдений с 1995 по 2024 год (за исключением 2001, 2005, 2007 и 2023 гг) самое позднее освобождение от льда от озера наблюдалось в 2013 году (10 мая), а самое ранее – в 2014 и 2020 гг. (16 апреля). Следует отметить, что в 2015 и 2016 гг. наблюдалось также ранее освобождение озера от льда, однако это нельзя назвать устойчивым трендом, поскольку линейная регрессия ($Y = 29.07 - 0.214 \times X$) показывает скорость изменения -0.214 дня/год, но коэффициент детерминации $R^2 = 0.037$ указывает на слабую линейную зависимость, а высокий p-value (0.341 > 0.05) свидетельствует о статистической незначимости тренда. Полиномиальная регрессия ($Y = 30.874 - 0.847X + 0.019X^2$; $R^2 = 0.142$) позволила получить более точный тренд с минимумом в период 2013-2016 гг. и последующим смещением к более поздним датам. Следует отметить, что наблюдаемый минимум коррелирует с аномально-жаркой погодой в мае 2014 и 2015 гг.. Однако для более надежного выявления климатического тренда необходимы непрерывные ряды данных за более длительный период и учет дополнительных климатических факторов.

— Увеличение количества осадков, особенно в виде интенсивных ливней (учащение случаев "очень сильного дождя"), приводит к усилению эрозии почв и выносу биогенных элементов (фосфора и азота) с водосборной площади.

Фосфор (P) является лимитирующим элементом для первичной продукции в большинстве пресных озер. Его дополнительная нагрузка напрямую стимулирует эвтрофикацию. Климатические изменения не просто суммируются, а действуют синергически: более

теплые весны и лета способствуют формированию более ранней, стабильной и продолжительной стратификации. Это создает условия для дефицита кислорода в гиполимнионе и, как следствие, мобилизации фосфора из донных отложений. Высвобожденный фосфор поступает в эпилимнион при осеннем перемешивании, подпитывая рост водорослей на следующий сезон.

2) Корреляция с развитием Gloeotrichia echinulata

G. echinulata является видом-индикатором, чья «успешность» напрямую коррелирует с выявленными трендами:

- Раннее освобождение от льда и прогревание мелководных заливов стимулирует быстрое "прорастание" акинет из донных отложений и массовое всплытие колоний в пелагиальную зону.
- Увеличение периода с благоприятными температурами позволяет *G. echinulata* завершить несколько циклов развития, нарастив высокую биомассу.
- Увеличение внешней (со стоками) и внутренней (со дна) фосфорной нагрузки обеспечивает необходимый ресурс для роста.
- Стабильная стратификация благоприятствует поддержанию популяции в хорошо прогретом эпилимнионе и стимулирует процесс азотфиксации.

Согласно прогнозам, изменение климата окажет в целом благоприятное воздействие на цианобактерии по сравнению с другим фитопланктоном в пресноводных экосистемах, поскольку физиология цианобактерий может обеспечить конкурентное преимущество [9].

Полученные для озера Плещеево данные о потеплении и увеличении числа экстремальных осадков полностью соответствуют сценарию, благоприятствующему такому биологическому вторжению.

3.4 Ожидаемые изменения климата и направления адаптации

К середине XXI века по отношению к концу XX века на всей территории ЦФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 1,5-3 °С. Зимой возможен более сильный рост температуры воздуха на 3,5-4,5 °С. Суммы осадков летом могут уменьшиться на 5-15%. Увеличение сумм осадков в зимний сезон может составить 10-20% [2].

В качестве мер по адаптации экосистем к изменениям климата эксперты считают целесообразным снижение антропогенной нагрузки, усиление профилактики пожаров и восстановление водного режима осушенных торфяников [2]. В этой связи актуально звучит предложение по рекультивации водно-болотных угодий Берендеева болота, откуда берет начало основной приток озера Плещеево – река Трубеж, и которое было осушено в результате интенсификации торфоразработок в середине XX в. Актуальными являются мероприятия Дорожной карты по сохранению и реабилитации озера Плещеева[6], направленные, в том числе, на снижение диффузионного загрязнения водных объектов.

[6] План мероприятий («Дорожная карта») по сохранению и реабилитации озера Плещеево в Ярославской области, № ДП-П11-15389, от 29 апреля 2025 г.

Наблюдаемые изменения режима атмосферных осадков (рост интенсивности осадков на фоне увеличения продолжительности периодов с дефицитом осадков) потребует также модернизации системы водоотведения, а также принятия мер, направленных на повышение эффективности водопотребления.

4 Выводы

На водосборной площади озера Плещеево за последние десятилетия сформировались устойчивые климатические тренды, характерные для большей части Европейской территории России: достоверное повышение среднегодовой температуры воздуха (на 1.2 °C за последние ~60 лет) и увеличение годовой суммы осадков.

Потепление носит всесезонный характер, но наиболее выражено в зимне-весенний период. Увеличение осадков наиболее заметно в теплый период года.

Выявлена тенденция к увеличению повторяемости и продолжительности экстремальных климатических явлений, в частности, аномально-жарких периодов в весенние месяцы (апрель-май) и случаев очень сильных дождей.

Gloeotrichia echinulata, как вид-индикатор, особенно чувствителен к выявленным трендам. Ее появление и устойчивое присутствие в планктоне озера Плещеево можно рассматривать как интегральный биологический ответ экосистемы на климатические изменения.

Синергический эффект между климатом и антропогенной нагрузкой (например, поступлением биогенов с водосбора) многократно усиливает риск перехода озера в новое качественное состояние с частыми, продолжительными и токсичными цветениями воды.

Полученные результаты свидетельствуют о значительных изменениях климатического режима на территории национального парка «Плещеево озеро», что требует учета данных тенденций при разработке мер по адаптации управления природоохранной и рекреационной деятельностью, а также для оценки долгосрочных рисков для экосистемы озера.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» https://rgo.ru/.

Авторы статьи выражают благодарность Национальному парку «Плещеево озеро» за предоставленные архивные данные наблюдений, а также к.г.н. Камаловой Р. Г., доценту Уфимского университета науки и технологий, за советы при планировании исследования и рекомендации методики расчетов при оформлении статьи.

Библиография

1. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp.

2. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Е. М. Акентьева, А. М. Алейникова, Г. В. Алексеев [и др.]. – Санкт-Петербург : Издательство «Наукоемкие технологии», 2022. – 676 с. – ISBN 978-5-907618-13-8. – EDN JNIXIE.

3. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 20–32.

4. Шерстюков, Б. Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата / Б. Г. Шерстюков; Б. Г. Шерстюков. – Обнинск. : ГУ ВНИИГМИ - МЦД, 2008. – 246 с. – EDN QKIDLB.

5. Carey, C. C., Ewing, H. A., Cottingham, K. L., Weathers, K. C., Thomas, R. Q., & Haney, J. F. (2012). Gloeotrichia echinulata blooms in an oligotrophic lake: helpful insights from eutrophic lakes. Journal of Plankton Research, 34(10), 917-927.

6. Cottingham, K. L., H. A. Ewing, M. L. Greer, C. C. Carey, and K. C. Weathers. 2015. Cyanobacteria as biological drivers of lake nitrogen and phosphorus cycling. Ecosphere 6(1):1. http://dx.doi.org/10.1890/ES14-00174.1

7. Бардин, М. Ю. Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария / М. Ю. Бардин, Т. В. Платова, О. Ф. Самохина // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – Т. 3. – С. 32-58. – DOI 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58. – EDN FEJBIJ.

8. Росгидромет, 2014: Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Катцов В. М., Семенов С. М., ред. – М.: Росгидромет. – 1009с.

9. Cottingham, Kathryn & Weathers, Kathleen & Ewing, Holly & Greer, Meredith & Carey, Cayelan. (2020). Predicting the effects of climate change on freshwater cyanobacterial blooms requires consideration of the complete cyanobacterial life cycle. Journal of Plankton Research. 43. 10.1093/plankt/fbaa059.

The Climatic Characteristics of the Pleshcheevo Lake Catchment Area and the Trends of Change in the Conditions during Modern Warming

Elmira Z. Nurmukhamedova[1]*, Galina D. Kuznetsova[2]**
[1] Ufa University of Science and Technology (UUNiT), Ufa, Russia
[2] Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia
*lmira18.01.02@gmail.com, **srdc@miigaik.ru

Key words Pleshcheyevo lake, environmental monitoring, climate change, temperature anomaly, precipitation regime, thermal regime, dangerous hydrometeorological phenomena, cyanobacteria, *Gloeotrichia echinulata*

Abstract The paper presents the results of a study on the long-term climate characteristics of the Pleshcheevo Lake drainage basin over the period from 1960 to 2023, based on data from the Pereslavl-Zalessky meteorological station. We have assessed the dynamics of average annual and seasonal temperatures, precipitation levels, as well as the frequency and intensity of hazardous hydrometeorological events (SES). It has been found that the current climate period (2000-2023) has seen a significant increase in average annual temperatures by 1.2 degrees Celsius compared to the baseline period of 1960-2000. There is also a trend towards increased annual precipitation. We have analyzed instances of extreme climate events. Special attention has been paid to indicator species like cyanobacterium Gloeotrichia echinulata. It has been established that the observed climate trends (warming, especially during the winter-spring period, and an increase in heavy rainfall intensity) create ideal conditions for intense algal blooms, including those dominated by G. echinulata. These findings are consistent with region-wide manifestations of global warming on the European territory of Russia, and they have great practical significance for the development of adaptation measures and protection of ecosystems in specially protected natural areas.

Acknowledgements

The research was carried out within the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage". The publication was carried out with the financial support of the Russian Geo-Geographical Society, an All-Russian public organization https://rgo.ru.

The authors of the article express their gratitude to the Pleshcheyevo Lake National Park for providing archival observation data, as well as to R. G. Kamalova, PhD, Associate Professor at the Ufa University of Science and Technology, for tips for planning research and recommendations of calculation methods for the design of the article.

УДК 528.88/ UDC 528.8

Дистанционный анализ температуры поверхности воды озера Плещеево





Е.Д. Лошкова[1]*, В.М. Морейдо[2]

1 Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия
2 Институт водных проблем РАН, Москва, Россия
* lok2710@gmail.com

Ключевые слова дистанционное зондирование, ДЗЗ, Landsat 8/9, температура поверхности воды, LST, озеро Плещеево, Google Earth Engine

Аннотация В статье представлены описание и результаты проверки алгоритма LST для водного объекта, а также анализ температуры поверхности озера Плещеево на основе данных снимков Landsat 8/9 за период 2014–2024 гг. по полученным данным. Для расчета температуры подстилающей поверхности (LST) применен алгоритм, включающий расчет яркостной температуры и ее последующую коррекцию с использованием индекса NDVI для учета излучательной способности водной поверхности. Обработка данных выполнена в облачной платформе Google Earth Engine (GEE). Для валидации спутниковых данных использованы точечные натурные измерения температуры воды, предоставленные национальным парком «Плещеево озеро». Для сопоставления разновременных данных построена модель случайного леса деревьев решений, связывающая температуру воды с метеопараметрами (температура воздуха и точка росы). Результаты исследования демонстрируют эффективность использования данных Landsat 8/9 и платформы GEE для оперативного мониторинга температуры поверхности воды. Методология может быть применена для других внутренних водоемов.

1 Введение

Существует множество нетривиальных задач, для решения которых используются данные дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ). Одной из них является анализ температуры водных объектов, в данном случае – температуры поверхностного слоя воды озера Плещеево. Динамика этого параметра определяет ряд других процессов и показателей, таких как содержание хлорофилла, мутность, динамика испарения, изменение климата и т.д. [1].

Однако измерения температуры воды, полученные в ходе натурных наблюдений, обычно имеют точечный характер и не дают полной картины распределения, поэтому использование данных ДЗ помогает анализировать динамику температуры в масштабах всего водоема.

Вопрос такого анализа особо остро стоит для озера Плещеево, в котором с 2017 г. отмечаются вспышки массового цветения цианобактерии глеотрихии щетинистой (*Gloeotrichia echinulata*). Жизненный цикл вида, помимо прочих факторов, сильно зависит от температуры воды в водоеме [2]. При прогреве воды до 19 градусов и более глеотрихии выходят из состояния покоя и, оставаясь в донных отложениях, начинают извлекать из них соединения фосфора и железа, накапливая их в себе [3]. После этого глеотрихии поднимаются в верхние слои воды и там начинают вегетировать, что приводит к вторичному загрязнению экосистемы биогенными элементами. Основной экологической проблемой является то, что при увеличении своей численности *Gloeotrichia echinulata* может влиять на численность популяции других видов цианобактерий, а также продуцирует гепатотоксин микроцистин-LR (MC-LR) [4, 5].

Таким образом, анализ температуры воды в озере Плещеево может служить важным методом оценки текущего состояния водоёма и защиты от катастрофического цветения.

В основном дистанционный анализ температуры основывается на исследовании данных длинноволнового инфракрасного диапазона (8–15 мкм), или, как его ещё называют, Thermal Infrared Radiation. Каналы, которые в нём снимают, называются Thermal bands, TIRS Bands или Thermal Infrared bands [6].

В плане доступности снимков в таких каналах широко известны спутники Landsat, Sentinel и MODIS, но из-за сложности данных алгоритм, применяемый в данном исследовании, может быть использован только для обработки данных Landsat 8/9 [7].

При этом важно понимать, что по данным Landsat не существует единого алгоритма расчёта температуры, так как нет единого метода атмосферной коррекции снимков и единого алгоритма учёта излучательной способности земной поверхности (коэффициента эмиссии) [8].

2 Материалы и методы

2.1 Объект исследования

Озеро Плещеево – одно из самых крупных озёр средней полосы России, расположено на юге Ярославской области рядом с городом Переславль-Залесским (рис. 1). Самый крупный приток – река Трубеж, вытекающая из Берендеевского болота. Из самого озера вытекает одна река – Векса. Местность вокруг холмистая, за исключением низменного северо-западного берега.

Среднемноголетний уровень в озере Плещеево - 137,31 м. Длина озера – 9,55 км, наибольшая ширина – 6,5 км, наибольшая глубина - 24,5 м, объем воды – 541 млн. куб. м. Отлогое побережье представляет собой песчаную равнину, сложенную озерным аллювием.

Центральная часть озера глубоководная. Наибольшие глубины отмечаются в северо-западной части водоема[1].

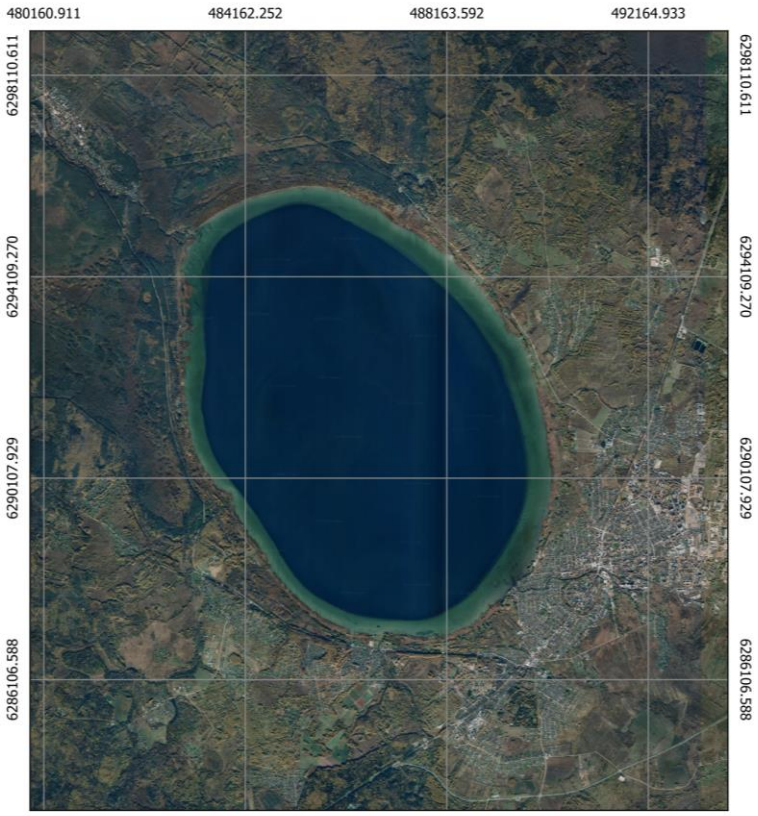


Рис. 1. Озеро Плещеево (WGS 84/ UTM zone 37N).

Fig. 1. Lake Pleshcheyevo (WGS 84/ UTM zone 37N).

Источник: составлено автором

2.2 Данные дистанционного зондирования

Данные ДЗ на территорию озера Плещеево в период с 2014 по 2024 гг. были получены из архивов данных спутников Landsat 8/9, доступ к которым можно получить через сайт Геологической службы США (USGS) [9]. Для расчёта температуры *подстилающей поверхности* (Land Surface Temperature – LST) использовались снимки в четвертом (RED, 0,64–0,67 мкм), пятом (NIR, 0,85–0,88 мкм) и десятом (TIRS, 10,60–11,19 мкм) каналах. Пространственное разрешение растровых данных: для 4 и 5 каналов – 30 м; для 10 канала – 100 м. [10]. Итоговое разрешение температурной карты: использованной для визуального осмотра – 100 м, использованной для получения статистических данных – 30 м. Для исследования использовались средние и медианные значения температуры водной поверхности.

2.3 Натурные данные температуры озера

В качестве натурных измерений использовались данные о температуре озера, полученные от национального парка «Плещеево озеро» (далее – национальный парк). Период измерений с 18.02.2014 по 15.10.2024, периодичность – раз в месяц с февраля

[1] Озеро Плещеево // Национальный парк «Плещеево озеро». – URL: https://www.plesheevo-lake.ru/o-parke/ozero-pleshcheevo/ (дата обращения: 04.08.2025).

по октябрь (часто отсутствовали измерения в апреле), точка измерения располагалась в мелководной части озера.

В данной работе для анализа температуры озера Плещеево был использован алгоритм LST, описанный в статье научно-исследовательского института наук о Земле и космосе Анатолийского университета [7].

2.4 Алгоритм LST

1. Расчет спектральной энергетической яркости (the top atmospheric spectral radiance) в ваттах/(квадратный метр ∗ стер ∗ мкм):

$$L\lambda = ML \times Qcal + AL \quad (1)$$

где *ML* — мультипликативный коэффициент масштабирования для 10 канала;

Qcal — значение пикселя 10 канала снимка;

AL — аддитивный коэффициент масштабирования для 10 канала.

2. Вычисление яркостной температуры (brightness temperature) в градусах Цельсия:

$$BT = \frac{K2}{\ln(\,(K1/L\lambda) + 1)\,)} - 273.15 \quad (2)$$

где K1, K2 – константы термического преобразования для 10 канала.

3. Коррекция на излучательную способность:

Излучение, фиксируемое съёмочной аппаратурой, искажается в зависимости от состояния поверхности и атмосферы. Разные способы учёта этих факторов рождают множество способов вычисления коэффициента эмиссии – его можно считать постоянной величиной, можно использовать NDVI или иные методы классификации земной поверхности.

В данной работе для коррекции коэффициента эмиссии использовался NDVI.

3.1. Расчёт нормализованного индекса вегетации (NDVI):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (3)$$

где NIR и RED представляют собой отражательную способность ближнего инфракрасного и красного диапазонов соответственно.

3.2. Расчёт доли растительного покрова:

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVIs}{NDVIv - NDVIs}\right)^2 \quad (4)$$

где NDVIs = 0.2 (значение NDVI для почвы)

NDVIv = 0.5 (значение NDVI для растительности)

3.3.Расчёт излучательной способности земной поверхности ε:

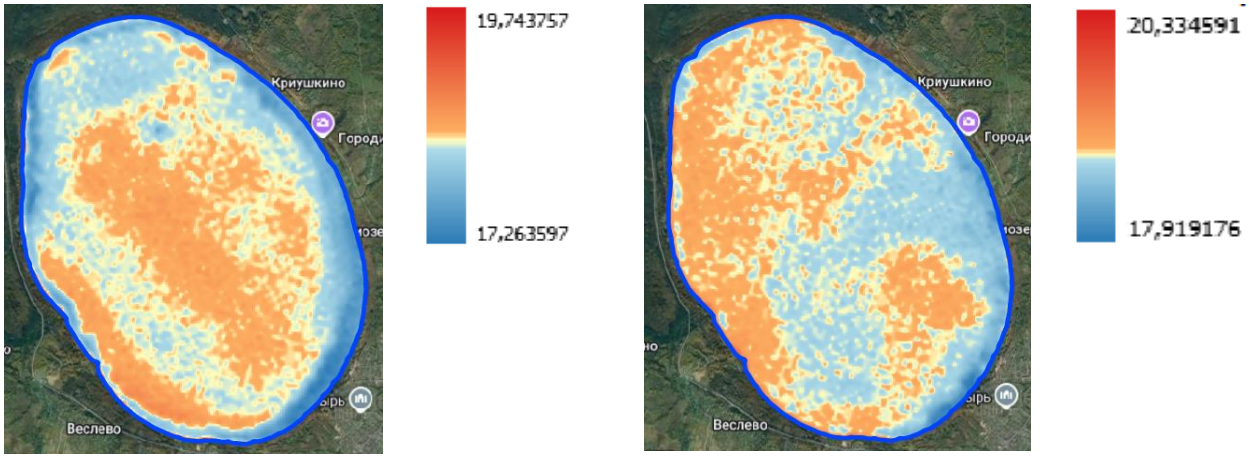
ε – коэффициент эмиссии, это характеристика материала, которая показывает, насколько эффективно он излучает тепло по сравнению с абсолютно черным телом при той же температуре (закон Планка). В данном контексте коэффициент эмиссии влияет на точность измерения температуры поверхности. Коэффициент эмиссии (ε) рассчитывался путем выведения его из доли растительности (Pv) с использованием следующего эмпирического уравнения [11]:

$$E = 0.004 * Pv + 0.986 \quad (5)$$

4. Расчёт температуры подстилающей поверхности (LST):

$$LST = \frac{BT}{\left(1 + \left(\lambda * \frac{BT}{\rho}\right) \times \ln(\varepsilon)\right)} \quad (6)$$

где BT – яркостная температура; λ — длина волны излученной радиации, среднее значение которой принято за 10,895 мкм; ρ – постоянная Больцмана, равная 14388 мкК.



а) б)

Рис. 2. – Результат работы алгоритма LST за: а) 16 августа 2024 г.; б) 17 сентября 2024 г.
Fig. 2. – The result of the LST algorithm for: a) 16th August 2024; б) 17th September 2024.
Источник: составлено автором

Чтобы провести анализ температуры озера в период с 2014 по 2024 гг., была использована облачная платформа Google Earth Engine (GEE).

В результате были получены данные о средней и медианной температуре поверхности озера в период с 12.07.2014 по 10.07.2025. Данные были отфильтрованы по облачности менее

31%, а также были удалены отрицательные результаты, вызванные большим попаданием процента облачности на территорию интереса. В итоге остались результаты с 44 снимков.

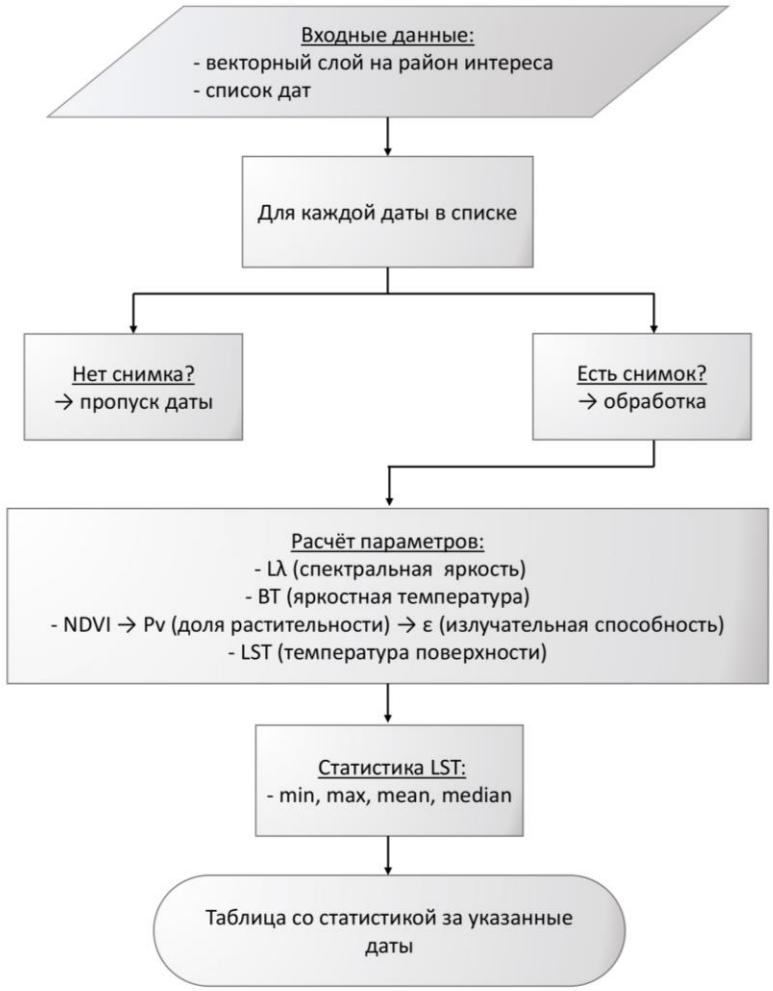


Рис. 3. – Схема работы кода в GEE

Fig. 3. – The code scheme in GEE

Источник: составлено автором

3 Проверка результатов

Так как дни натурных измерений не совпали с днями съёмки Landsat, чтобы восстановить температуру поверхности озера на даты полета была построена модель, основанная на линейной регрессии между температурой озера, полученной от национального парка, и температурой воздуха, а также температурой точки росы, полученными от метеостанции «Переславль» (время измерения 12 часов)[2].

[2] Архив погоды в Переславль-Залесском (Ярославская область, Россия) // Погода и климат. – 2025. – URL: http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=27425 (дата обращения: 23.07.2024).

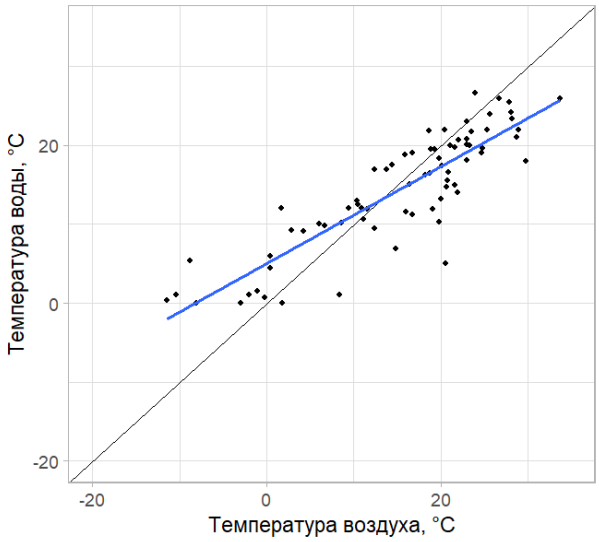


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности озера от температуры воздуха

Fig. 4. The dependence of lake surface temperature on air temperature

Источник: составлено автором

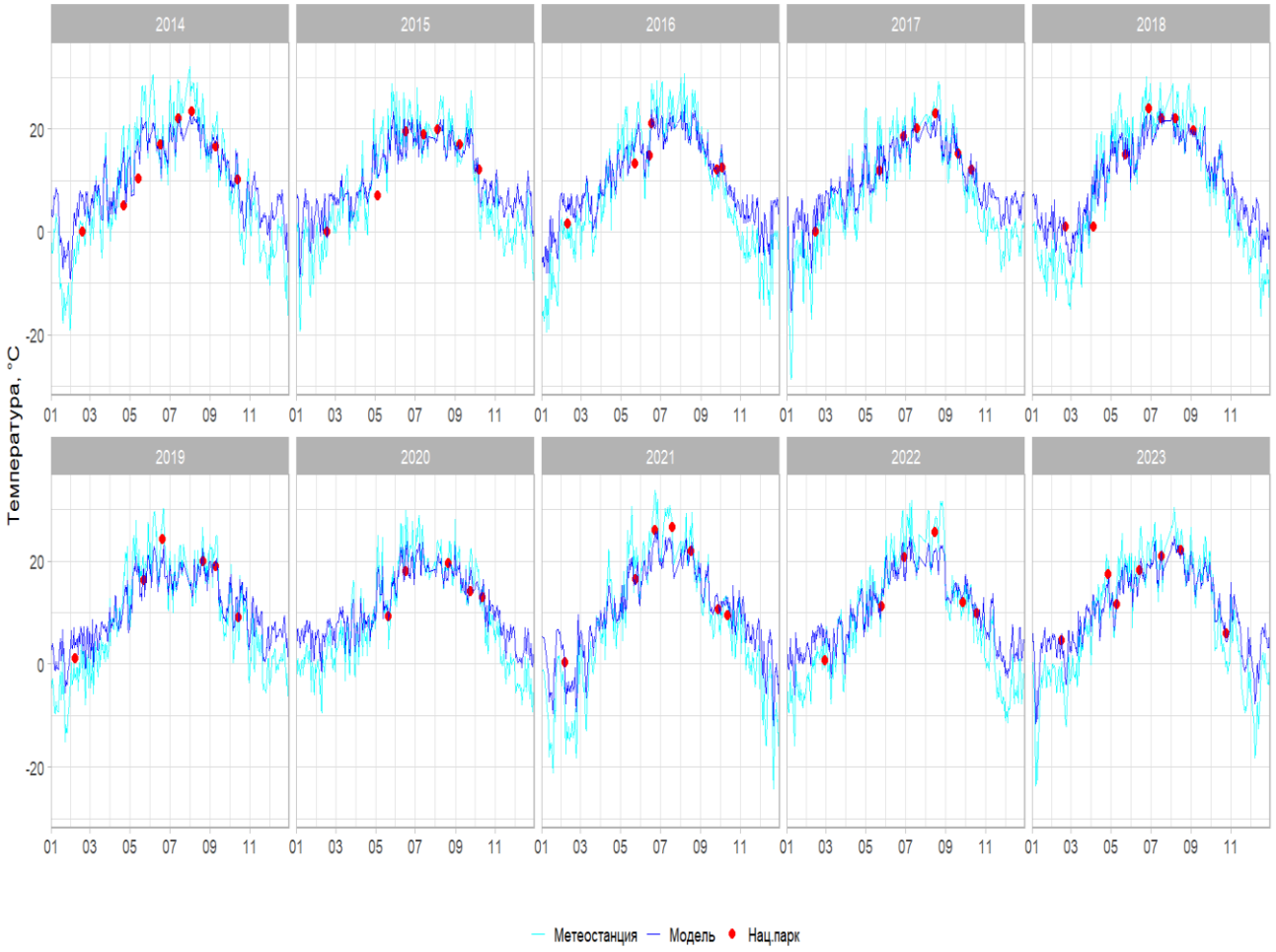


Рис. 5. Суточный ход температур воздуха и поверхности озера по данным измерений и моделирования.

Fig. 5. The daily course of air and lake surface temperatures according to measurements and modeling data.

При этом корреляция данных температуры поверхности озера, полученных от Национального парка, с температурой воздуха составила 0,871, а корреляция температуры

озера с температурой точки росы 0,835. Поэтому для улучшения точности модели была построена многомерная линейная регрессия, учитывающая и температуру воздуха, и температуру точки росы. Корреляция такой модели с температурой поверхности озера от национального парка составила 0,897. Средняя квадратичная ошибка (RMSE) модели = 3,30. Средняя абсолютная ошибка (MAE) модели = 2,51.

На каждую дату съемки Landsat было рассчитано медианное и среднее значение температуры воды на поверхности озера. Корреляция модели с медианной температурой составила 0,827, со средней – 0,84.

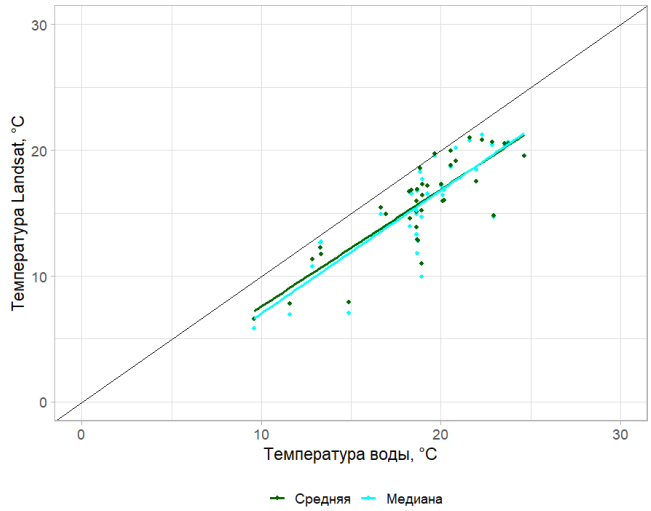


Рис. 6. Зависимость рассчитанных медианной и средней температуры поверхности озера со спутника Landsat от температуры поверхности озера модели.

Fig. 6. The dependence of the calculated median and average lake surface temperatures from the Landsat satellite on the lake surface temperature of the model.

Источник: составлено автором.

4 Заключение

Корреляция 0,84 между спутниковыми данными и моделью, основанной на натурных измерениях, подтвердила возможность использования данных Landsat 8/9 для мониторинга температуры водных объектов с учетом дополнительных корректировок.

Сравнение модели и рассчитанных данных показало, что средняя температура более приближена к реальной, чем медианная.

В результате анализа рассчитанных данных о температуре поверхности озера Плещеево стандартное отклонение составило 2,51 °C. Одна из причин разницы между измеренной температурой озера и LST в том, что мы сравниваем разные температуры (среднюю температуру поверхности воды и температуру на глубине 0,5 м под водой в определённой точке).

Из-за неравномерного распределения данных по годам (например, в 2014 году – 2 наблюдения, а в 2024 – 11) температуру, рассчитанную из данных Landsat, нельзя использовать для построения линии тренда. Но так как известна зависимость рассчитанных данных от натурных, то, построив линию тренда по значениям температуры, полученным от национального парка, можно сделать вывод, что среднегодовая температура озера увеличивается (рис. 7).

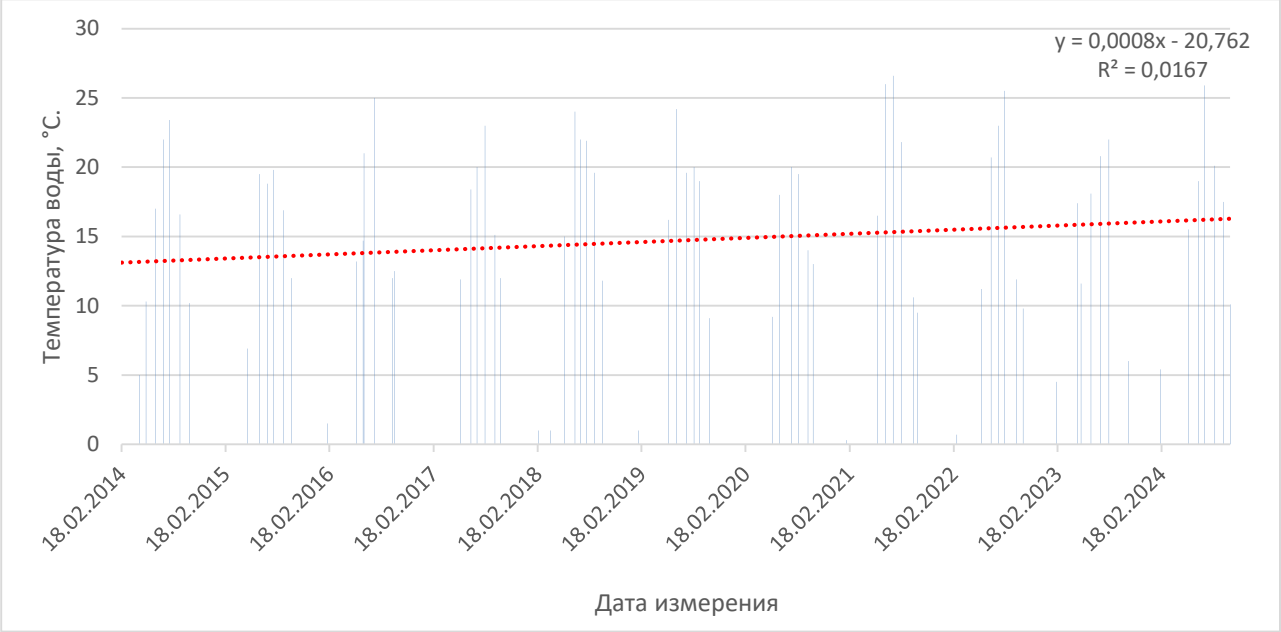


Рис. 7. Гистограмма зависимости измеренной национальным парком температуры озера от времени

Fig. 7. A histogram of the dependence of the lake temperature measured by the national park on time

Источник: составлено автором

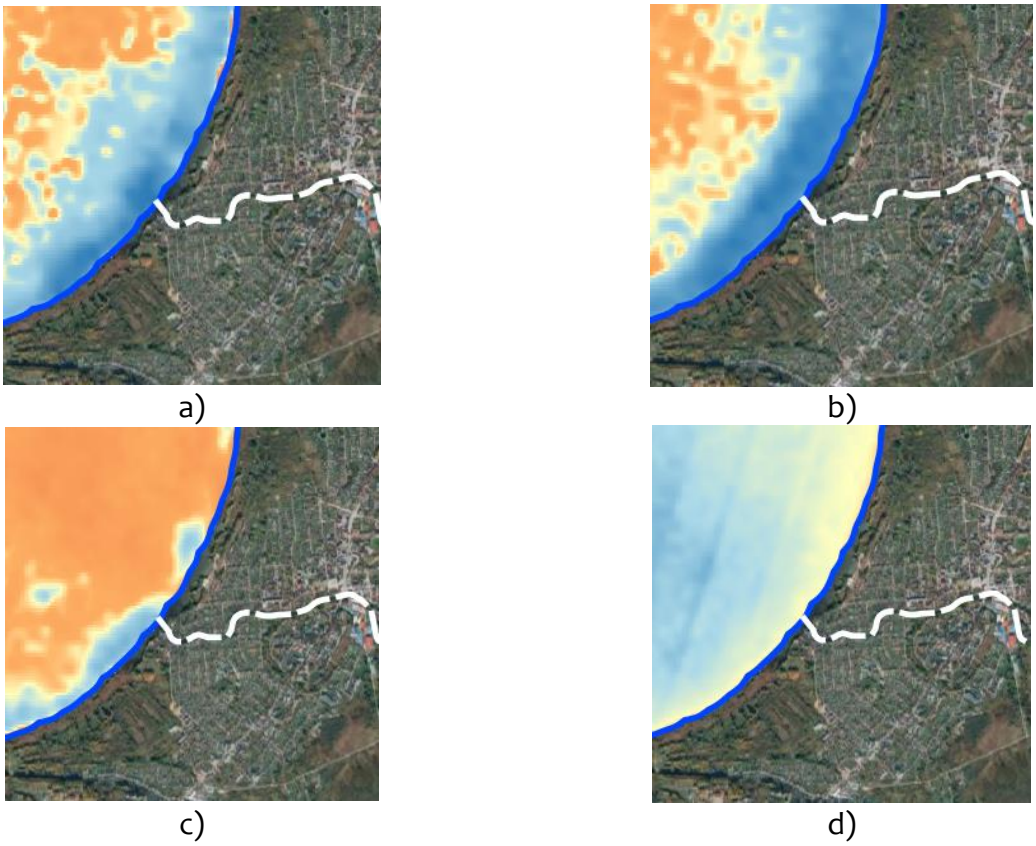


Рис. 8. Место впадения р. Трубеж в оз. Плещеево. Температурная карта за: a) 17 сентября 2024; b) 16 августа 2024; c) 7 июля 2024; d) 26 июня 2024.

Fig. 8. The place where the Trubezh River flows into the lake Pleshcheyevo. Temperature map for: a) 17 september 2024; b) 16 august 2024; c) 7 july 2024; d) 26 june 2024.

Визуальный осмотр температурных карт позволяет сделать вывод, что приток реки Трубеж на формирование температурного режима озера или не влияет, или влияет незначительно (рис. 8). Основной прогрев озера происходит за счёт поглощения солнечной радиации.

Благодарности

Данное исследование и публикация его результатов были выполнены в рамках реализации исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» https://rgo.ru/.

Библиография

1. Е. А. Мамаш, И. А. Пестунов, Р. К. Федоров Оценка среднемесячных значений температуры поверхностного слоя акватории озера Байкал по спутниковым // Интерэкспо *Гео-Сибирь*. - 2024. - *Т*. 4, № 1. – 87 с.

2. Lakes Environmental Association. (2018). Lakes Environmental Association 2018 Water Testing Report. Chapter 3 - Gloeotrichia echinulata Monitoring. https://mainelakes.org/wp-content/uploads/2019/02/2018-LEA-Water-Testing-Report-chapter-3.pdf]

3. Озеро с двойным дном // Наука и жизнь. – 2024. - URL: https://www.nkj.ru/open/50922/ (дата обращения: 08.08.2025).

4. Carey C.C., Haney J.F. and Cottingham K.L. (2007). First report of microcystin-LR in the cyanobacterium Gloeotrichia echinulata. Environmental Toxicology, 22(3), 337–339. DOI: 10.1002/tox.20245;

5. Tekanova E., Sidelev S., Kalinkina N., Chernova E., Barinova S., Sharov A. and Smirnova V. (2024). Toxigenic Cyanobacteria and Microcystins in a Large Northern Oligotrophic Lake Onego, Russia. Toxins, 16(11). DOI: 10.3390/toxins16110457;

6. U.S. Geological Survey (USGS). What are the band designations for Landsat satellites? // Официальный сайт геологической службы США. – 2025. – URL: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites (дата обращения: 20.07.2025).

7. Avdan U., Jovanovska G. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data // *Journal of Sensors*. – Том 2016. – Hindawi Publishing Corporation, 2016. – P. 8.

8. Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Анализ закономерностей в распределении температурных полей крупных промышленных городов Сибири по данным Landsat-8 // *Вычислительные технологии*. – 2022. – Том 27. – № 3. – С. 96.

9. U.S. Geological Survey (USGS). EarthExplorer // Официальный сайт геологической службы США. – 2025. – URL: https://earthexplorer.usgs.gov/ (дата обращения: 17.07.2025).

10. Landsat Science. Landsat 8 // Официальный сайт программы Landsat. – 2025. – URL: https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/ (дата обращения: 20.07.2025).

11. Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // *Remote Sensing of Environment*. — 2004. — Vol 90. — pp. 436.

Remote Analysis of Water Surface Temperature of Lake Pleshcheyevo

Ekaterina D. Loshkova[1]*, Vsevolod M. Moreido[2]
[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
[2] Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia
*lok2710@gmail.com

Key words remote sensing, Landsat 8/9, water surface temperature, LST, lake Pleshcheyevo, Google Earth Engine

Abstract The purpose of the study was to test the operation of the LST algorithm [4] on a water body, automate the algorithm and analyze the lake surface temperature based on the data obtained. Images from the Landsat 8/9 satellite for the period 2014-2024 were used. To calculate the temperature of the underlying surface (LST), an algorithm was applied that includes calculating the brightness temperature and its subsequent correction using the NDVI index to account for the emissivity of the water surface. The data is processed in the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. Point measurements of water temperature carried out by the Pleshcheyevo Lake National Park were used to verify the accuracy of satellite data. To compare data for different time periods, a random decision forest was built that relates water temperature to meteorological parameters (air temperature and dew point). The results of the study demonstrate the effectiveness of using Landsat 8/9 data and the GEE platform for operational monitoring of water surface temperature. The methodology can be applied to other inland bodies of water.

Acknowledgements

The study and the publication are carried out within the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage" with the financial support of the Russian Geo-Geographical Society, an All-Russian public organization https://rgo.ru.

УДК 910.3/ UDC 911.9

Гидрохимический режим озера Плещеево и его притоков

М.И. Андреева[1], А.А. Кочнев[2], Г.Д. Кузнецова[3] *





[1] Национальный парк «Плещеево озеро», Переславль-Залесский (Ярославская обл.), Россия
[2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[3] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
*srdc@miigaik.ru

Ключевые слова Плещеево озеро, гидрохимический мониторинг, гидрохимический режим, антропогенное загрязнение, диффузное загрязнение, биогенные элементы, геоинформационная система, ГИС

Аннотация В статье представлен анализ современного гидрохимического состояния Плещеева озера и его притоков на основе архивных данных Национального парка «Плещеево озеро» и результатов полевых исследований, проведенных в рамках проекта «Интеллектуальный хранитель Плещеева озера». Особое внимание уделено пространственно-временной динамике концентраций приоритетных загрязняющих веществ – фосфатов, нитритов, ионов аммония, железа, меди и нефтепродуктов. Проведена оценка степени превышения ПДК, а также выполнены расчёты интегральных годовых объёмов загрязнителей с последующей визуализацией в геоинформационной системе. Результаты указывают на устойчивое загрязнение ряда водотоков и юго-восточной части озера, связанное с антропогенными источниками.

1 Введение

Плещеево озеро – один из крупнейших водоёмов Центральной России, находящийся под значительным антропогенным воздействием, обусловленным как загрязнённым водным стоком, так и высоким диффузным загрязнением. Изучением экосистемы озера Плещеево системно занимаются сотрудники Института биологии внутренних вод РАН, по материалам их исследований опубликованы множество научных статей и несколько монографий, в которых представлены результаты многолетних комплексных исследований всех звеньев экосистемы озера [1]. Важным аспектом в исследовании озерной экосистемы является

наблюдение за гидрохимическим режимом озера. С одной стороны, загрязнение вод озера Плещеево несет непоправимый вред обитателям озера, в том числе переславской ряпушке, внесенной к Красную книгу РФ (2020), несет потенциальную угрозу охотничьи ресурсам и экосистеме водоема [2]. С другой стороны – является фактором, влияющим на качество жизни населения [3], поскольку озеро Плещеево является источником водоснабжение города Переславль-Залесский. Поэтому его санитарно-экологическое состояние, а также количественные и качественные оценки поступления загрязняющих веществ с речными водами представляют особый практический интерес.

С 1998 года лаборатория при Национальном парке «Плещеево озеро» ведёт регулярный ежемесячный мониторинг гидрохимического состояния водоёма. В рамках этой деятельности выполняется широкий спектр гидрохимических анализов, включая определение концентраций фосфат-ионов, нитритов и нитратов, аммонийного азота, растворённого кислорода, $БПК_5$, а также соединений меди, железа, нефтепродуктов и других веществ. За более чем два десятилетия наблюдений накоплен большой массив данных, требующих систематизации и актуализации, выявления наиболее ярких всплесков органических и химических загрязнений. В дополнение к существующим наблюдениям, в рамках настоящего исследования также были проведены работы с отбором проб на участках, не охваченных регулярным мониторингом со стороны Национального парка.

Целью данного исследования является обобщение и актуализация накопленных гидрохимических данных, а также формирование целостного представления о современном гидрохимическом состоянии Плещеева озера и его основных притоков.

2 Материалы и методы

В ходе гидрохимических исследований применялись референтные методики, регламентированные нормативными документами ПНДФ[1]. Так, во время полевого выезда в рамках экспедиции «Интеллектуальный хранитель Плещеева озера» проводилось определение приоритетных загрязняющих веществ, поступивших в поверхностные воды и характеризующихся высокой подвижностью. Подобные показатели способны указывать на свежие эпизоды загрязнения, не подвергшиеся процессам естественного самоочищения. К числу таких компонентов были отнесены ионы аммония, нитриты и фосфаты, также дополнительно был определён водородный показатель pH.

Количественное определение ионов аммония (NH4+) осуществлялось посредством добавления к пробе реактива Несслера с последующим фотометрическим анализом с использованием спектрофотометра. Нитриты (NO2-) определялись по реакции с реактивом Грисса, также с применением спектрофотометрического метода. Содержание фосфатов (PO43-) оценивалось после введения смешанного реактива и аскорбиновой кислоты.

[1] Федеральная служба по надзору в сфере природопользования РОСПРИРОДНАДЗОР. Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия https://metod.fcao.ru/ [Дата обращения: 18.09.2025]

Измерение значения pH осуществлялось с использованием автоматического pH-метра. Остальные гидрохимические показатели качества вод (нефтепродукты, нитрат ионы, сульфаты, хлориды, железо, кальций, медь, цинк, кадмий, свинец и $БПК_5$) определялись сотрудниками лаборатории Национального парка посредством хроматографии или спектрофотометрическим анализом.

2.1 Архивные данные Национального парка «Плещеево озеро»

В рамках реализации проекта исследователям были предоставлены архивные данные ежемесячного гидрохимического мониторинга Национального парка «Плещеево озеро» в виде электронных таблиц формата .xlsx за период с 2011 по 2024 год. Массив данных включает в себя сведения о концентрациях загрязняющих веществ и их отношению к ПДК (предельно-допустимой концентрации для водоемов рыбохозяйственного значения), определенных в назначенных точках отбора проб для регулярного гидрохимического мониторинга (рис. 1). Дискретность определения загрязняющих веществ составляет 1 месяц за исключением случаев перемерзания (пересыхания) рек (например, Черноречка, Кухмарь и др.).

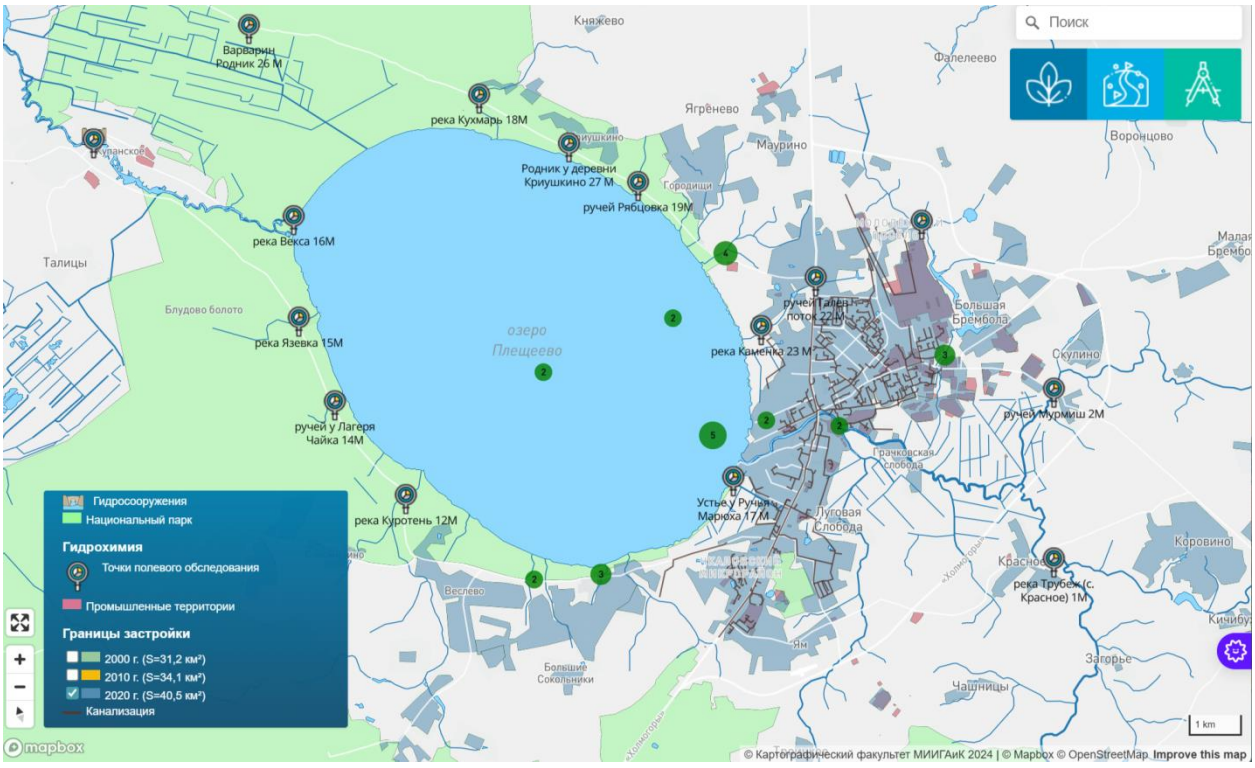


Рис. 1. Точки отбора проб сотрудниками Национального парка «Плещеево озеро» (гидрохимический мониторинг)

Fig. 1. Sampling points by employees of the Pleshcheyevo Lake National Park (hydrochemical monitoring)

Для оценки степени загрязнения была разработана система расчёта отношения среднегодовой концентрации вещества. Для этого брали среднюю концентрацию вещества по месяцам в течение года в отношении к максимально допустимой концентрации анализируемого показателя по ПДК рыбохозяйственного норматива, после чего

добавлялась ошибка гидрохимических анализов для значения ПДК согласно принятой методике измерения и определялись верхняя и нижняя границы ПДК. На основании этих расчётов определялись наиболее критичные превышения в разные годы мониторинга.

Визуализация данных в геоинформационной системе[2] осуществлялась по принципу градации уровня загрязненности в соответствии с сопоставлением среднегодовых концентраций загрязняющих веществ и ПДК. При этом использовалась цветная кодировка условных обозначений. Точки наблюдений, в которых среднегодовое значение концентрации исследуемого компонента не превышало установленные нормативы (ПДК минус ошибка измерения), обозначались зеленым цветом. Жёлтым цветом маркировались участки, характеризующиеся переходным состоянием. К ним относились случаи, при которых превышение ПДК наблюдались лишь эпизодически – в отдельные месяцы, а также значения, приближающиеся к пороговому уровню с учётом возможной погрешности гидрохимических методов анализа (ПДК ± ошибка измерения). Красный (или оранжевый) цвет указывал на устойчивое превышение среднегодовой концентрации (ПДК + ошибка измерения), величина которого отражала кратность превышения установленного норматива.

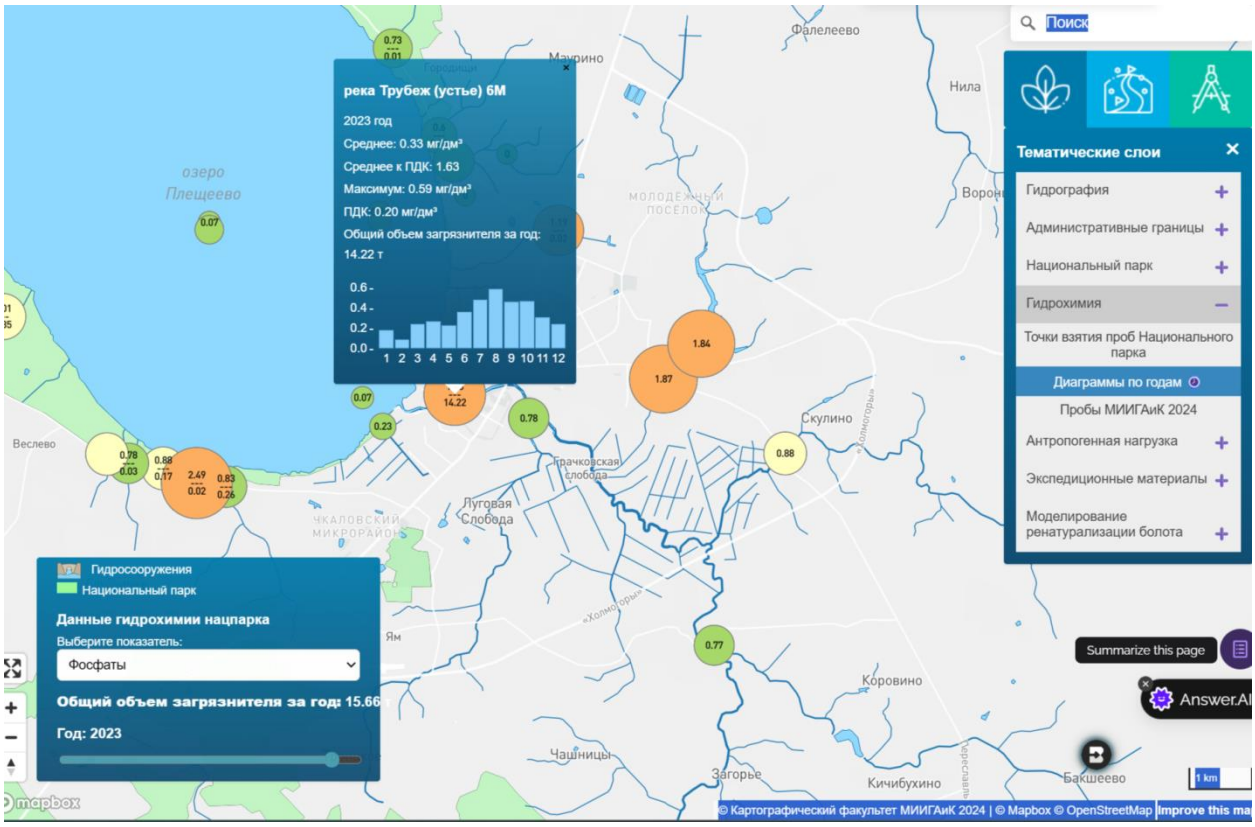


Рис. 2. Отображение концентраций загрязняющих веществ на интерактивной карте в геоинформационной системе.
Fig. 2. Displaying concentrations of pollutants on an interactive map in a geographic information system.

[2] Интерактивная карта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» https://kartfak.ru/development/pleshcheyevo/#9.74/56.7221/38.8622 Электронный ресурс [Дата обращения: 12.10.2025]

На рисунке 2 в качестве примера можно видеть отображение усредненных показателей концентрации фосфат-ионов в пробах воды озера «Плещеево» и притоках в 2023 году. Верхняя цифра – отношение концентрации загрязнителя к ПДК, нижняя – оценка суммарного количества загрязнителя, попавшее в озеро за 2023 год (в тоннах), рассчитанная как сумма по всем месяцам Σ [концентрация вещества * объем стока за месяц]. В данном случае можно видеть, что средняя концентрация ионов фосфатов в пробах в устье реки Трубеж составляет 1,63 ПДК (0,33 мг/дм^3 при предельно допустимой концентрации 0,2 мг/дм^3. Общий объем, «слитых» через Трубеж загрязнителей ионов фосфатов составил 14,22 т за 2023 год). На плашке представлено распределение концентрации загрязнителя по месяцам (мг/дм^3).

2.2 Данные полевых исследований

Принцип выбора точек отбора проб в рамках полевых выездов основывался на предварительном анализе существующих данных: приоритет отдавался участкам, в которых ранее не проводились регулярные гидрохимические наблюдения со стороны Национального парка, однако имелись веские основания предположить повышенный уровень биогенных веществ.

Река Ветлянка. Берет начало в небольшом болоте на севере от г.Переславль-Залесский, протекает мимо городских очистных сооружений, далее – мимо большого производственного комплекса и впадает в р. Трубеж в районе Грачковской слободы.

Реки Кухмарь, Б. Слуда и ручей Рябцовка. Протекают в местах наиболее частого посещения туристами рекреационных территорий Национального парка.

Река Вёкса. Единственная река, вытекающая из озера Плещеево и протекающая далее через территорию Национального парка и д. Купанское, где расположена регулируемая плотина. Именно на этом участке в конце июля 2023 года наблюдалась «пробка» из отмерших масс цианобактрий Gloeotrichia echinulata и массовый замор рыбы.

Инициатива обследования данных участков исходила от администрации парка с целью получения более полной информации о состоянии воды, попадающей в озеро Плещеево и вытекающей из него. В качестве контрольных были выбраны точки из числа регулярного гидрохимического мониторинга, выполняемого Национальным парком ежемесячно. В соответствии с поставленной задачей было организовано несколько полевых выездов, в ходе которых осуществлялся отбор проб воды с последующим лабораторным анализом. В рамках полевых выездов исследование было сосредоточено вокруг биогенов, которые являются, прежде всего, результатом антропогенного воздействия и способствуют развитию сине-зеленых водорослей в озере Плещеево – фосфат-ионы, нитрит-ионы, ионы аммония.

Фосфат-ионы. Фосфаты способны проникать в поверхностные воды при выветривании ортофосфатных пород (апатитов, фосфоритов), при биохимической переработке останков

живых организмов: растений, насекомых, животных. Широко применяются в промышленности: их используют как пенящийся компонент мыломоющих средств, как ингибитор для предотвращения коррозии, для обезжиривания волокон. Больше всего фосфатов поступает в поверхностные воды от сельскохозяйственной деятельности (стока с сельскохозяйственных угодий, богатых фосфорными удобрениями), из промышленных стоков предприятий, от эрозии грунтов и регенерации донных минеральных отложений.

Нитрит-ионы. Присутствие нитрит-иона в природных водах обычно обусловлено фекальным загрязнением. В поверхностных водах, особенно в водоисточниках, находящихся вблизи населённых пунктов, нитрит-ион содержится часто, однако его количество, как правило, невелико – измеряется тысячными и сотыми долями мг/л и редко превышает несколько десятых мг/л. Естественным путём нитриты появляются в воде в результате биохимического окисления аммиака или восстановления нитратов: в поверхностных водах в присутствии достаточных количеств кислорода преобладают процессы биохимического окисления, вследствие чего восстановление нитратов с образованием нитритов протекает в условиях дефицита кислорода в придонных слоях воды и в донных отложениях. В целом, повышенные концентрации в воде могут свидетельствовать о загрязнении водоёма.

Ионы аммония. Причины загрязнения вод ионом аммония могут нести естественный и техногенный характер. К первым относится процесс гниения органики в донных отложениях реки или водоёма, в особенности в летний период, когда температура воды повышается и активизируется микробиологическая активность. К техногенным – различные аварии на очистных сооружениях, сброс в поверхностные воды хозяйственно-бытовых стоков, свалки бытовых отходов, а также попадание минеральных удобрений, содержащих аммоний.

В рамках полевого выезда в июле 2024 г. было отобрано 42 пробы воды из 30 точек на р. Ветлянка, р. Вёкса, р. Большая Слуда, р. Кухмарь, на ручье Рябцовка, а также в ливневых канавах и канавах временных водотоков, расположенных в черте города и выходящих к озеру. Всего проведено 168 измерений гидрохимических параметров, в 14 образцах из 42 были обнаружены превышения ПДК.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Результаты визуализации и анализа архивных данных Национального парка в геоинформационной системе (ГИС)

Превышения ПДК фосфат-ионов в период с 2015 по 2024 год на регулярной основе зафиксированы в устье р. Трубеж, на притоках озера р. Кухмарь, р. Язёвка и р. Большая Слуда, а также в Матросском овраге в районе музейного комплекса Ботик Петра I. На рисунке 3 представлены результаты среднегодовой концентрации фосфат-ионов по результатам мониторинга 2024 года.

Загрязнение устьевой части р. Трубеж, по-видимому, обусловлено аккумуляцией фосфатов, транспортируемых с территории всего водосборного бассейна. Максимальное значение превышения ПДК ионов фосфатов в устье реки Трубеж отмечено в 2022 году – показатель превышен в 2,39 раза.

Реки Кухмарь и Язёвка характеризуется устойчиво повышенным фоновым содержанием фосфат-ионов, что может указывать на наличие регулярных поступлений загрязняющих веществ от застройки, расположенной выше по течению, так и в целом с территории бассейнов рек.

Повышенные концентрации фосфатов, зафиксированные в Матросском овраге вероятнее всего связаны с близостью городской застройки, не присоединенной к системе канализации.

Высокие концентрации фосфат-ионов также наблюдаются в пробах воды, взятых на реке Ветлянка (2 точки), в ручье Галев поток, а также в устье Черноречки, впадающей в Трубеж.

Следует отметить, что превышение концентрации фосфат-ионов на реке Ветлянке в районе дамбы (Большая Брембола) в 2024 году по данным Национального парка наблюдалось в январе-апреле, а также октябре-декабре, в то время как в мае-сентябре значения не превышали ПДК, что коррелирует с данными, полученными независимо во время полевых экспедиционных исследований[3].

Концентрации нитрит-ионов в исследуемый период оставались в пределах допустимых значений. Исключения зафиксированы в мае 2019 года на р. Куротень, где показатель нитрит-ионов превысил ПДК в 1,41 раза, а также в устье р. Трубеж в 2024 году (в 1,89 раз), на р. Ветлянка (в 1,64 раза), которая впадает в р. Трубеж, в районе Большой Бремболы после прохождения обширной промышленной зоны (рис. 4). Нитриты-ионы очень неустойчивое соединение. Чаще всего они образуются в результате окисления азота как переходная форма перед образованием нитратов. Их наличие указывает на загрязнение водного объекта стоками.

Повышенные концентрации ионов аммония (рис. 5) отмечаются преимущественно в следующих притоках озера: реке Кухмарь, ручье Язёвка, ключе Гремяч, а также в устьевой части р. Ветлянка и вблизи её дамбы и в Галевом потоке. Во всех перечисленных точках наблюдений наблюдается устойчивое превышение ПДК в течение всего периода отбора проб. Характер распределения ионов аммония указывает на постоянное загрязнение, что, вероятно, обусловлено длительным воздействием точечных или диффузных антропогенных источников, таких как сточные воды бытового и сельскохозяйственного происхождения.

[3] Исследовательский проект «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» https://www.miigaik.ru/student-research-and-development-center/ekspeditsiya-pleshcheevo-ozero/.

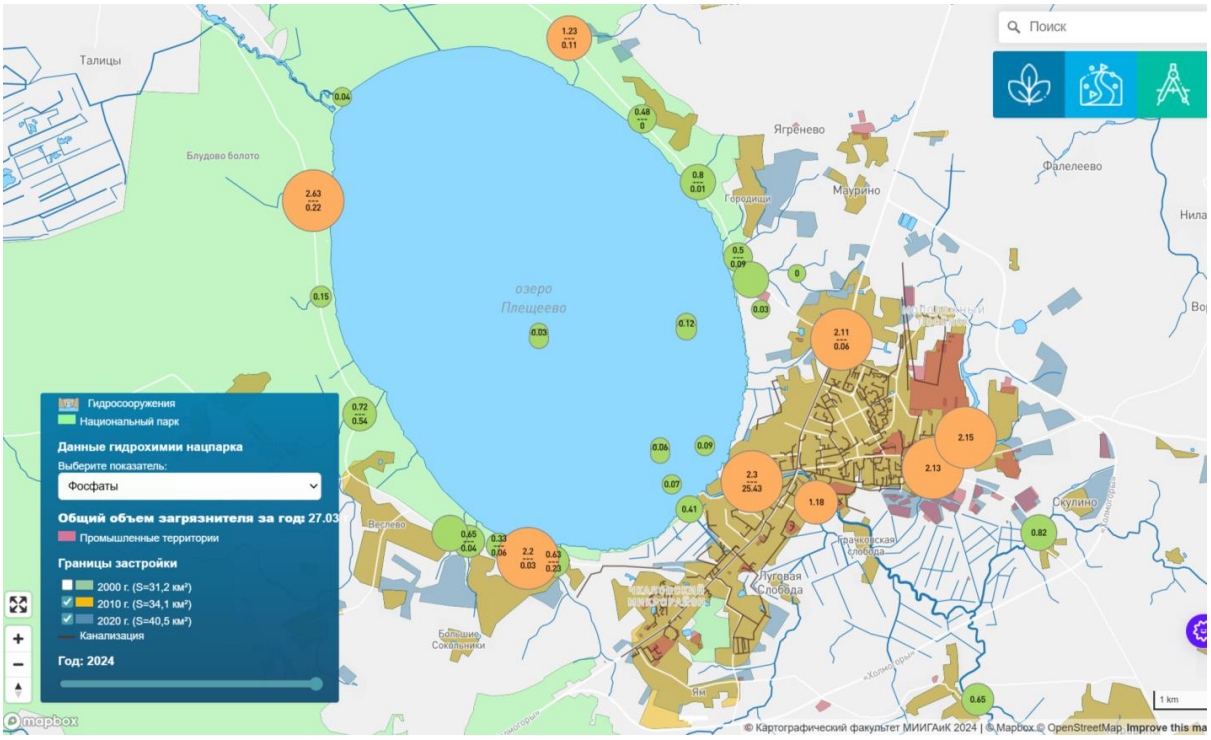


Рис. 3. Среднегодовое превышение ПДК фосфат-ионов по данным мониторинга Национального парка в 2024 году.

Fig. 3. Average annual excess of the maximum permissible concentration of phosphate ions according to the monitoring data of the National Park in 2024

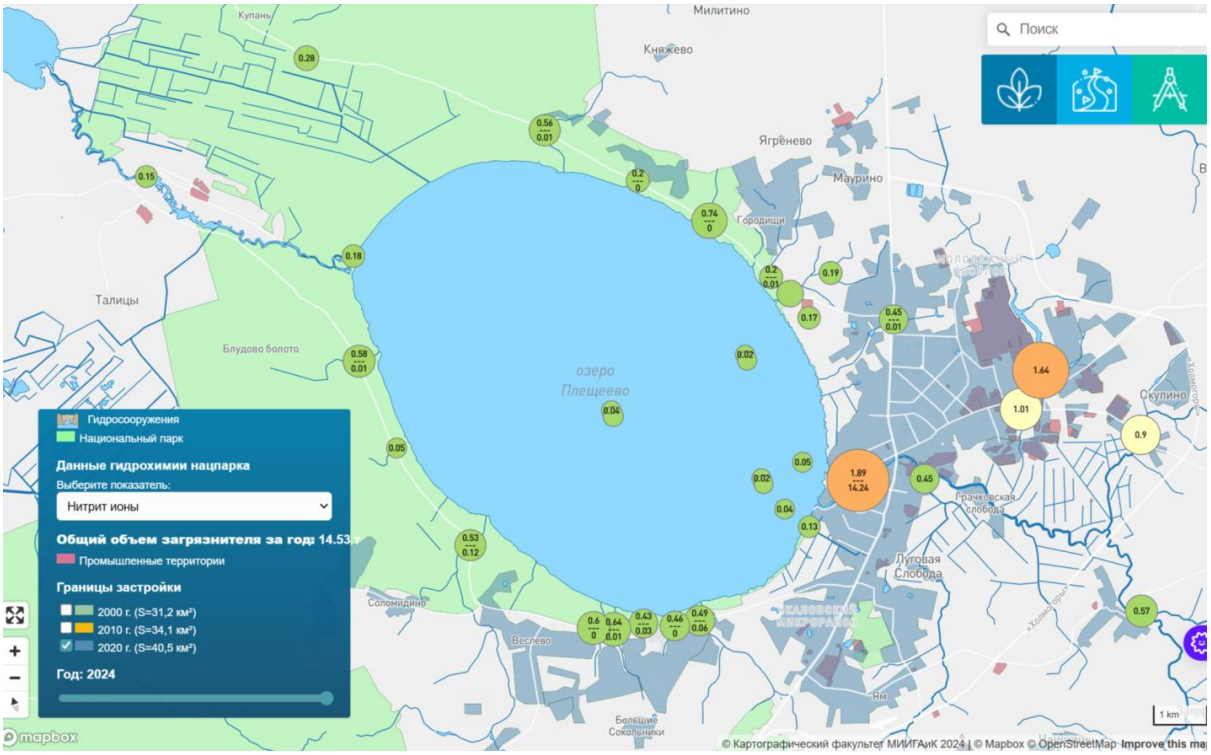


Рис. 4. Среднегодовое превышение ПДК нитрит-ионов по данным мониторинга Национального парка в 2024 году

Fig 4. The average annual excess of the maximum permissible concentration of nitrite ions according to the monitoring data of the National Park in 2024



Рис. 5. Превышение ПДК ионов аммония в 2023 году
Fig. 5. Excess of the maximum permissible concentration of ammonium ions in 2023

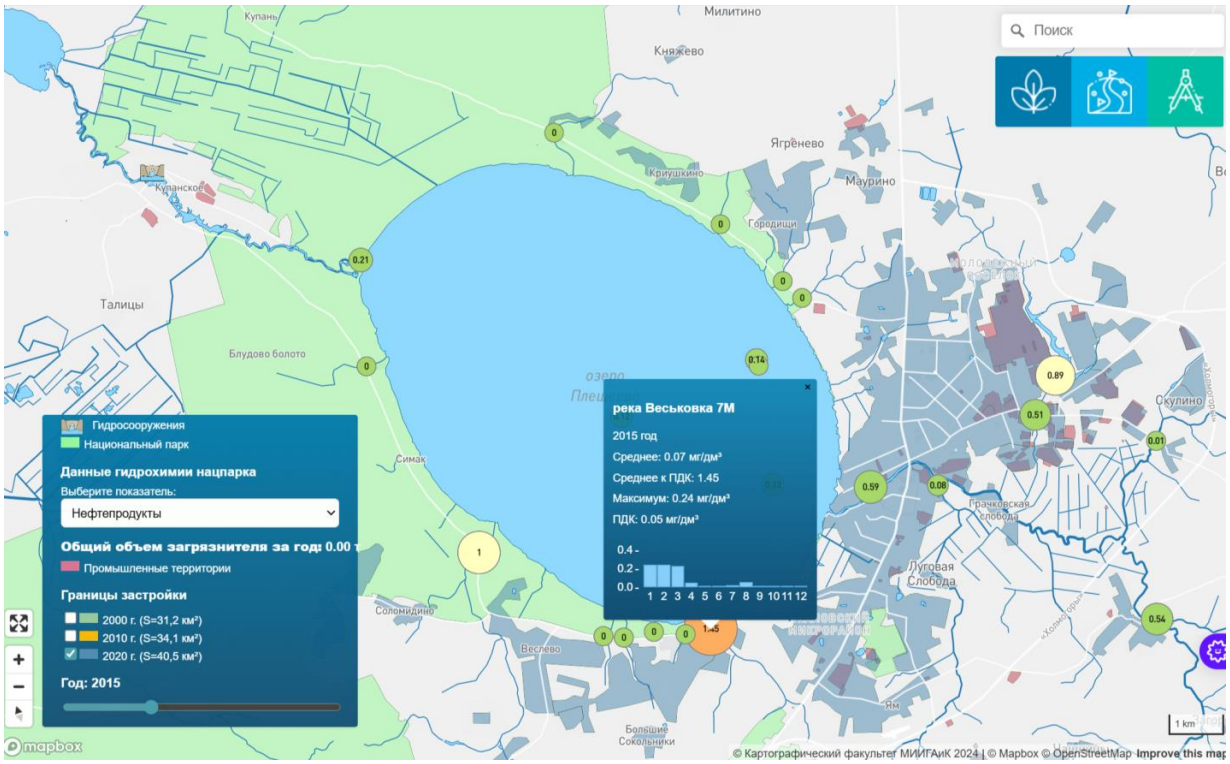


Рис. 6. Превышение ПДК нефтепродуктов на реке Веськовка в 2015 году
Fig. 6. Excess of the maximum permissible concentration of petroleum products on the Veskovka River in 2015

Превышения ПДК нефтепродуктов (рис. 6, 7) были зафиксированы в 2015 году на р. Веськовке (в 1,45 раз) и в 2017 году в устьевой части р. Ветлянки (в 2,46 раза). Основным

источником загрязнения, вероятно, является целенаправленный сброс сточных вод, содержащих нефтепродукты. Следует отметить, что превышения концентраций наблюдались преимущественно в осенне-зимний период (октябрь – март), т.е. до начала активной фазы половодья, что может дополнительно свидетельствовать о техногенном характере загрязнения в периоды низкой водности.

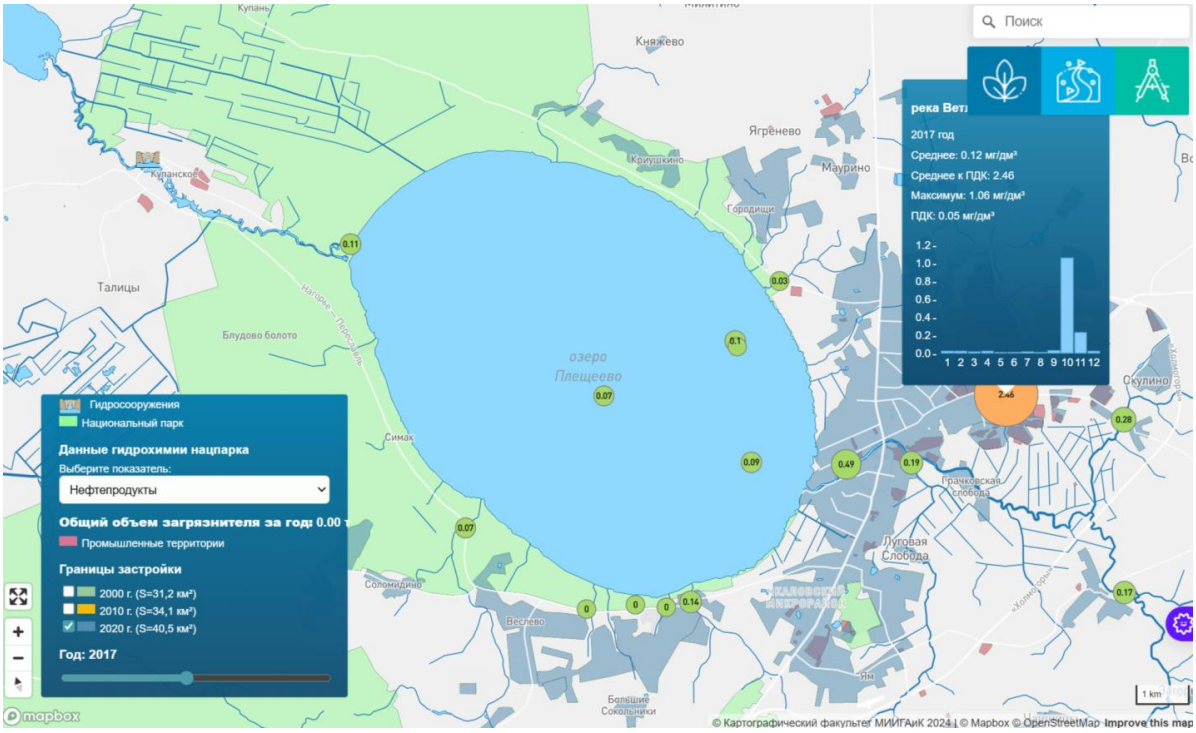


Рис. 7. Превышение ПДК нефтепродуктов на реке Ветлянка в 2017 году
Fig. 7. Excess of the maximum permissible concentration of petroleum products on the Vetlyanka Rive in 2017

Загрязнение воды ионами меди носит повсеместный характер (рис. 8). Так, по всех исследованных притоках зафиксированы превышения ПДК в среднем в 2-4 раза, а в отдельных случаях – в десятки и сотни раз. Наиболее экстремальное значение зарегистрировано в сентябре 2015 года на р.Куротень, где концентрация меди превысила установленный ПДК в 472 раза. Стабильно высокие фоновые значения наблюдаются в устье и вблизи дамбы р.Ветлянки, в устье р.Трубеж, а также в истоке р.Вёксы. В пробах, отобранных из озера, концентрации ионов меди несколько ниже, однако также превышают нормативы в 1,5 – 1,8 раза.

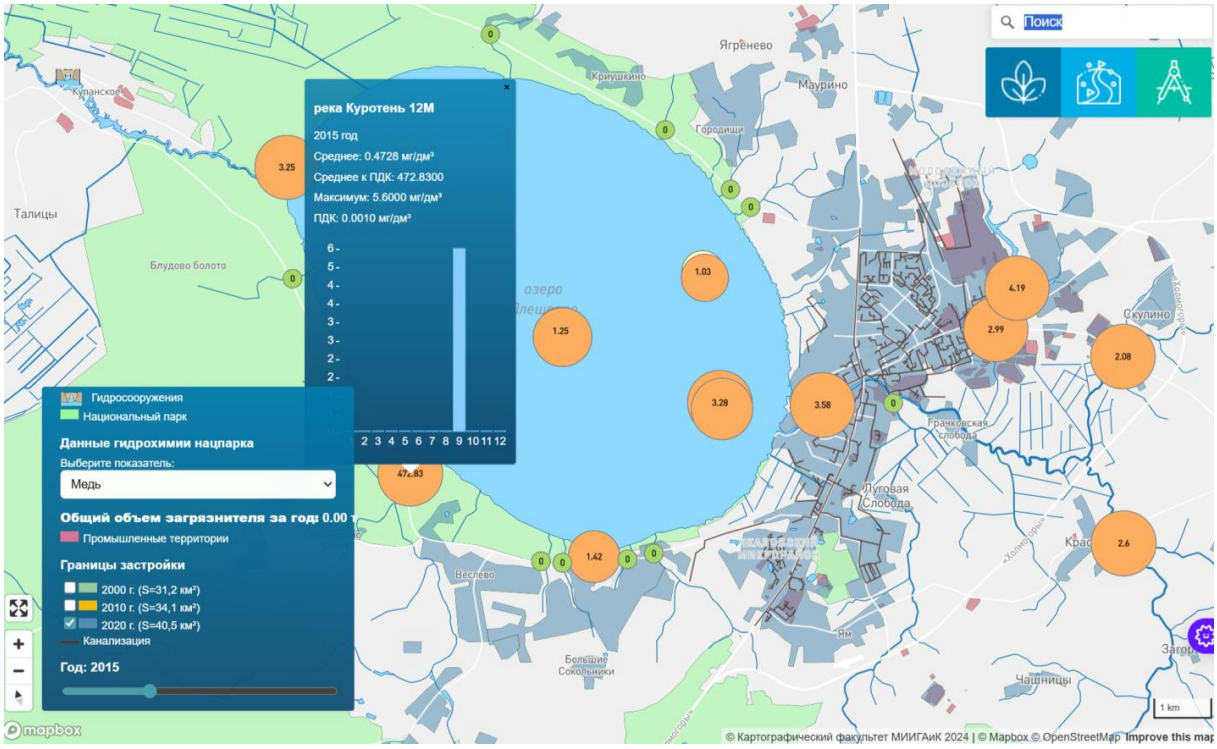


Рис. 8. Превышение ПДК ионов меди в 2015 г.

Fig. 8. Excess of the maximum permissible concentration of copper ions in 2015

Аналогичная ситуация наблюдается и в отношении ионов железа (рис. 9). В среднем по всем исследованным притокам концентрации железа превышали ПДК в 8-10 раз, а в отдельных случаях – до 68 раз (в частности, в 2017 году на р. Кухмарь). В водах озера превышения фиксировались до 2018 года включительно, достигая значения в 1,64 раза выше ПДК; в последующие года они не фиксировались, что может свидетельствовать о снижении уровня загрязнения и/или усиления эффекта разбавления.

Поскольку повышенное содержание меди и железа наблюдается практически во всех притоках, можно предположить, что это связано с питанием водоемов подземными стоками, дренирующими железо- и медь содержащие породы.

Так, по наблюдениям Национального парка, аномально повышенное содержание железа в пробах воды рек Язёвка (2017 год – 44,92 ПДК, 2021 – 25,5 ПДК, 2024 – 41,75 ПДК), Кухмарь (2017 год – 68,04 ПДК, 2021 – 2020 – 31,08 ПДК, 2021 – 32,2 ПДК) и ручья Гремяч (2019 год – 23,29 ПДК, 2022 год – 28, 92 ПДК) связаны с деятельностью бобров, которые строят плотины, в результате чего происходит обводнение прибрежных болотистых территорий с высоким содержанием гуминовых веществ в почве. В маломощных торфяниках восстановленное в минеральном слое железо может подтягиваться к верхнему аэрированному слою почвы, окисляться и осаждаться в нём.

Нельзя исключать и влияния антропогенного воздействия, обусловленного производственными и сельскохозяйственными сточными водами. Следует отметить, что железо, как один из макроэлементов, играет важную роль в питании водорослей, высших водных растений и других гидробионтов.

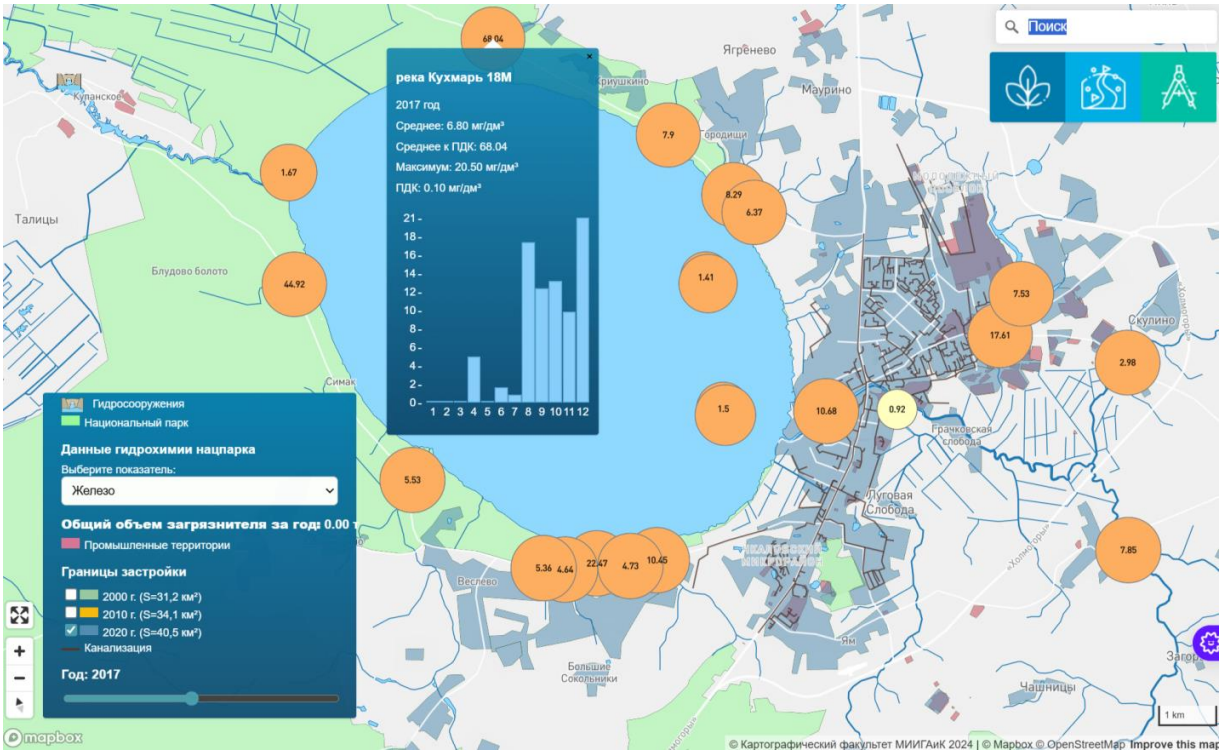


Рис. 9. Превышение ПДК ионов железа в 2017 г.
Fig. 9. Excess of the maximum permissible concentration of iron ions in 2017

3.2 Результаты полевых исследований

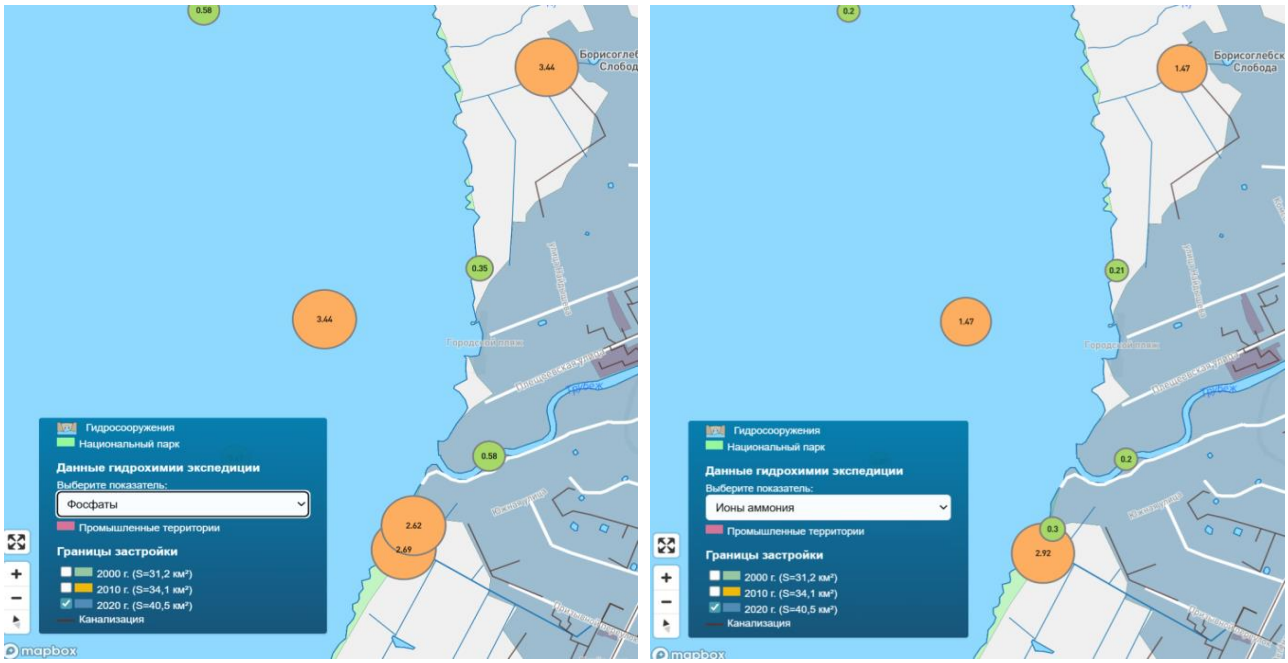


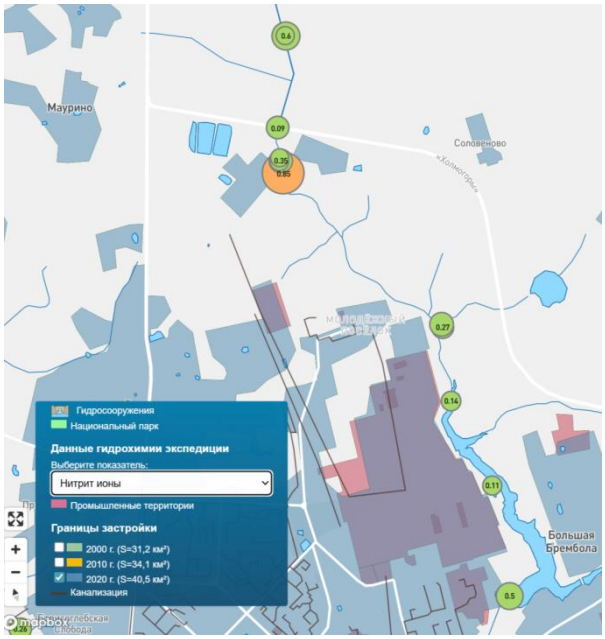
Рис. 10. Повышенное содержание фосфат-ионов (a) и ионов аммония (b) в пробах воды в ливневых канавах, июль 2024 году
Fig. 10. Increased content of phosphate ions (a) and ammonium ions (b) in water samples in storm ditches, July 2024

Результаты измерений вдоль водотока р. Ветлянка, начиная от истока в районе болота и до контрольной точки у плотины (Большая Брембола) показало повышенное содержание

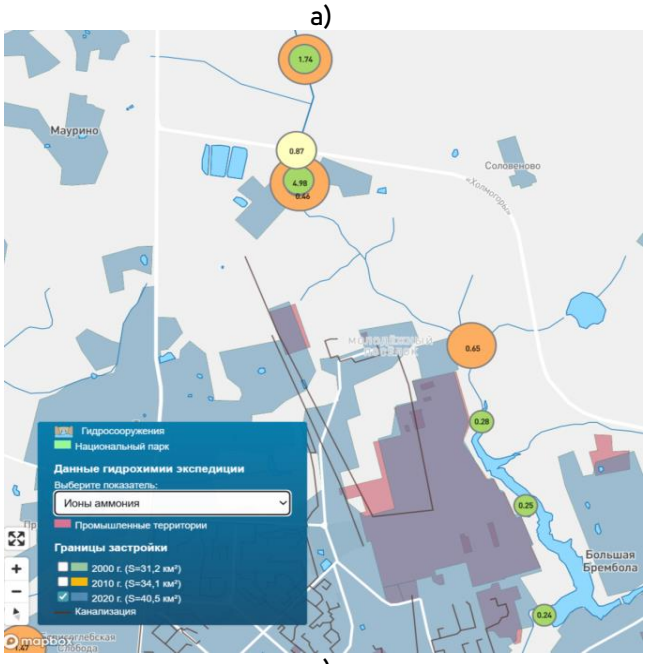
всех биогенов, включая нитрит-ионы, в точках прохождения водотока вдоль городских очистных сооружений (рис. 11 a, b, c). Причиной такого уровня загрязнения является высокая антропогенная нагрузка на прилегающую территорию, включая поступление поверхностного стока, содержащего фосфорсодержащие соединения, в водоём, наличие локальных источников загрязнения, вероятно связанные с неэффективной работой очистных систем и поступлением недостаточно очищенных сточных вод в водотоки, а также сброс сточных вод в водотоки и озеро напрямую.



a)



b)



c)

Рис. 11. Содержание фосфат-ионов (a), ионов аммония (b) и нитрит-ионов (c) в пробах воды р. Ветлянка, июнь 2024 году

Fig. 11. The content of phosphate ions (a), ammonium ions (b), and nitrite ions (c) in water samples from R. Vetlyanka, June 2024

3.3 Оценка выноса загрязняющих веществ за год

В ходе исследования проведена оценка интегрального годового стока загрязняющих веществ. Расчеты базировались на методике, предполагающей стабильность месячных

концентраций. Месячный массовый вынос для каждого загрязнителя определялся как произведение его средней концентрации на величину среднемесячного расхода воды. В случаях отсутствия данных о среднемесячном расходе использовалось значение среднегодового расхода. Суммирование месячных величин позволило получить итоговые значения годового стока, выраженные в тоннах в год. Результаты расчетов визуализированы в геоинформационной системе проекта[4].

Наибольшие значения годового массового выноса загрязняющих веществ зарегистрированы в устьевом створе р. Трубеж, что обусловлено, в первую очередь, его доминирующей долей в суммарном поверхностном стоке в озеро Плещеево. В таблице 1 представлены сводные расчетные данные за период 2019-2024 гг., отражающие суммарный поступление биогенных элементов и нефтепродуктов в озеро Плещеево со всеми притоками, их вынос через р. Вёксу, а также разность этих показателей, характеризующую процессы аккумуляции.

Таблица 1. Оценка суммарного сброса биогенных загрязнителей и нефтепродуктов в озеро Плещеево за период 2019-2024 гг. (тонн в год).
Table 1. Assessment of the total discharge of biogenic pollutants and petroleum products into Lake Pleshcheyevo for the period 2019-2024.

	2019	2019 Разница «приток-исток», т	2020	2020 Разница «приток-исток», т	2021	2021 Разница «приток-исток», т	2022	2022 Разница «приток-исток», т	2023	2023 Разница «приток-исток», т	2024	2024 Разница «приток-исток», т
Фосфат-ионы (приток, т)	9	8	24	21	15	12	28	26	16	12	27	25
(исток, т)	1		3		3		2		4		2	
Нитрит-ионы (приток, т)	3	2	6	5	3	2	5	4	3	2	15	14
(исток, т)	1		1		1		1		1		1	
Нитрат-ионы (приток, т)	83	79	142	126	114	104	175	169	63	49	104	88
(исток, т)	4		16		10		6		14		16	
Ионы аммония (приток, т)	12	7	27	16	16	11	31	27	16	4	29	1
(исток, т)	5		11		5		4		12		28	
Нефтепродукты (приток, т)	0,9	0,3	0,6	0,1	1,0	0,5	0,9	0,3	1,1	0,3	0,2	-0,2
(исток, т)	0,6		0,5		0,5		0,6		0,8		0,4	

Необходимо подчеркнуть, что приведенные в таблице значения являются оценочными и не учитывают изъятие воды городским водозабором. Тем не менее, они выявляют устойчивую тенденцию: 1) объем выноса биогенных элементов (соединений азота и фосфора) достаточно велик; 2) значительная часть биогенных элементов, поступающих с водосборной площади, аккумулируется в экосистеме озера, что может играть определяющую роль в ухудшении экологического состояния озера Плещеево. Для установления дальнейшей судьбы этих загрязняющих веществ, изучения процессов их трансформации и идентификации зон и форм накопления (в толще воды или донных отложениях) требуются целенаправленные дополнительные исследования. Приоритетной

[4] Интерактивная карта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» в ГИС https://kartfak.ru/development/pleshcheyevo/#11.12/56.7379/38.8649/19.2/3

задачей в данном направлении является комплексный анализ донных отложений лимнической системы озера и русловых отложений р. Вёксы.

4 Выводы

Проведенный анализ архивных материалов Национального парка «Плещеево озеро» и данных натурных наблюдений позволяет дать обобщенную характеристику современного гидрохимического состояния акватории озера Плещеево и его приточных систем. Установлены систематические превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) для ряда показателей, включая ионы аммония, нитрит-ионы, фосфат-ионы, соединения меди и железа.

Зоны наиболее интенсивного загрязнения приурочены к устьевым участкам рек Трубеж и Ветлянка, а также к водотокам юго-восточной части водосборного бассейна, включая дренажно-мелиоративные канавы. В ряде пунктов наблюдения (р. Кухмарь, руч. Язёвка, Галев Поток и др.) зафиксированы аномально высокие концентрации загрязняющих веществ, что свидетельствует о наличии локальных источников поступления, в том числе неучтенных сточных вод. В целом, для водных объектов территории характерна устойчивая пространственно-временная неоднородность в распределении загрязняющих веществ.

В рамках действующей системы мониторинга сохраняется ряд нерешенных вопросов. В частности, недостаточно оценивается вклад диффузного (рассеянного) загрязнения, особенно в период весеннего снеготаяния, когда формируется значительный объем поверхностного стока с урбанизированных и агротехногенных территорий. Существующая наблюдательная сеть не обладает достаточной репрезентативностью, так как не охватывает все участки с потенциально высокой антропогенной нагрузкой, такие как временные водотоки и малые притоки, что исключает их из программы регулярного контроля. Идентификация диффузных источников загрязнения, оценка их влияния на экологическое состояние озера и создание эффективных водоохранных программ требуют разработки специальных проектов мониторинга с учетом гидрометеорологического режима и хозяйственной деятельности на территории водосборных бассейнов притоков озера. Мониторингу малых водосборов при этом должно быть уделено особое внимание, поскольку они являются наилучшими индикаторами антропогенного воздействия [4]. Поскольку организация геоэкологического мониторинга по любому из видов неконтролируемой антропогенной нагрузки является весьма сложной задачей, повысить эффективность оценки диффузного загрязнения позволит применение сочетания различных методов и подходов [5], таких как:

- организация комплекса наземных наблюдений и экспедиционных работ на ключевых участках водосборов боковых притоков и их устьях в периоды паводков и межени;
- сочетание методов дистанционного зондирования Земли, включая аэрофотосъемку с использованием БВС, и наземных наблюдений;

— совместное использование дистанционной, картографической информации, ГИС-технологий и соответствующих экспертных оценок (в условиях дефицита наземных данных).

Выполненная оценка баланса поступления и оттока загрязняющих веществ показала, что значительная часть биогенных элементов (фосфатов, нитритов, нитратов и аммония), поступающих в озеро с водами притоков, не выносится через р. Вёксу и аккумулируется в экосистеме водоема. Однако на текущем этапе исследований отсутствуют данные, позволяющие идентифицировать формы и зоны их накопления в донных отложениях или водной толще. Важной составной частью изучения данного вопроса является применение системного геоэкологического подхода, который позволяет выявить причинно-следственные взаимосвязи между водосбором, водными массами, донными осадками и биотой [6].

Для формирования целостной картины гидрохимического режима озера Плещеево необходима дальнейшая детализация исследований с расширением их программной и методической базы.

Благодарности

Данное исследование выполнено в рамках реализации проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» https://rgo.ru/. Авторы выражают благодарность декану картографического факультета Г.И.Загребину и магистрантке Е.А. Борисовой (МИИГАиК) за создание геоинформационной системы для анализа и визуализации данных мониторинга и полевых исследований озера Плещеево.

Библиография

1. Экосистема озера Плещеево. – Л.: Наука, 1989. – 264 с. ISBN 5-02-026582-9

2. Чугреев, М. К. Загрязнение Плещеева озера - потенциальная угроза охотничьим ресурсам и экосистеме водоёма / М. К. Чугреев, И. С. Ткачева, В. С. Воронцова // Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и тенденции развития: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции в 2 частях, Саратов, 27 декабря 2022 года. Том Часть 2. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2022. – С. 10-15. – EDN LELHGB.

3. Авраменко, М. В. Загрязнение вод как фактор, влияющий на качество жизни населения / М. В. Авраменко, Е. О. Смирнова // Актуальные проблемы отраслевой юридической науки: Сборник научных трудов по итогам XII Международной научно-практической конференции и III Международной научно-практической конференции, Владимир, 29 ноября – 01 2023 года. – Владимир: ООО ТСК "Копиа-Сервис", 2023. – С. 172-176. – EDN PDCHWM.

4. Полянин, В. О. Мониторинг диффузного загрязнения / В. О. Полянин // Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем РАН. – Москва: Российская академия наук, 2020. – С. 126-148. – EDN VVLLGP.

5. Критерии оценки экологического состояния водосборов малых рек и выноса биогенных веществ в Иваньковское водохранилище / Н.В. Кирпичникова, В.О. Полянин, И.Е. Курбатова, Ю.Д. Черненко // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – № 6. – С. 81-105. – DOI 10.35567/1999-4508-2021-6-5. – EDN CCMNOZ.

6. Географические методы изучения экосистем внутренних водоемов. 300 лет Российской академии наук / С. А. Поддубный, В. В. Законнов, А. В. Кутузов [и др.]. – Ярославль: Филигрань, 2024. – 206 с. – EDN MVWTDQ.

The Hydrochemical Regime of Lake Pleshcheyevo and Its Tributaries

Marina I. Andreeva [1], Artem A. Kochnev [2], Galina D. Kuznetsova [3] *
[1] Pleshcheyevo Lake National Park, Pereslavl-Zalessky, Russia
[2] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[3] Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia
*srdc@miigaik.ru

Keywords Pleshcheyevo lake, hydrochemical monitoring, hydrochemical regime, anthropogenic pollution, diffuse pollution, biogenic elements, geoinformation system, GIS

Abstract The article presents an analysis of the current hydrochemical state of Pleshcheyev Lake and its tributaries, based on archival data from the National Park and the results of field research conducted as part of the project "Intellectual Keeper of Pleshcheyev Lake". Special attention is given to the spatial and temporal dynamics of priority pollutants, such as phosphates, nitrites, ammonium ions, iron, copper, and petroleum products. An assessment of the excess of maximum permissible concentrations is carried out, along with calculations of the annual volumes of pollutants and their visualization in a geoinformation system. The findings indicate persistent pollution in several watercourses and in the southeastern part of the lake, likely originating from anthropogenic sources.

Acknowledgements

The analysis of archival data and publication of the article was carried out as part of the project "Intellectual Guardian of the Heritage of Pleshcheyevo Lake", with financial support from the All-Russian Public Organization "Russian Geographical Society" https://rgo.ru/.

We would like to express our gratitude to the Dean of the Cartography Faculty, Gleb I. Zagrebin, and master student Ekaterina A. Borisova (MIIGAiK), for creating a geo-information system for analyzing and visualizing monitoring data and field research on Lake Pleshcheyevo.

УДК 581.526.32, 528.8 / UDC 528.8

Пространственно-временная динамика растительности озера Плещеево




М.М. Никоноров[1]*, В.А. Ермоленков[2]

[1] Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

[2] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

*mishanikonorov2002@nextmail.ru

Ключевые слова озеро Плещеево, прибрежно-водная растительность, макрофиты, эвтрофикация, дистанционное зондирование, биоразнообразие

Аннотация Статья посвящена исследованию пространственно-временной динамики растительности озера Плещеево, расположенного в Ярославской области. Актуальность работы обусловлена значительными изменениями в экосистеме водоема, вызванными антропогенной нагрузкой и процессами эвтрофикации. Исследования проводились в июле 2024 года и включали геоботаническое описание прибрежно-водной растительности с определением видового состава и проективного покрытия. С помощью дистанционного зондирования и ГИС-технологий была проведена оценка площади зарастания. Результаты показали существенное сокращение общего биоразнообразия и доминирование видов-индикаторов загрязнения. Динамика трансформации растительных сообществ демонстрирует необходимость регулярного экологического мониторинга озера Плещеево, а также разработки рекомендаций по сохранению его природных ресурсов в условиях глобальных изменений климата и нарастания антропогенного воздействия.

1 Введение

Озеро Плещеево представляет собой уникальный природный объект, обладающий значительным экологическим и рекреационным значением. На протяжении последних десятилетий водоем подвергается значительной антропогенной нагрузке, вызванной интенсивным развитием туризма, сельского хозяйства и урбанизации прилегающих территорий. Эти факторы приводят к увеличению стока биогенных элементов, что, в свою очередь, способствует эвтрофикации водоема и изменению структуры его экосистемы [1].

Изменения в экосистеме озера Плещеево непосредственно затрагивают флору и фауну данного водоёма, нарушая естественные биологические процессы и приводя к деградации существующих природных комплексов. В этом контексте изучение динамики зарастания прибрежно-водной растительности становится важным инструментом для оценки экологического состояния озера, позволяющим не только выявить степень антропогенного воздействия, но и разработать меры по сохранению биологического разнообразия водоема1. Важность анализа зарастания растительности обусловлена тем, что именно растительные сообщества служат маркерами изменений в экосистеме, предоставляя информацию о качестве воды, уровне загрязнения и общем состоянии природного комплекса.

Цель нашего исследования заключалась в оценке экологического состояния озера Плещеево на основе анализа пространственно-временной динамики зарастания прибрежно-водной растительности. Мы стремились выявить не только количественные изменения в распределении видов, но и характер трансформаций, происходящих в структуре растительных сообществ, что позволит обоснованно рекомендовать цели и стратегии управления использованием природных ресурсов и охраны окружающей среды [1].

2 Материалы и методы

Исследования проводились в июле 2024 года на территории озера Плещеево (г. Переславль-Залесский Ярославской обл.). Объектом изучения выступала прибрежно-водная растительность литоральной и прилегающей к ней зоны озера.

В ходе настоящего исследования была проведена комплексная методика изучения прибрежно-водной растительности озера Плещеево. Геоботанические описания выполнялись маршрутным методом с использованием электромоторной лодки, что обеспечило детальное обследование литорали и прибрежных акваторий (рис. 1).

Определение видового состава проводилось при помощи полевых определителей с обязательной фиксацией координат и биотопических характеристик пунктов наблюдений посредством GPS-устройств. Для каждого выделенного ценоза оценивались параметры проективного покрытия, высоты над уровнем воды и структурной организации растительных сообществ, что позволило получить репрезентативные данные о зональности и гетерогенности фитоценозов [2, 3].

С целью пространственно-количественной верификации площадей зарастания использовались материалы дистанционного зондирования (ДДЗ), в том числе космические снимки высокого пространственного разрешения (Google Satellite) за 2024 г., а также геопривязанная и оцифрованная карта растительности 1970-х гг., созданная на основе архивных данных (рис. 2, 3).

[1] Национальный парк «Плещеево озеро» // plesheevo-lake.ru (дата обращения: 17.06.2025).

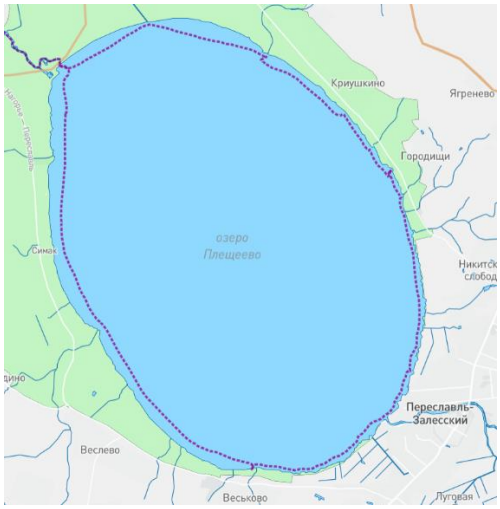


Рис. 1. Маршрут исследования прибрежно-водной растительности
Fig. 1. The route of coastal-aquatic vegetation research

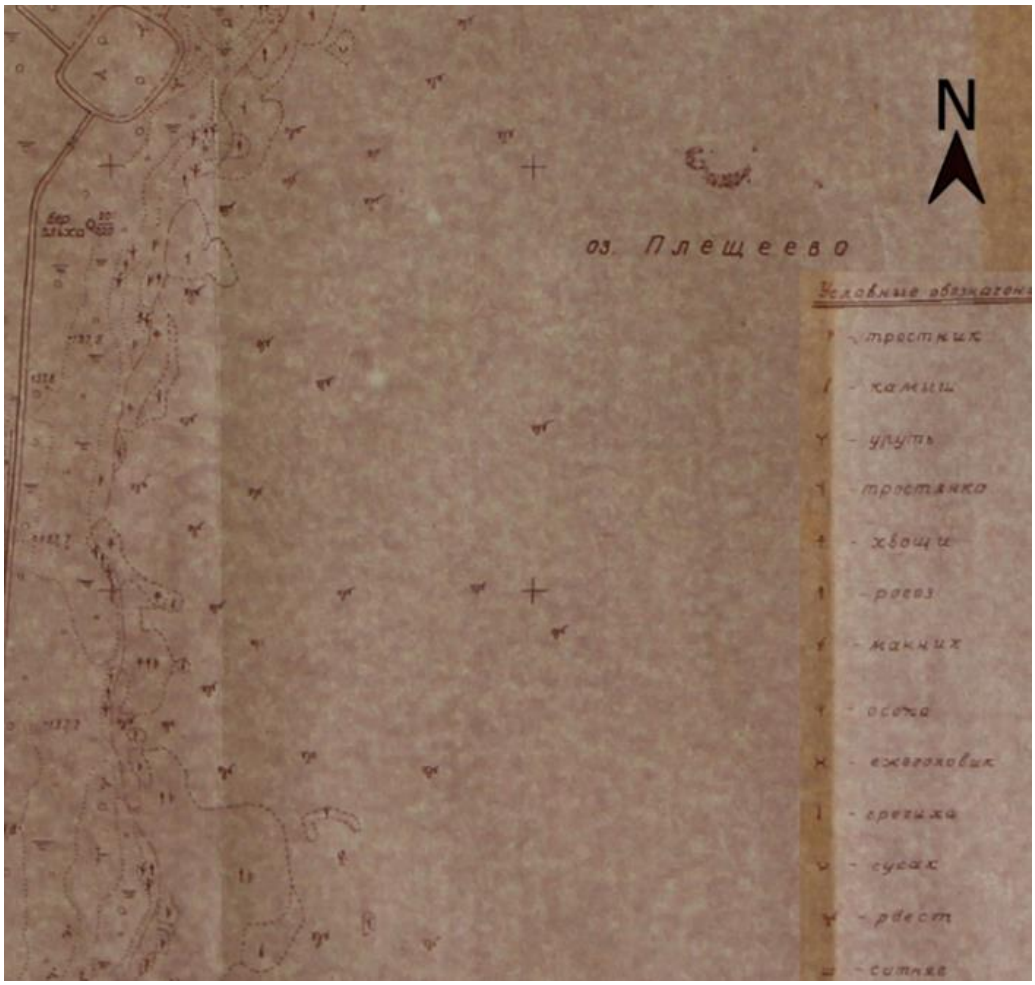


Рис. 3. Фрагмент архивной карты растительности оз. Плещеево 1970-х гг.
Fig. 3. Fragment of the archival vegetation map of the lake. Pleshcheyevo in the 1970s.

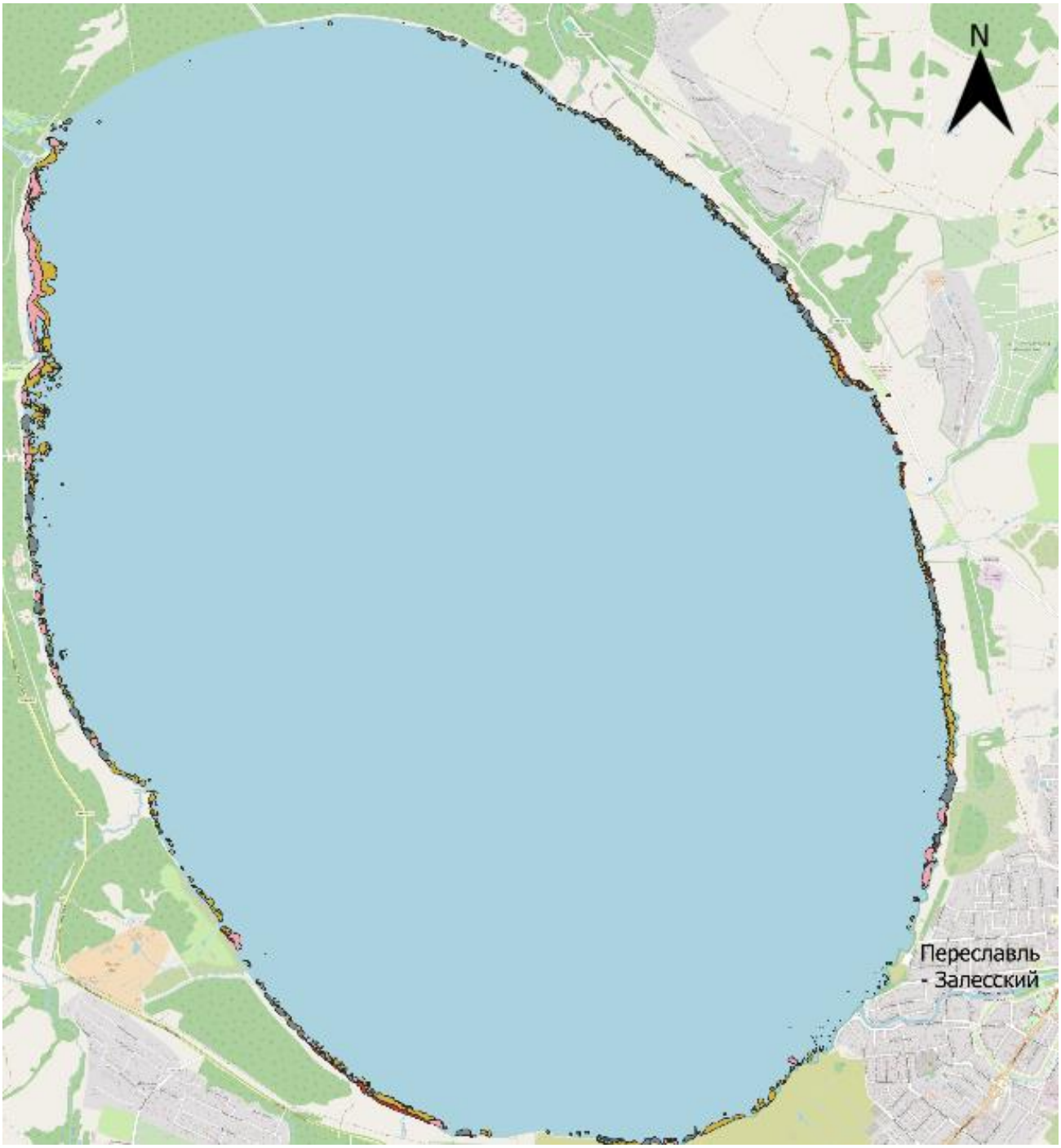


Рис. 2. Карта растительности оз. Плещеево, построенная по результатам проведенного исследования, 2024 г.

Fig. 2. Vegetation map of the lake. Pleshcheyevo, built according to the research, 2024

На рисунке 3 представлены фрагменты карты береговой линии озера, построенной по результатам проведенного в 2024 году исследования: a) северо-западный берег озера (Урёв); b) северный берег озера (экотропа «в гостях у серой цапли»); c) восточный берег озера (Александрова гора); d) юго-западный берег озера (музей-усадьба «Ботик Петра I»); f) юго-восточный берег озера (г. Переславль-Залесский).



a) северо-западный берег озера (Урёв)



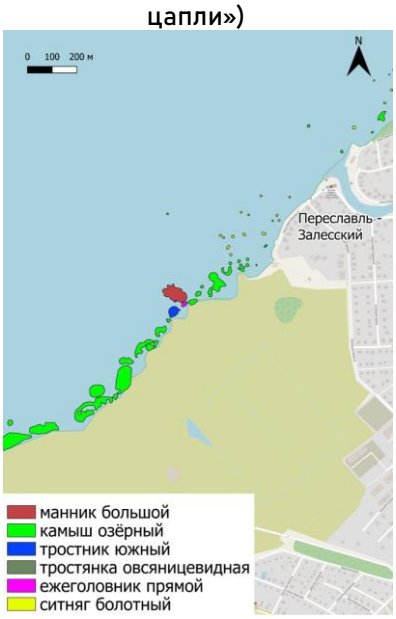
b) северный берег озера (экотропа «в гостях у серой цапли»)



c) восточный берег озера (Александрова гора)



d) юго-западный берег озера (музей-усадьба «Ботик Петра I»)



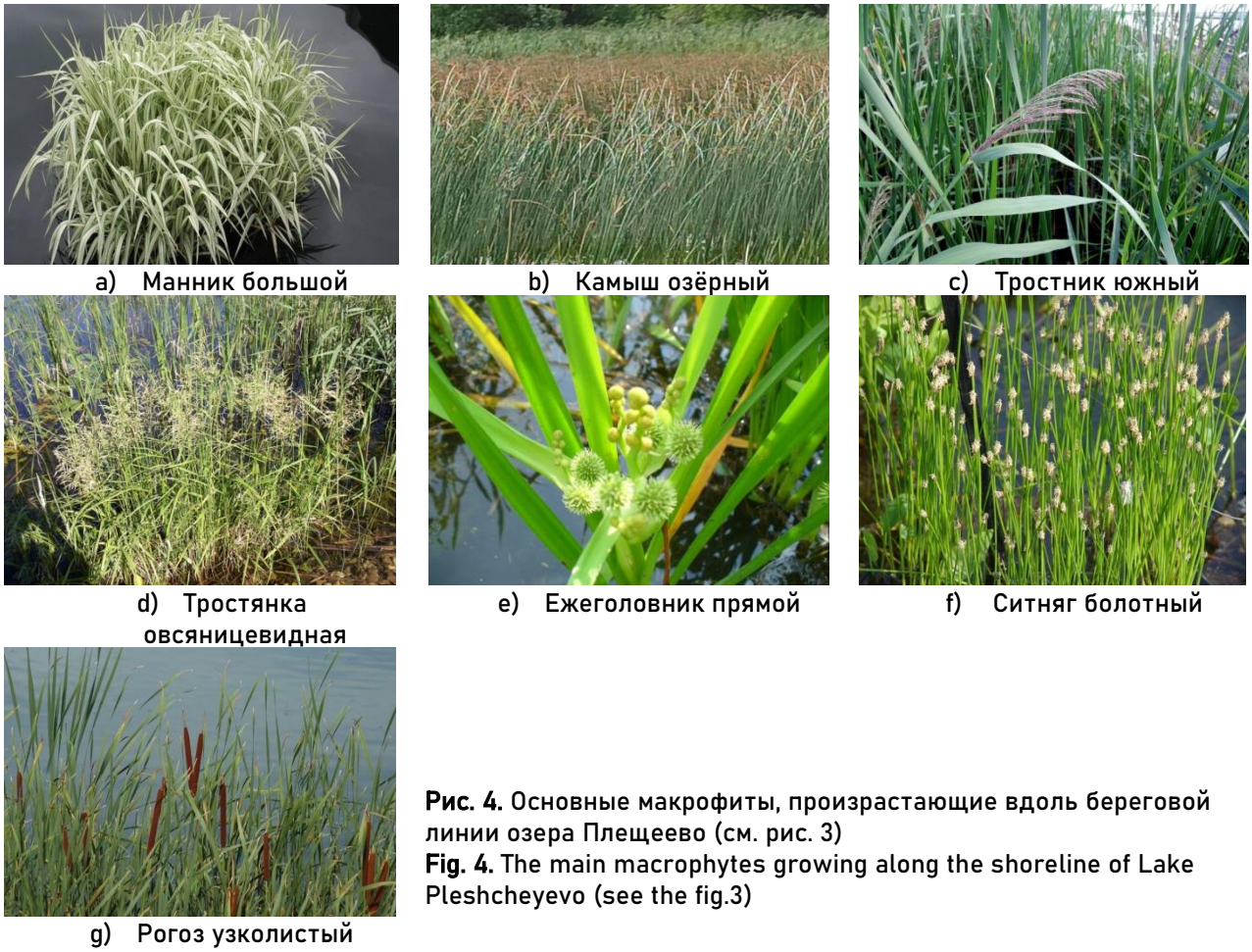
f) юго-восточный берег озера (г. Переславль-Залесский).

Рис. 3. Фрагменты карты береговой линии озера, построенной по результатам проведенного в 2024 году исследования

Fig. 3. Fragments of a map of the lake's coastline based on the results of a study conducted in 2024

Материалы были интегрированы в ГИС-среду (QGIS), где на этапах векторизации береговая и водная растительность были выделены в виде отдельных фитоценозов согласно типологическим критериям (структура, доминанты, морфология и пространственное распределение). Геопривязка архивных данных обеспечила возможность корректной сопоставимости пространственных структур разных лет [4].

Площади каждого из выделенных фитоценозов были рассчитаны инструментальными средствами ГИС – в частности, с применением функции $area в калькуляторе полей QGIS, что позволило обеспечить автоматизированный и воспроизводимый расчёт площадей выделенных объектов с высокой точностью.



a) Манник большой
b) Камыш озёрный
c) Тростник южный
d) Тростянка овсяницевидная
e) Ежеголовник прямой
f) Ситняг болотный
g) Рогоз узколистый

Рис. 4. Основные макрофиты, произрастающие вдоль береговой линии озера Плещеево (см. рис. 3)
Fig. 4. The main macrophytes growing along the shoreline of Lake Pleshcheyevo (see the fig.3)

Картографический и пространственный анализ был дополнен данными геоботанического описания, что позволило не только сопоставить фактические контуры распространения растительных сообществ, но и уточнить границы на разных этапах сукцессии и изменений водного режима.

3 Результаты и обсуждение

Ретроспективный анализ динамики зарастания озера Плещеево свидетельствует о существенных трансформациях как в общей площади макрофитных сообществ, так и в их видовом составе. Сравнение данных за 1970 и 2024 гг. (Таблица 1) выявило уменьшение площади зарастания более чем на треть, что сопровождается выраженной сменой структуры доминирования водной растительности [2].

В абсолютных показателях совокупная площадь зарастания снизилась с 1,28 млн м² (2,5% площади озера) до 837,5 тыс. м² (1,66%), что может быть обусловлено комплексом природных и антропогенных факторов – в том числе изменением гидрологического режима, уровнем колебаний воды, а также возрастанием антропогенной нагрузки на прибрежные экосистемы.

Таблица 1. Площади формаций доминантных видов растений прибрежно-водных сообществ, в 1970-х гг. и 2024 г, м^2
Table 1. Areas of formations of dominant plant species of coastal aquatic communities in the 1970s and 2024, m^2

Вид	1970-е гг.		2024 г.		Δ, м^2
	Площадь, м2	%	Площадь, м2	%	
Ежеголовник прямой	8027	0,016	500	0,06	-7531
Ситняг болотный	2710	0,005	1100	0,13	-1131
Манник большой	342536	0,67	170900	20,41	-171615
Рогоз узколистный	282669	0,55	52800	6,30	-229905
Тростник южный	184918	0,36	203600	24,31	18649
Тростянка овсяницевидная	371373	0,73	16300	1,95	-355077
Камыш озёрный	84975	0,17	392300	46,84	307321
ВСЕГО	1277208	2,5	837500	1,66	-439708
ЛИТОРАЛЬ	11651381	22,86	11566446	22,87	-84935
ОЗЕРО	50960617	100,00	50566400	100,00	-394217

Ключевой особенностью рассматриваемого периода является резкая трансформация структуры доминирования макрофитов. Если в 1970-х гг. существенную долю зарастания обеспечивали многие виды, то в 2024 г. наблюдается явная тенденция к монодоминации камышом озёрным (Schoenoplectus lacustris (L.) Palla) и тростником южным (Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud.), доля которых в современной литорали достигла 46,8% и 24,3% соответственно. Причём площади этих видов демонстрируют стремительный рост (для камыша озёрного площадь увеличилась более чем в 4,6 раза, а для тростника южного – на 10%) (рис. 4) [5].

Одновременно существенно сократились площади зарастания такими ранее типичными видами, как тростянка овсяницевидная, рогоз узколистный, манник большой, что указывает на сокращение экологических ниш и вытеснение их более конкурентоспособными и толерантными видами.

Обращает на себя внимание сокращение общего биоразнообразия и резкая смена эколого-ценотических групп – от сходного по значимости участия различных макрофитов к выраженной монодоминации адаптированных видов. Обусловлено это, вероятно, сочетанием факторов стабильного или пониженного гидрологического режима, осевым развитием сукцессионных процессов, а также влиянием хозяйственной деятельности в водосборной и прибрежной зонах.

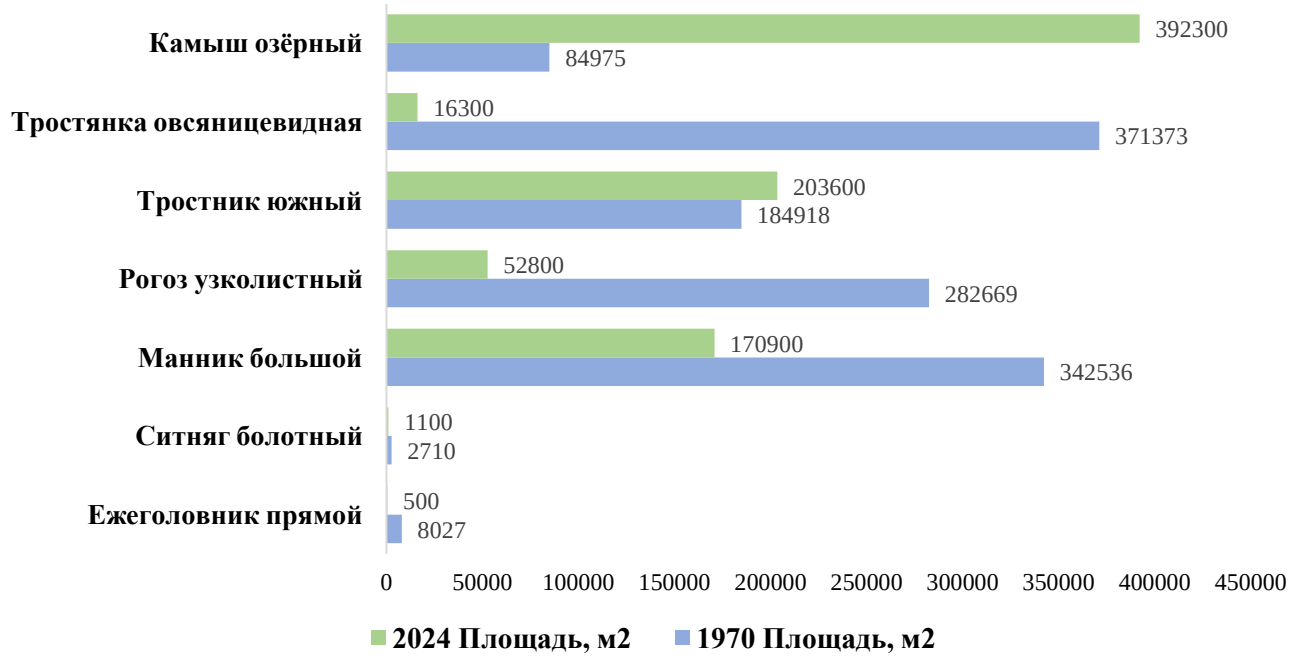


Рис. 4. Сравнительная характеристика площадей формаций доминантных видов растений прибрежно-водных сообществ, в 1970-х гг. и 2024 г, м^2

Fig. 4. Comparative characteristics of the areas of formations of dominant plant species of coastal aquatic communities, in the 1970s and 2024, m^2

Статистический анализ показал, что индекс видового разнообразия Шеннона снизился с 1,56 в 1970-х гг. до 1,07 в 2024 г., что подтверждает огрубение структуры и снижение равномерности видового распределения.

Динамика доминирования видов подвержена значительным изменениям. Индекс Бергера-Паркера, показывающий доминирование наиболее распространённых видов, возрос с 0,27 в 1970-х гг. до 0,47 в 2024 году. Это подчеркивает явное преобладание камыша озёрного в его ареале. Корреляционный анализ между площадями сокращения и степенью антропогенной нагрузки, учитывая количество рекреационных объектов, выявил достоверную положительную связь. Кроме того, агломеративный кластерный анализ показал формирование двух устойчивых типов сообществ: один тип представлен сообществами с преобладанием камыша озёрного и тростника южного, второй – реликтовыми фрагментами ослабленных таксонов.

В результате, современное сообщество прибрежной и литоральной зоны характеризуется как находящееся на стадии тенденциозного упрощения структуры. Подобное перераспределение свидетельствует о высокой степени адаптации камыша озёрного и тростника южного к изменяющимся условиям и позволяет рассматривать данные виды как биоаккумуляторы сукцессии зарастания, а также маркерные виды динамики трансформации водных и прибрежных экосистем [2, 6].

Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшего мониторинга литоральных зон озера Плещеево, а также реализации направленных мероприятий, способствующих поддержанию биоразнообразия и предотвращению деградации природных комплексов, что особенно актуально в условиях глобальных климатических изменений и продолжающейся антропогенной нагрузки.

4 Выводы

За последние пять десятилетий пространственно-временная структура макрофитных сообществ озера Плещеево претерпела значительные изменения, которые отражают как естественные процессы старения экосистемы, так и влияние антропогенных факторов. Несмотря на сохранение базовой структуры распределения водной растительности вдоль уреза воды, отмечено существенное сокращение площади покрытия и существенная потеря биоразнообразия.

В 1970-х гг. суммарная площадь зарослей водной растительности составляла 1,28 млн м², однако к 2024 году этот показатель сократился до 837,5 тыс. м². Такой спад свидетельствует о нарушении экологического баланса, связанном, прежде всего, с возросшей антропогенной нагрузкой и изменением гидрологического режима озера. Одновременно с этим наблюдается смещение в структуре сообществ: на первый план выходят адаптивные, устойчивые к стрессу виды, способные формировать монодоминантные сообщества. К числу таких видов относятся тростник южный и камыш озерный, которые вытесняют менее устойчивые элементы флоры.

Анализ изменений видового состава свидетельствует о том, что произошло упрощение структуры сообществ – индекс Шеннона снизился с 1,56 до 1,07. Это отражает тенденцию к одновидовому господству и сужению экологической ниши, что сопровождается снижением устойчивости экосистемы к внешним воздействиям. Фоновый уровень разнообразия снижается, и экосистема постепенно приобретает черты монокультуры с набором немногих устойчивых таксонов.

Тем не менее, пространственная стабильность основных полос прибрежно-водной растительности сохраняется благодаря физико-географическим и гидрологическим особенностям берега. Это смягчает последствия утраты частей биоразнообразия, обеспечивая относительную устойчивость базовых экосистемных процессов, таких как формирование микроклимата, фильтрация воды и поддержание среды обитания для гидробионтов.

Методология исследования, сочетающая многолетние полевые обследования, анализ снимков дистанционного зондирования и работу с ГИС-технологиями, позволила детально отследить тенденции деградации и определить базовые векторы изменений. Эти данные служат фундаментом для последующего стратегического мониторинга и разработки природоохранных мероприятий, адаптированных к современному состоянию озера Плещеево.

Таким образом, за последние 50 лет экосистема озера прошла путь от многовидовых и биологически насыщенных сообществ к устойчивому, но менее разнообразному состоянию. В новых условиях становится особенно важным продолжать регулярный мониторинг, чтобы своевременно реагировать на дальнейшие вызовы и риски, связанные с продолжающимся антропогенным воздействием и потенциально возрастающим влиянием климатических изменений [7].

Благодарности

Исследование выполнено в рамках студенческой экспедиции, которая состоялась в июле 2024 г. состоялась при поддержке программы «Открываем Россию заново», организованной Высшей школой экономии при поддержке президентской платформы «Россия — страна возможностей», программы Росмолодёжи «Больше, чем путешествие» и Русского географического общества (РГО).

Авторы выражают искреннюю благодарность Национальному парку «Плещеево озеро», Институту биологии внутренних вод РАН, Переславль-Залесскому историко-архитектурному и художественному музею-заповеднику за содействие и всестороннюю помощь в организации и проведении исследований. Особая признательность наставникам экспедиции – Галине Дмитриевне Кузнецовой, доценту кафедры космического мониторинга и экологии, руководителю Студенческого научно-образовательного центра МИИГАиК, и Виталию Викторовичу Браткову, профессору, заведующему кафедрой географии МИИГАиК; а также кураторам экспедиции: Марине Игоревне Андреевой (Национальный парк «Плещеево озеро») и Александру Игоревичу Цветкову (Институт биологии внутренних вод РАН).

Библиография

1. Филоненко И. В., Комарова А. С. Многолетняя динамика площади зарастания прибрежно-водной растительностью оз. Воже // Принципы экологии. 2015. № 4. С. 63–72. DOI: 10.15393/j1.art.2015.4622.

2. Чемерис Е. В., Кутузов А. В., Ефимов Д. Ю., Гришуткин О. Г. Изменение растительного покрова оз. Плещеево (Ярославская обл.) с 1899 по 2017 гг // Труды ИБВВ. РАН. 2020. №90 (93).

3. Папченков В. Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБиНТ, 2001. 213 с.

4. Преснухин В. И. Комплексные исследования инженерно-геологических, гидрологических условий и экологической обстановки Плещеева озера и окружающих территорий // Ярославский пед. вестн. 2010. Вып. 1. Сер. Физико-математические и естественные науки. С. 108–111.

5. Михайлова К.Б., Михалап С.Г. Исследование динамики зарастания литорали Псковского озера с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) // Труды КарНЦ РАН. 2021. № 9.

6. Розумная Л. А. Антропогенная эвтрофикация пресноводных озер средней полосы России // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 2.

7. Базарова Б.Б., Куклин А.П. Динамика биомассы и площади зарастания водной растительности озера Кенон (Забайкальский край) в условиях снижения уровня воды // Принципы экологии. 2023. №2 (48).

Spatial and Temporal Dynamics of the Vegetation of Lake Pleshcheyevo

Michael M. Nikonorov[1], Valeriy A. Ermolenkov[2],
[1] Samara National Research University, Samara, Russia
[2] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
*mishanikonorov2002@nextmail.ru

Keywords lake Pleshcheyevo, coastal and aquatic vegetation, macrophytes, eutrophication, remote sensing, biodiversity

Abstract The article is devoted to the study of the spatial and temporal dynamics of the vegetation of Lake Pleshcheyevo, located in the Yaroslavl region. The relevance of the work is due to significant changes in the ecosystem of the reservoir caused by anthropogenic pressure and eutrophication processes. The research was conducted in July-August 2024 and included a geobotanical description of the coastal-water vegetation with the determination of the species composition and projective coverage. Using remote sensing and GIS technologies, the area of overgrowth was assessed. The results showed a significant reduction in overall biodiversity and the dominance of pollution indicator species. The dynamics of the transformation of plant communities demonstrate the need for regular environmental monitoring of Lake Pleshcheyevo, as well as the development of recommendations for preserving its natural resources in the context of global climate change and increasing anthropogenic impact.

Acknowledgements

This research was carried out as part of a student expedition that took place in July 2024. It was supported by the "Rediscovering Russia" program organized by the Higher School of Economics with the support of the President platform "Russia is a Land of Opportunity", the Rosmolodezh program "More than a Journey" and the Russian Geographical Society (RGS).

The authors express their sincere gratitude to the Pleshcheyevo Lake National Park, the Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences, and the Pereslavl-Zalessky Historical, Architectural, and Art Museum-Reserve for their assistance and comprehensive assistance in organizing and conducting research. Special thanks to the mentors of the expedition – Galina D. Kuznetsova, Associate Professor of the Department of Space Monitoring and Ecology, Head of the MIIGAiK Student Scientific and Educational Center, and Vitaly V. Bratkov, Professor, Head of the Department of Geography of MIIGAiK; as well as the curators of the expedition: Marina I. Andreeva (Pleshcheyevo Lake National Park) and Alexander I. Tsvetkov (Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences).

УДК / UDC 556.5, 528.8

Состояние притоков реки Трубеж: комплексное исследование с применением дистанционного зондирования и полевых методов

В.Д. Дадайкина[1]*, Е.Д. Лошкова[1], В.А. Ермоленков[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

*dadaikinav@gmail.com





Ключевые слова дистанционное зондирование, гидрологический мониторинг, река Трубеж, экологическое состояние, водосборный бассейн, озеро Плещеево, геоинформационные технологии

Аннотация Представлены результаты комплексного исследования состояния притоков реки Трубеж – рек Ветлянка, Кипс, Мурмиш и Воргуша, выполненного в рамках проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро». Исследование включало анализ космических снимков для предварительной оценки изменений водной поверхности и последующее обследование наиболее проблемных участков. Выявлены основные факторы антропогенного воздействия на притоки: заиливание русел, загрязнение от очистных сооружений, нарушение прибрежных защитных полос. Гидрохимический анализ показал превышение предельно допустимых концентраций фосфатов и ионов аммония на реке Ветлянка.

1 Введение

Водные ресурсы представляют собой основу устойчивого функционирования экосистем и жизнедеятельности человека. Водопотребление в России сравнительно невелико, однако огромное число рек и водоёмов в результате хозяйственной деятельности загрязнено. В этой связи чрезвычайно важно правильно оценить имеющиеся водные ресурсы и степень их изменения [1], особенно в Центральной Европейской части России, на которую приходится наибóльшая плотность населения страны. Эти изменения обусловлены как климатическими флуктуациями, так и антропогенными факторами [2].

В современных условиях возрастающего антропогенного воздействия особую актуальность приобретает мониторинг состояния малых рек и их притоков, которые являются наиболее уязвимыми компонентами гидрографической сети. Река Трубеж и её притоки образуют основную речную систему бассейна Плещеева озера, расположенного в Ярославской области Российской Федерации. На реке Трубеж, как и на большинстве рек нашей страны, 60–70% годового стока проходит в сравнительно кратковременное весеннее половодье, в то время как наибольшая потребность в воде приходится на меженный, особенно летне-осенний период, когда реки имеют преимущественно подземное питание [2].

За последние два десятилетия интенсивное развитие технологий дистанционного зондирования Земли открыло новые возможности для эффективного мониторинга водных объектов. Применение методов спутниковой съёмки позволяет оперативно оценивать динамику изменений водной поверхности на обширных территориях, выявлять проблемные участки и планировать целенаправленные полевые исследования.

Водосборный бассейн озера Плещеево характеризуется сложной гидрологической структурой, в которой доминирующую роль играет речная система Трубежа. Согласно данным Национального парка «Плещеево озеро», на долю Трубежа и его притоков приходится 72% площади водосбора и около 84% годового поверхностного стока воды в озеро.

В исследованиях 2002 года[1] упоминается о потерях поверхностного стока со всей водосборной площади р. Трубеж. Происходит это за счет того, что притоки первого порядка – реки Ветлянка, Мурмиш, Кипс и другие – заилены, заросли водной растительностью, завалены ветками и стволами деревьев, забросаны бытовым мусором. На них устроены отводные каналы и плотины. В результате часть стока расходуется на фильтрацию и испарение.

Целью настоящего исследования является комплексная оценка современного экологического состояния притоков реки Трубеж с использованием методов дистанционного зондирования (ДЗЗ) и полевых наблюдений для разработки научно обоснованных рекомендаций по сохранению и восстановлению водных ресурсов региона.

[1] Отчет о результатах работ по теме: «Геологическое обоснование реконструкции дренажной сети для восстановления естественного стока Берендеевского болота в Переславском муниципальном округе». – Государственное геологическое предприятие «Центргеология», филиал «Экогеокомплекс», Министерство природных ресурсов Российской Федерации, Департамент природных ресурсов по Центральному региону. – Переславль, 2002, 33 с.

2 Материалы и методы

Исследование выполнено в рамках проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» и включало два основных этапа: анализ данных ДЗЗ в программе QGIS и полевое обследование притоков реки Трубеж.

2.1 Дистанционное зондирование

На первом этапе проводился анализ космических снимков со спутников Landsat-1 и Sentinel-2A исследуемой территории водосборного бассейна озера Плещеево с целью оценки состояния притоков р. Трубеж за последние несколько лет. Использовались многоспектральные спутниковые данные высокого и среднего пространственного разрешения, полученные с Earth Explorer, Google Earth и Google Earth Engine. Дешифрирование космических снимков осуществлялось с применением геоинформационных технологий QGIS и Google Earth. Особое внимание уделялось выявлению участков с нарушенным гидрологическим режимом, зон повышенного антропогенного воздействия и потенциальных источников загрязнения водотоков.

2.2 Полевые исследования

Речная система Трубежа включает 16 притоков различного порядка: 6 именованных рек (рис.1), 2 безымянных водотока и 8 крупных ручьёв.



Рис. 1. 6 именованных рек – притоков реки Трубеж
Fig. 1. 6 named tributary rivers of the Trubezh River

Наибольший практический интерес представляют именованные притоки, формирующие основную часть стока в реку Трубеж – Ветлянка, Мурмиш, Кипс и Воргуша. Выбор данных водотоков обусловлен их значительным вкладом в формирование гидрологического режима основного притока оз. Плещеево – реки Трубеж, и наличием потенциально проблемных участков, выявленных при анализе космических снимков.

Полевое обследование проводилось в июле 2024 в период межени. Методика полевых исследований включала визуальное обследование русел, выявление участков заиливания, нарушений прибрежных защитных полос и потенциальных источников загрязнения.

2.3 Гидрохимический анализ

На реке Ветлянка, на берегах которой расположены промышленные объекты, проводился отбор проб воды для последующего гидрохимического анализа в лабораторных условиях для определения концентрации основных биогенных загрязняющих веществ, включая ионы аммония, нитрит-ионы, нитрат-ионы и фосфат-ионы. Пробы воды отбирались дважды: 1-й раз в сухую погоду, 2-й раз – во время дождя. Лабораторный анализ отобранных проб воды осуществлялся в соответствии с действующими нормативными документами ПНД Ф. Результаты проведенного исследования загружены в ГИС, которая предназначена для сбора и анализа данных, а также для моделирования процессов и оценки экологических рисков[2].

3 Результаты и обсуждение

3.1 Характеристика водосборного бассейна

Анализ морфометрических характеристик показал, что водосборный бассейн реки Трубеж и её притоков занимает площадь 250,88 км², что составляет 79,1% от общей площади водосбора Плещеева озера. Эти данные отличаются от данных, предоставленных Национальным парком «Плещеево озеро» (247,02 км² и 74% соответственно) и требуют уточнения с обеих сторон.

3.2 Река Ветлянка

Наиболее интересной с точки зрения обследования является р. Ветлянка, поскольку она берёт начало из заболоченной местности вблизи Переславского кладбища и уже в самом верховье протекает мимо городских очистных сооружений. По данным анализа космических снимков было зафиксировано пересечение зоны очистных сооружений (иловых полей) и территории застройки с водоохранной зоной р. Ветлянка (рис. 2).

[2] Геоинформационная система «Интеллектуальный хранитель наследия Плещеево озеро» https://kartfak.ru/development/pleshcheyevo/#11.96/56.72546/38.78923/35.8/32



a) b)

Рис. 2. Река Ветлянка. Коричневым цветом обозначена прибрежная защитная полоса.
a) Нарушение прибрежной защитной зоны в районе очистных сооружений. (4329763 7714432).
b) Нарушение прибрежной защитной зоны в районе строительных объектов. (4329027 7714666).
Fig. 2. The Vetlyanka River. The coastal protective strip is marked in brown.
a) Violation of the coastal protection zone in the area of sewage treatment plants. (4329763 7714432).
b) Violation of the coastal protection zone in the area of construction sites. (4329027 7714666).

По результатам полевого обследования в р. Ветлянка зафиксировано интенсивное заиливание русла мощностью около 40 см. Русло истока реки характеризуется заболачиванием, а качество воды - повышенной мутностью (рис. 3). В русле наблюдается скопление твердых бытовых отходов, переносимых течением.



a) b)

Рис. 3. Исток р. Ветлянка: a) космический снимок; b) полевое обследование, заиленный исток р. Ветлянка
Fig.3. The source of the river Vetlyanka: a) satellite image. The water area is marked in orange;
b) field survey, silted source of the river. Vetlyanka

По ходу русла р. Ветлянка была выявлена критическая ситуация в районе очистных сооружений, где в результате анализа космических снимков и полевого обследования был

установлен факт размещения иловых полей в границах прибрежной защитной полосы (рис.4).



Рис. 4. Река Ветлянка. Коричневым цветом выделена прибрежная водоохранная зона, красным – территория очистных сооружений, оранжевым – территория сброса иловых отложений; синим – водное пространство. (4329768 7714277)
Fig. 4. The Vetlyanka River. The coastal water protection zone is highlighted in brown, the territory of sewage treatment plants is red, the territory of silt sediment discharge is orange, and the water area is blue. (4329768 7714277)

Пробы воды во время полевого обследования в этой зоне отбирались дважды. 1-й раз – в сухую погоду сток воды с территории сброса иловых отложений практически отсутствовал. 2-й раз – непосредственно во время дождя появился сток воды с этой территории. Гидрохимический анализ проб воды показал, что на подходе к иловым отложениям концентрация фосфат-ионов и ионов аммония была в норме и не превышала предельно-допустимые концентрации (0,62 ПДК). В точке, где происходит сток воды с иловых полей в реку – концентрация фосфат-ионов существенно превысила нормы (1,89 ПДК в сухую погоду и 5,28 ПДК во время дождя соответственно). После прохождения точки сброса концентрация фосфат ионов становится еще выше течению: в сухую погоду– 2,07 ПДК, во время дождя – 26,34 раза (рис. 5). Превышение ПДК ионов аммония наблюдалось во время дождя непосредственно вблизи стока в 4,98 раз (рис. 6).

Результаты этих наблюдений показали, что участок в верховьях р. Ветлянка требует пристального изучения и, возможно, регулярного мониторинга, поскольку объекты, находящиеся в границах водосборного бассейна на этой территории, могут быть источниками сильного диффузного загрязнения, особенно в период снеготаяния и дождей.

Анализ проб воды из р. Ветлянка, взятых вдоль промышленной зоны, не показал превышения концентрации фосфат-ионов и ионов аммония, за исключением точки на входе в промышленную зону (рис. 7). Однако следует отметить, что пробы отбирались в сухой день в межень. Для уточнения вклада этой территории в диффузное загрязнение следует провести более тщательное исследование, в том числе – в период половодья (весна) и/или в период дождей (осень).



Рис. 5. Концентрация фосфат-ионов в р. Ветлянка в районе иловых полей, выраженная в ПДК.

Fig.5. The concentration of phosphate ions in the Vetlyanka river in the area of self fields, expressed in MPC.



Рис. 6. Концентрация ионов аммония в р. Ветлянка в районе иловых полей, в ПДК.

Fig. 6. Concentration of ammonium ions in the Vetlyanka river in the area of silt fields, in MPC.

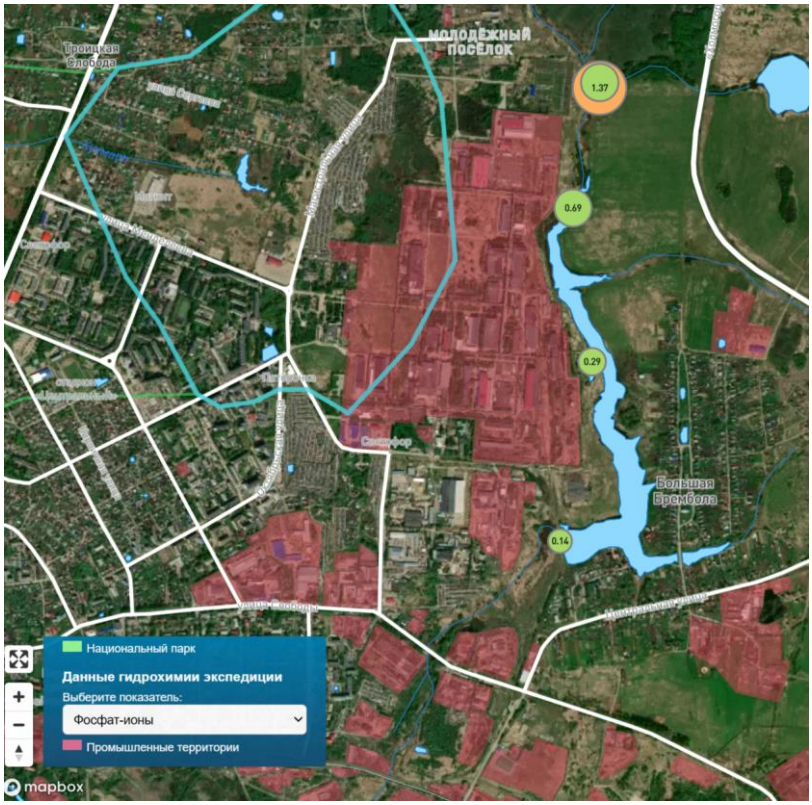


Рис. 7. Река Ветлянка. Прохождение водотока вдоль промышленной зоны. Концентрации фосфат ионов выражены в ПДК

Fig. 7. The Vetlyanka River. Passage of a watercourse along an industrial area. The concentrations of phosphate ions are expressed in MPC

3.3 Река Мурмиш

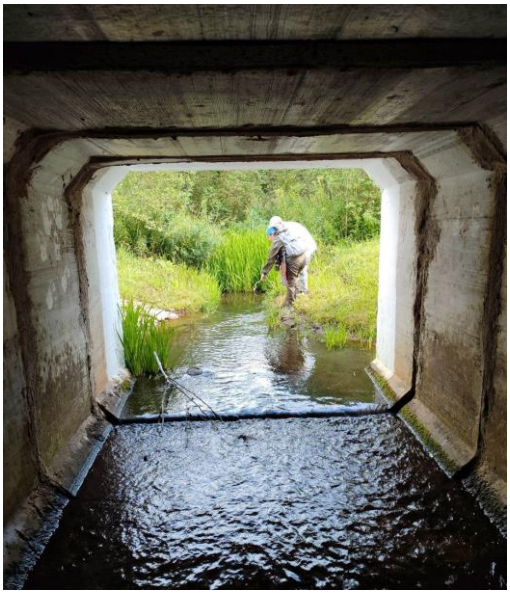
Анализ космических снимков показал, что р. Мурмиш характеризуется наличием искусственных расширений русла и изменением цвета воды в местах пересечения с транспортными коммуникациями (рис.8).



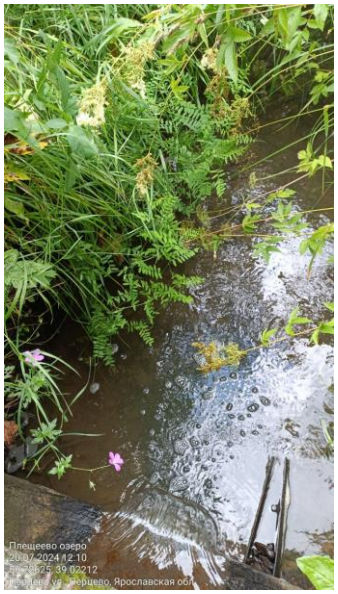
Рис. 8. Река Мурмиш. Расширение русла и изменение окраски воды в местах пересечения с транспортными коммуникациями. Коричневым цветом обозначена прибрежная защитная полоса. (4338606.6 7702512.3)

Fig. 8. Results of remote monitoring of the Murmish river with the presence of artificial channel extensions and changes in water color at the intersection with transport communications. The coastal protection zone is marked in brown. (4338606.6 7702512.3)

В рамках полевого обследования р. Мурмиш была выявлена значительная неоднородность скоростного режима течения по длине русла. В местах регулирования стока водопропускными трубами наблюдается увеличение скорости течения, тогда как на остальных участках отмечается замедление водотока, заиливание дна и зарастание водной растительностью (рис.9).



a)



b)



c)



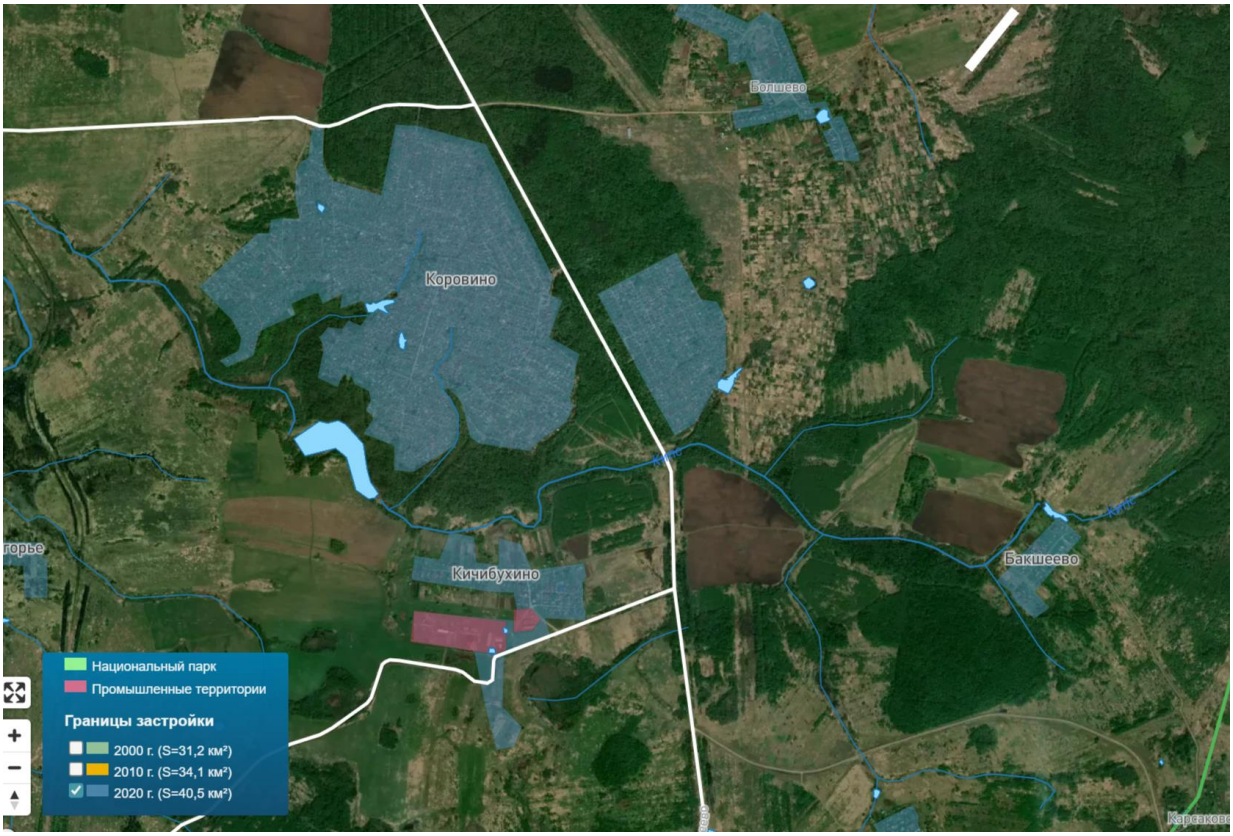
d)

Рис. 9. Река Мурмиш. a, b) Неоднородностью скоростного режима течения по длине русла (4335376.4 7705102.3);c) искусственная копань в районе села Перцево (4343460.0 7704078.0) d) Воды ливневой канализации, относящиеся к р. Мурмиш (4343460.0 7704078.0).

Fig. 9. Murmish River. a), b) Heterogeneity of the flow velocity along the length of the riverbed (4335376.4 7705102.3); c) artificial trench near the village of Pertsevo (4343460.0 7704078.0); d) Storm sewer waters related to the Murmish River (4343460.0 7704078.0).

В районе села Перцево выявлена искусственная копань правильной геометрической формы (рис. 9c). Водоснабжение населённого пункта осуществляется из подземных источников, а к р. Мурмиш отводятся воды ливневой канализации (рис. 9d).

3.4 Река Кипс



a)



b)



c)

Рис. 10. Река Кипс. Расширение русла в районе дачного посёлка Коровино (4338889 7697026), a) идентифицированное по космическим снимкам (оранжевым цветом обозначено водное пространство); b) обнаруженное во время полевого обследования. c) гидротехническое сооружение, препятствующее свободному стоку воды (4343029 7703942).

Fig. 10. The Kips River. Widening of the riverbed in the area of the dacha village of Korovino (4338889 7697026), a) identified from satellite images (water area is indicated in orange); b) found during a field survey. (c) A hydraulic structure that prevents the free flow of water (4343029 7703942).

На реке Кипс по результатам предварительного анализа космических снимков было идентифицировано расширение русла в районе дачного посёлка Коровино, предположительно связанное с устройством плотины (рис. 10a).

Во время полевого обследования русла реки Кипс было обнаружено, что на участке от истока до заболоченной территории в районе деревни Бакшеево русло представлено переувлажнёнными почвами с периодическим образованием временных водоёмов и характеризуется фрагментарным поверхностным стоком. По мере увеличения протяжённости наблюдается формирование устойчивого течения. В районе деревни Коровино зафиксировано образование искусственного водоёма (рис. 10 b), связанного с наличием гидротехнического сооружения, препятствующего свободному стоку воды (рис.10 c).

Поскольку значительная часть реки Кипс проходит вдоль неканализированной застроенной территории (дачный поселок Коровинно), а также вдоль распаханных полей, септики и удобрения могут вносить существенный вклад в диффузное загрязнение озера, попадая сначала водоток реки Кипс, которая является притоком реки Трубеж (основного притока озера Плещеево).

3.5 Река Воргуша

Река Воргуша берет начало неподалеку от н.п. Троицкое, в верховьях характеризуется минимальным расходом воды и фрагментарным течением с частым переходом в подземный сток, протекает через распаханные поля, вдоль юго-западной границы г. Переславль-Залесский и, перед слиянием с р. Трубеж, возможно, разбирается на орошение полей (рис. 11). В местах пересечения транспортных коммуникаций в воде обнаружен налёт оранжевого цвета, свидетельствующий о возможном загрязнении (рис.12a). На берегах реки выявлены несанкционированные свалки бытовых отходов, представляющие потенциальную угрозу для качества водных ресурсов (рис.12b, 12c).



Рис. 11. Река Воргуша. Мелиорационные каналы в устье реки перед впадением в р. Трубеж (4325930 7704046)

Fig. 11. The Vorgusha River. Reclamation channels at the mouth of the river before the confluence with the Trubezh River (4325930 7704046)



a)



b)



c)

Рис. 12. Река Воргуша. a) Водоток оранжевого цвета в местах пересечения транспортных коммуникаций (4323098.7 7698610.4). Несанкционированные свалки бытовых отходов на берегах
a) координаты 4321518.3,7697308.3;
b) координаты 4321568.6 7696944.1

Fig.12. The Vorgusha River. a) Orange-colored watercourse at the intersection of transport communications (4323098.7 7698610.4). Unauthorized landfills of household waste on the shores:
a) coordinates 4321518.3,7697308.3;
b) coordinates 4321568.6 7696944.1

4 Обсуждение

Не все участки доступны для проведения полевых обследований ввиду трудной доступности. Тем не менее, результаты, полученные на основании проведенного комплексного исследования, свидетельствуют о неудовлетворительном экологическом состоянии притоков реки Трубеж по состоянию на июль 2024 года. На рис.13 представлена карта-схема проблемных участков притоков Трубежа, которые удалось пройти и обнаружить в рамках полевого обследования. Основные виды проблемных участков – нарушенный (фрагментарный) водоток в верховьях рек, заиленный водоток, поля иловых отложений (в районе городских очистных сооружений), нарушающие границу водоохраной зоны р. Ветлянка, несанкционированные свалки мусора на берегах рек, гидротехнические сооружения, многие из которых заброшены и забиты мусором. Основными факторами деградации водных экосистем, наряду с климатическими изменениями, являются

антропогенное воздействие и недостаточная эффективность природоохранных мероприятий [2].



Рис. 13. Карта-схема проблемных участков на притоках р. Трубеж – р.Ветлянка, р.Воргуша, р.Кипс и р.Мурмиш, выявленных во время полевого обследования (июль 2024 г.)
Fig. 13. Map of problem areas on the tributaries of the Trubezh River – the Vetlyanka River, the Vorgusha River, the Kips River, and the Mummish River, identified during the field survey (July 2024)

Особую тревогу вызывает состояние реки Ветлянка, где зафиксированы значительные превышения нормативов качества воды по содержанию биогенных элементов. Размещение иловых полей в пределах водоохранной зоны представляет прямое нарушение природоохранного законодательства и требует мер по устранению. Участок водотока р. Ветлянка, проходящего вдоль очистных сооружений, рекомендуется взять под контроль и определить точку для регулярного мониторинга, поскольку эта территория может составлять значительный вклад в диффузное загрязнение стока реки Ветлянка и, соответственно, реки Трубеж и озера Плещеево. Несмотря на тот факт, что во время полевого обследования в пробах воды реки Ветлянка, взятых вдоль промышленной зоны в условиях сухой погоды в период межени, не обнаружено существенных превышений ПДК, этому участку реки также следует уделять особое внимание в мониторинге гидрохимического состояния, поскольку данные наблюдений Национального парка

«Плещеево озеро» показывают регулярное превышение ПДК фосфат-ионов ниже по течению в 1.5-3,5 раза, и эпизодическое превышение ПДК ионов аммония и нитрат-ионов[3]. Для определения основных источников загрязнения следует организовать исследование гидрохимических показателей в разных погодных условиях, в том числе - во время половодья и дождей.

Процессы заиливания русел, характерные для всех обследованных притоков, обусловлены нарушением естественного гидрологического режима вследствие антропогенного воздействия. Строительство гидротехнических сооружений и отсутствие контроля за их состоянием приводит к формированию застойных зон и ухудшению качества воды.

Полученные данные подтверждают эффективность комплексного подхода, сочетающего методы дистанционного зондирования с полевыми исследованиями. Космические снимки позволяют выявлять проблемные участки на обширных территориях, тогда как наземные обследования обеспечивают детальную характеристику локальных особенностей и причин наблюдаемых явлений.

5 Выводы

Водосборный бассейн Трубежа формирует основную часть наземного стока воды в Плещеево озеро, что определяет его ключевую роль в функционировании всей экосистемы озера.

Комплексное обследование притоков реки Трубеж в результате сочетания методов ДЗЗ, гидрохимического исследования воды и полевого визуального обследование состояния русел выявило серьёзные нарушения экологического состояния речной системы, требующие принятия природоохранных мер.

Гидрохимическое загрязнение р. Ветлянка биогенными элементами создаёт угрозу диффузного загрязнения, особенно в период половодья и дождей, и требует более тщательного изучения и устранения источников поступления загрязняющих веществ. Процессы заиливания и зарастания русел притоков обусловлены не только естественными процессами старения водных экосистем, но и комплексом антропогенных факторов. Проведенное обследование позволяет однозначно утверждать, что для оздоровления озера Плещеево необходимы не только мероприятия, направленные на само озеро, но в первую очередь необходима разработка комплексной программы восстановления экологического состояния притоков реки Трубеж, включающей мероприятия по устранению источников загрязнения, восстановлению прибрежных защитных полос и расчистке русел для увеличения проточности. Разработка такой программы требует предварительного

[3] Данные мониторинга Национального парка в геоинформационной системе «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро»
https://kartfak.ru/development/pleshcheyevo/#9.44/56.675/39.0124

более детального комплексного исследования на основе гидрологических, гидрохимических методов и методов ДЗЗ, которое позволит определить источники загрязнения и потерь водного стока и обосновать меры по совершенствованию антропогенного воздействия на водные ресурсы бассейна озера Плещеево.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках студенческой экспедиции при поддержке программы «Открываем Россию заново», организованной Высшей школой экономики при поддержке президентской платформы «Россия — страна возможностей», программы Росмолодёжи «Больше, чем путешествие» и Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество».

Авторы выражают благодарность администрации Национального парка «Плещеево озеро» за содействие в организации полевых исследований и предоставление материалов для анализа, а также всем участникам исследовательской группы.

Библиография

1. Научные основы мониторинга качества вод / А. М. Никаноров. - СПб. : Гидрометеоиздат, 2005. - 575 с.

2. Оценка антропогенных воздействий на водные ресурсы России / Н. И. Коронкевич, Е. А. Барабанова, А. Г. Георгиади [и др.] // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89, № 6. – С. 603-614. – DOI 10.31857/S0869-5873896603-614. – EDN ZSNAZF.

State of the Trubezh River Tributaries: Comprehensive Study using Remote Sensing and Field Methods

Vasilisa D. Dadaikina[1], Ekaterina D. Loshkova[1], Valeriy A. Ermolenkov[1]
[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
***** dadaikinav@gmail.com

Keywords remote sensing, hydrological monitoring, Trubezh River, ecological state, watershed basin, Pleshcheyevo Lake, geoinformation technologies

Abstract The results of a comprehensive study on the tributaries of the Trubezh River - the Vetlyanka, Kips, Murmish, and Vorgusha rivers - conducted as part of the Plescheyevo Lake Intellectual Heritage Keeper project are presented. The study involved an analysis of satellite imagery to preliminarily assess of water surface changes and a subsequent survey of the most problematic areas. The main factors of anthropogenic impact on the tributaries were identified: siltation of river beds, pollution from sewage treatment plants, and violations of coastal protection zones. Hydrochemical analysis revealed that

the maximum allowable concentrations of phosphates and ammonium ions were exceeded in the Vetlyanka River.

Acknowledgements

The research was carried out as part of a student expedition supported by the Rediscovering Russia program, organized by the Higher School of Economics with the support of the presidential platform "Russia is a Land of Opportunity", the Rosmolodezh program "More than a Journey" and the All—Russian Public organization "Russian Geographical Society".

The authors would like to thank the administration of the Pleshcheyevo Lake National Park for their assistance in organizing field research and providing materials for analysis, as well as all participants in the research group.

УДК 504/ UDC 528.0, 502.3/.7

Комплексная оценка антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево

Г.Г. Шилов [1]*
1 Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
*kf.shilov@yandex.ru



Ключевые слова озеро Плещеево, водосборный бассейн, антропогенная нагрузка, ретроспективный анализ, дистанционное зондирование Земли, ДЗЗ, геоинформационное моделирование

Аннотация Усиление антропогенного воздействия на ограниченные и неравномерно распределенные водные ресурсы на территории водосборного бассейна обусловливает необходимость его комплексной оценки. Благодаря использованию разновременных данных дистанционного зондирования Земли и применению методов геоинформационного моделирования водосборные бассейны можно рассматривать как целостные геосистемы в динамике, анализируя изменение основных форм природопользования и типов антропогенного воздействия. Объектом исследования в данной работе является бассейн озера Плещеево – уникальный природно-территориальный комплекс на юге Ярославской области с историко-культурным центром – городом Переславлем-Залесским. В работе проведен анализ изменения доли лесов, земель сельскохозяйственного назначения и селитебных земель в ретроспективе 2000-2020 гг, морфометрический анализ на основе цифровой модели рельефа. Результаты представлены в виде оценочной карты.

1 Введение

В настоящее время отсутствует полный и систематизированный анализ антропогенного воздействия на водосбор озера Плещеево, в котором учитывались бы динамика и состояние лесного покрова, урбанизированных территорий, сельскохозяйственных угодий, а также оценивались изменения доли площади населенных пунктов относительно уклонов рельефа с помощью морфометрического анализа. Необходимость в таком анализе обусловлена ухудшением свойств природных вод озера Плещеево и возникновению предпосылок для угроз здоровью человека [1].

В рамках текущего исследования были выполнены:

- ретроспективный анализ землепользования в границах водосбора за период 2000-2024 гг. на основе архивных данных и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);
- расчет интегральных показателей антропогенной нагрузки в динамике за исследуемый период;
- создание интегральной оценочной карты антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево.

2 Материалы и методы

В рамках выполнения работ данного исследования применялись:

- метод геоинформационного моделирования, для которого в качестве инструмента был использован калькулятор растров в QGIS 3.42;
- метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в том числе с применением алгоритмов машинного обучения на платформе Google Earth Engine;
- метод пространственного анализа;
- картографический метод исследования.

В рамках ретроспективного анализа в качестве данных дистанционного зондирования были использованы космические снимки спутников Landsat-5 и Landsat-8 с пространственным разрешением 30 м за летний период, характеризующие состояние местности во временном диапазоне 2000-2024 гг. с интервалами в пять лет (*±1 год*) (табл. 1). В качестве цифровой модели рельефа была использована DEM SRTM с пространственным разрешением 30 м. Объекты гидрографии и границы населенных пунктов уточнялись полуавтоматически по данным Единой электронной картографической основы (ЕЭКО).

Таблица 1. Метаданные спутниковых снимков.
Table 1. Imagery metadata

Идентификатор	Дата	Облачность, %
LT05_L2SP_177021_20010724_20200905_02_T1	2001-07-24	3.0
LT05_L2SP_177021_20050820_20200902_02_T1	2005-08-20	0
LT05_L2SP_177021_20100701_20200823_02_T1	2010-07-01	0
LC08_L2SP_177021_20150613_20200909_02_T1	2015-06-13	4.64
LC08_L2SP_178021_20210620_20210629_02_T1	2021-06-20	0.25
LC08_L2SP_177021_20240707_20240712_02_T1	2024-07-07	1.56

2.1 Ретроспективный анализ

Ретроспективный анализ за период 2000-2020 гг. был проведен в пределах водосборного бассейна озера Плещеево. Цель анализа – определить динамику и изменение доли площади лесов, селитебных земель и земель сельскохозяйственного назначения за рассматриваемый период, а также провести морфометрический анализ.

Площадь водосбора составляет 485 км², включая водосбор озера Плещеево (351 км²) и Берендеевского болота (134 км²). Берендеевское болото включено в водосбор озера Плещеево в связи с тем, что исток реки Трубеж – крупнейшего притока озера – берет начало в его границах. Площадь зеркала озера Плещеево составляет 51 км², в него впадают 19 рек и ручьев, вытекает одна река – Вёкса Плещеевская. В пределах водосбора озера Плещеево расположены 86 населенных пунктов, в том числе центр муниципального округа – город Переславль-Залесский. Озеро Плещеево является частью водосбора реки Волги [4].

2.1.1 Лесная растительность

Изменение площади лесного покрова оценивалось по данным дистанционного зондирования с помощью широко используемого в задачах обучаемой кластеризации изображений метода k-means [5] с параметрами выборки из 5000 пикселей и количеством кластеров равным 5:

$$X = x1, x2, \dots, xn, k = 5, n = 5000$$

где X – множество пикселей обучающей выборки, k – число кластеров, n – количество обучающих пикселей.

Операция выполнялась в автоматическом режиме в среде Google Earth Engine. В результате были получены данные об изменении доли площади лесов (рис. 1) и 6 растров с выделенными на них пикселями лесной растительности (рис. 2).

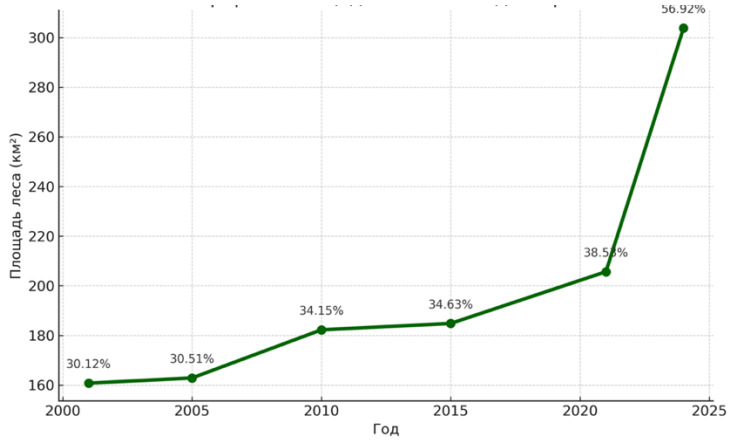


Рис. 1. Прирост площади лесной растительности, 2000-2024 гг.

Fig. 1. Forest area increase, 2000–2024

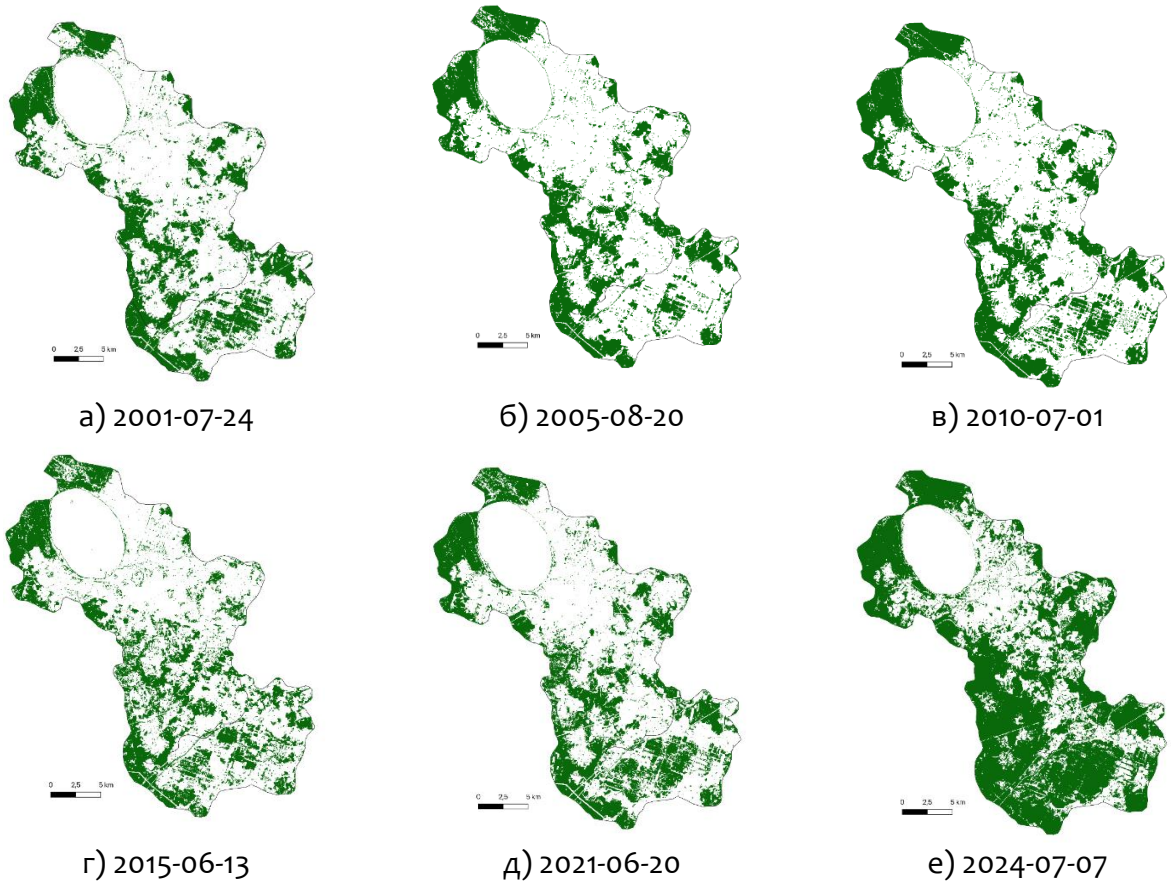
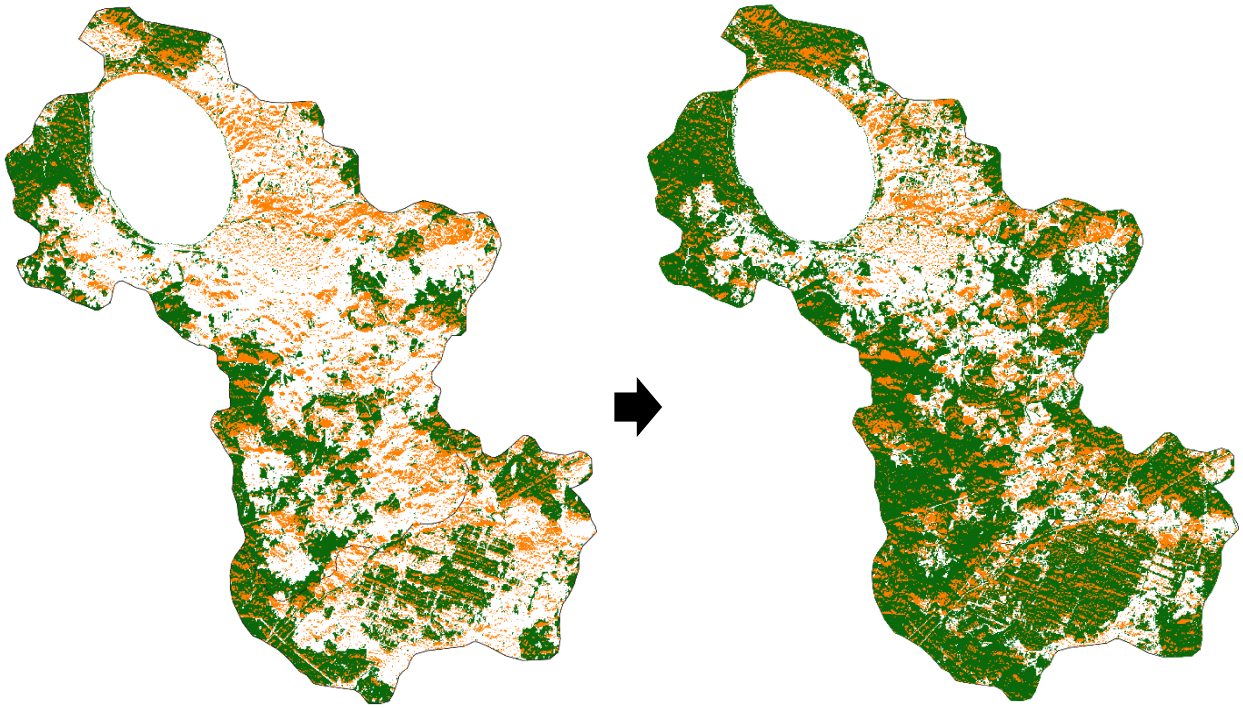


Рис. 2. Динамика изменения площади лесной растительности, 2000–2024 гг.
Зеленым цветом показаны леса.
Fig. 2. Forest area change dynamics, 2000–2024. Forested areas are shown in green.

По результатам обработки цифровой модели рельефа инструментами анализа рельефа «Экспозиция» в QGIS получен растр, отображающий склоны южной экспозиции (рис. 2). Оверлейные операции позволили оценить долю лесов, прирост которых пришелся на склоны южной экспозиции (170-190°), и на которых лесовосстановление происходит активней за счет экспозиционной асимметрии, роста температур и текущих климатических трендов.



а) 2000 г. б) 2024 г.

Рис. 2. Морфометрический анализ прироста лесной растительности относительно склонов южной экспозиции, 2000 (а) и 2024 (б). Зеленым цветом показаны леса, оранжевым – участки склонов южной экспозиции.

Fig. 2. Morphometric analysis of forest growth in 2000 and 2024. Forested areas are shown in green, the south-facing slope sections are shown in orange.

2.1.2 Урбанизированные территории

Динамика изменений застроенных территорий рассматривается с периодичностью в 10 лет, что обусловлено отсутствием значительных изменений по пятилетиям. Границы селитебных земель уточнены при помощи нормализованного разностного индекса застройки NDBI[1]. Метод пространственного анализа позволил оценить направление и масштаб прироста урбанизированных территорий в рассматриваемом временном диапазоне (рис. 3).

$$\mathrm{NDBI} = \frac{\mathrm{SWIR} - \mathrm{NIR}}{\mathrm{SWIR} + \mathrm{NIR}}$$

На рисунке 3 можно видеть, что основное направление застройки, которое развивалось к 2024 году, — это истоки малых притоков озера на востоке и юго-востоке.

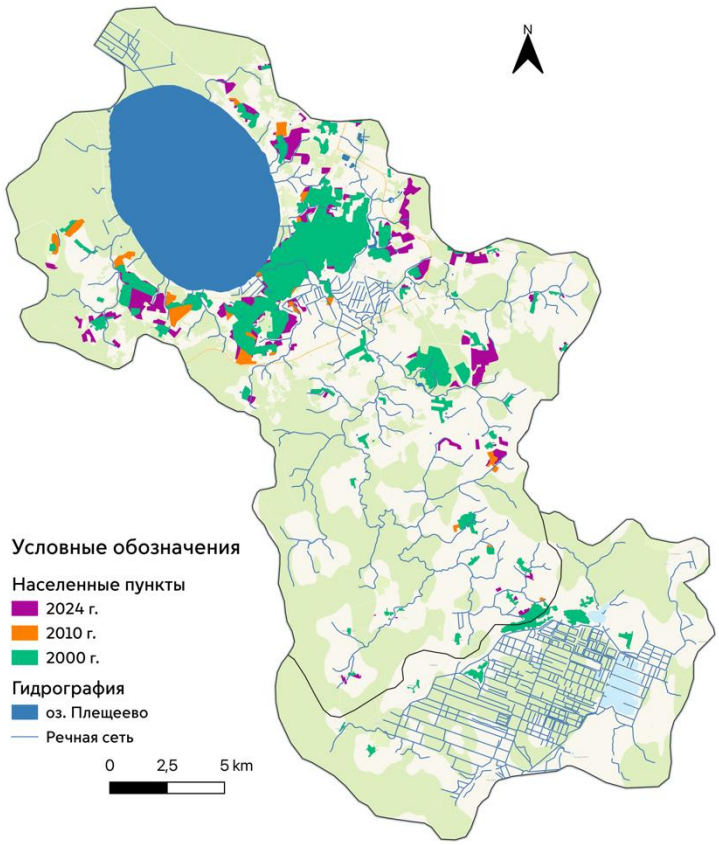


Рис. 3. Изменения площади застроенных территорий.

Fig. 3. Built-up area changes dynamics.

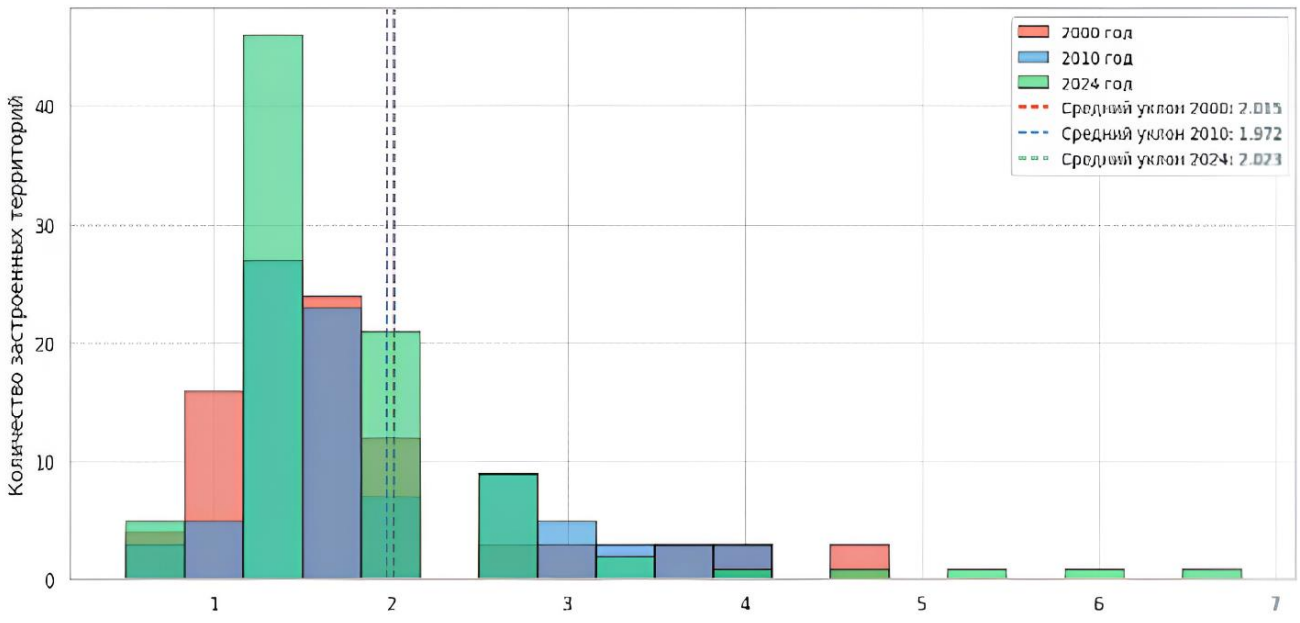


Рис. 4. Распределение застроенных территорий по уклону поверхности земли (2000, 2010 и 2024 гг.)
Fig.4. Distribution of built-up areas by surface slope (2000, 2010, and 2024)

На рисунке 4 представлено распределение застроенных территорий по уклону. График демонстрирует, что до 2024 года максимальные значения уклонов, где размещалась

застройка, не превышали 4°, в то время как границы застройки 2024 года уже попали на уклоны выше 4°.

На следующей карте (рис. 5) показан прирост застройки относительно уклонов рельефа по результатам морфометрического анализа. Такой анализ позволяет оценить и выявить основные тенденции в развитии урбанизированных территорий и возникшие вследствие его роста угрозы для окружающей среды, а именно усиление эрозии и дефляции, нарушение естественного дренажа, повышение риска деградации почв, утрата растительного покрова, загрязнение верховий притоков озера.

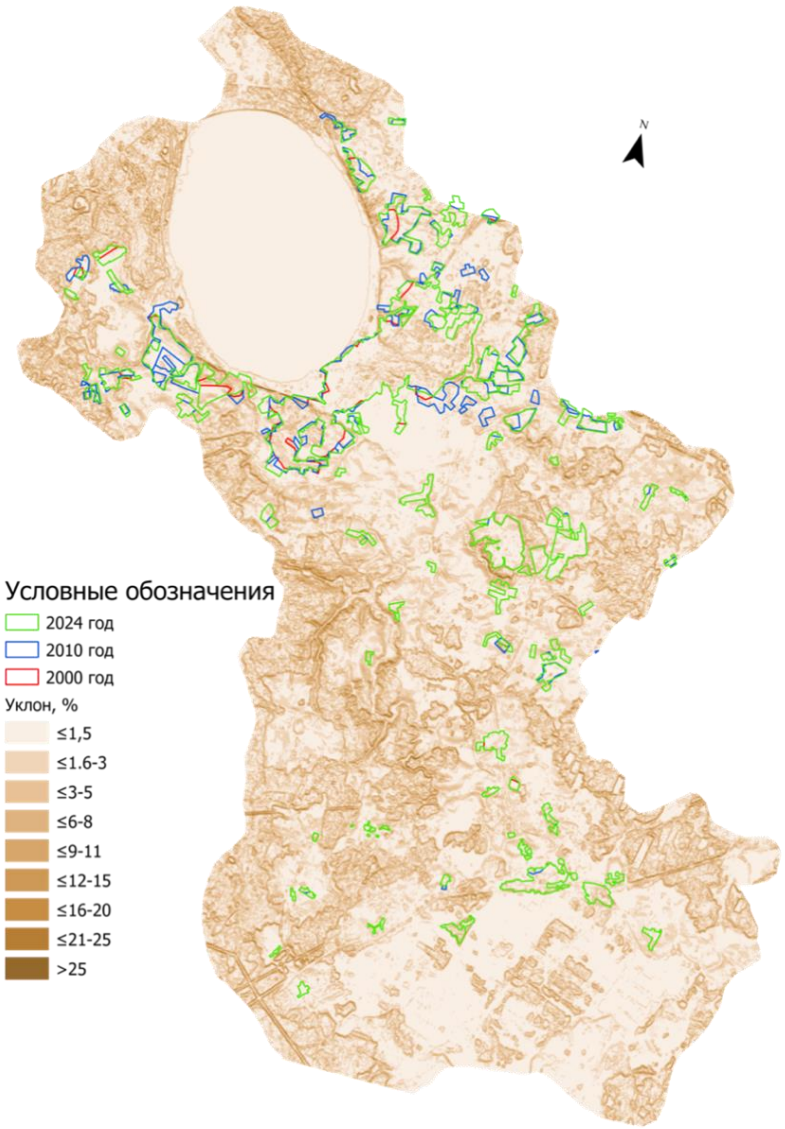


Рис. 5. Анализ прироста застроенных территорий относительно уклонов рельефа

Fig. 5. Analysis of built-up area expansion in relation to terrain slopes

2.1.3 Земли сельскохозяйственного назначения

Изменения площади сельскохозяйственных угодий оценивались по спутниковым снимкам в полуавтоматическом режиме. С применением оверлейных операций в QGIS выявлены участки с постоянно используемыми землями и места, которые впервые применялись в хозяйстве (рис. 6). Основной прирост обрабатываемых земель наблюдается на юге и юго-востоке водосбора и на верховьях притоков озера. Последнее связано,

вероятно, с развитием частных локальных хозяйств, что может вносить как позитивный, так и негативный вклад в зависимости от ответственности каждого конкретного землепользователя.

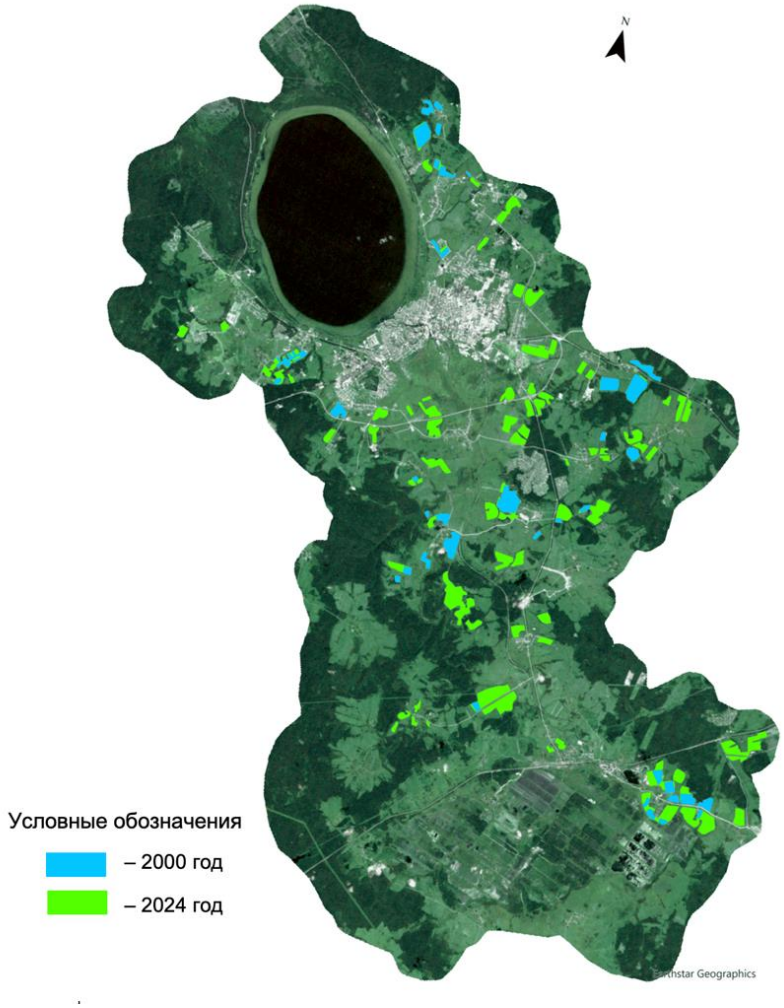


Рис. 5. Изменения площади земель сельскохозяйственного назначения

Fig. 5. Analysis of built-up area expansion in relation to terrain slopes

2.2 Геоинформационное моделирование

2.2.1 Расчет интегральных показателей

Геоинформационное моделирование направлено на создание тематической карты, которая отображает пространственное распределение и интенсивность нагрузки (частоту) на водосбор по типам землепользования. Подготовленные растровые данные в единой системе координат и с унифицированным пространственным охватом и разрешением были обработаны посредством калькулятора растров в QGIS.

Первично были созданы три интегральных растра, где для каждого типа землепользования задан вес, соответствующий условному уровню антропогенной нагрузки: лесная растительность – 1, земли сельскохозяйственного назначения – 2, селитебные земли – 3. Таким образом, задана градация перехода от минимально измененных экосистем через

умеренно трансформированные к сильно преобразованным территориям. Ниже представлено выражение QGIS для задания ранга по типу землепользования, где np_*год* – растры населенных пунктов, agro_*год* – растры земель сельскохозяйственного назначения, f_*год* – растры леса:

("np_2000_tr_3@1" = 3) * 3

+ ("np_2000_tr_3@1" != 3 and "agro_2000_tr_2@1" = 2) * 2

+ ("np_2000_tr_3@1" != 3 and "agro_2000_tr_2@1" != 2) * "f_2001_tr@1"

Затем были созданы растры разности ("raster1@1" - "raster2@1"), позволяющие оценить степень изменчивости по типу землепользования.

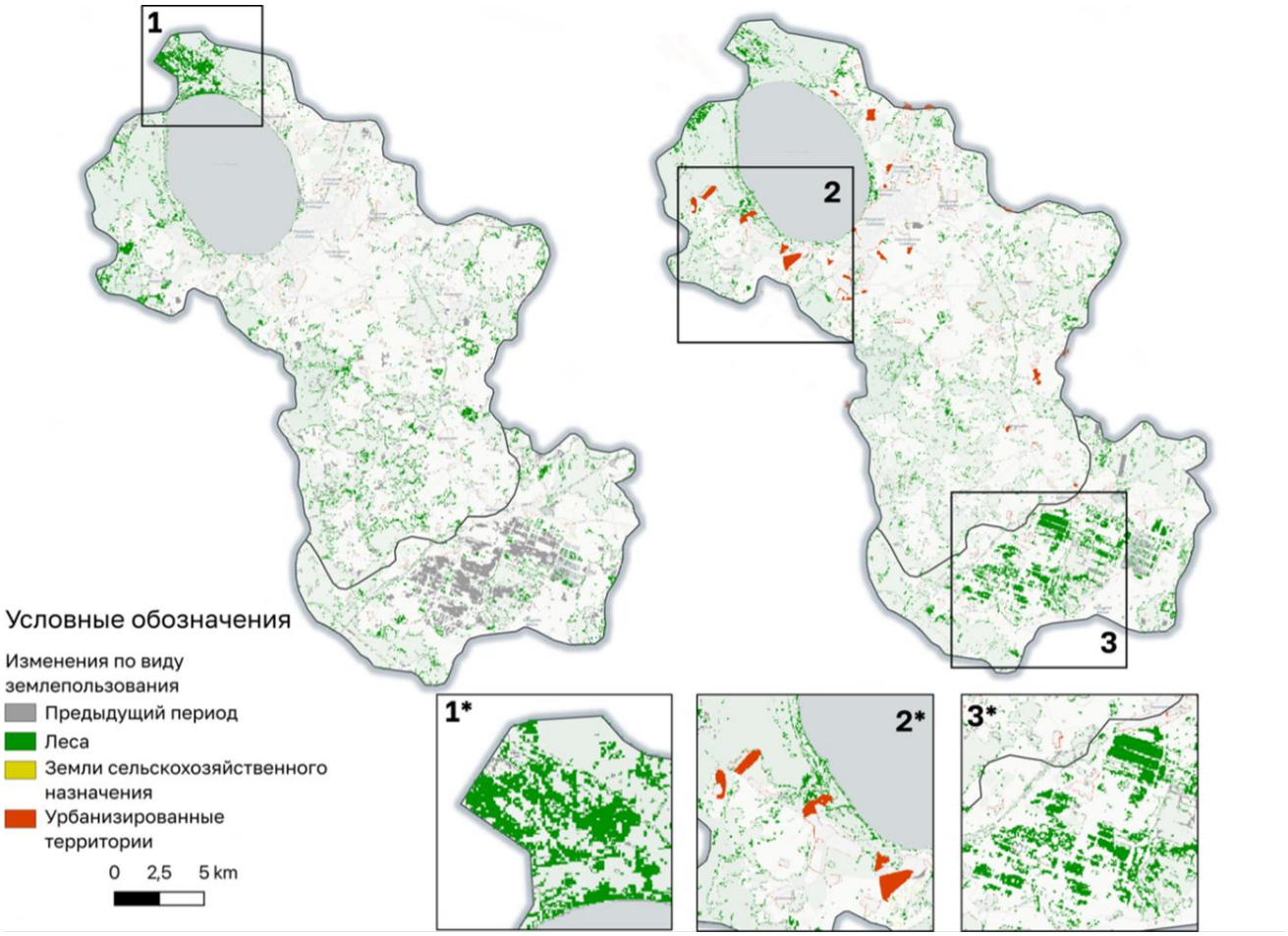


Рис. 7. Разностные растры с визуальным дешифрированием, отмеченным во врезках
Fig. 7. Difference rasters with visual interpretation highlighted in insets

В результате побитовых операций вычитания пар последовательных растровых карт получены шесть разностных растров, характеризующих произошедшие изменения в диапазоне 2000-2005 и 2005-2010 гг., 2010-2015 и 2015-2020 гг., 2020-2024 гг., на которых с помощью визуального дешифрирования выявлены локальные очаги возрастания или снижения антропогенной нагрузки, что позволяет проанализировать динамику изменений с

шагом в 5 лет (рис. 7). Участок №1 и №3 отображает значительный прирост лесной растительности на болотистых почвах, когда участок №2 отображает постоянный прирост урбанизированных территорий на левом берегу озера.

2.2.3 Создание интегральной оценочной карты

Создание итоговой интегральной карты заключается в вычислении усредненных показателей по данным шести разностных растров в целях экодиагностики территории. Для оценки нарушенности был принят условный вид: незначительная, низкая, средняя и высокая антропогенная нагрузка.

Сначала суммируются все интегральные растры в калькуляторе растров, позволяющем применять арифметические и логические выражения к растровым слоям, а далее происходит деление на их общее количество. Таким образом, на полученном итоговом растре величина в каждом пикселе характеризует среднее антропогенное воздействие за период 2000-2024 гг. в зависимости от качества изменений, например, если прирост урбанизированных территорий в разрезе анализируемых 24 лет был средним, то в ходе вычислений он отобразится на соответствующем уровне с учетом заданного параметра веса. Участок с постоянным приростом леса в течение 24 лет с учетом веса равного «1» в ходе оценки покажет низкую нарушенность территории.

$$A(x,y) = \frac{1}{n} \sum_{t\epsilon \begin{Bmatrix} 2000, \\ 2005, \\ 2010, \\ 2015, \\ 2020, \\ 2024 \end{Bmatrix}} Rt\,(x,y)$$

где A(x,y) – среднее значение антропогенной нагрузки в пикселе за период 2000–2024 гг., Rt(x,y) – значение интегрального показателя в году t, n – количество шагов (n=6).

Полученная растровая карта представляет из себя карту оценки антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево (рис. 8).

Визуализация была выполнена с применением шкалы от белого (незначительная нагрузка) через светло-розовый (низкая), розовый (средняя) к красному (высокая нагрузка).

3 Результаты и обсуждение

Результаты анализа изменения доли площадей по типам землепользования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Изменения по видам землепользования 2000-2024 гг.
Table 2. Changes in Land Use types 2000-2024

Период	Изменения по видам землепользования (прирост км²/доля S) S водосбора 485 км²		
	Лесистость	Распаханность	Селитебные земли
2000-2005	2.09 / 33,5%	6,51 / 1,3%	31,2 / 6,4%
2005-2010	19.40 / 37,5%		
2010-2015	2.57 / 38,1%	12,84 / 2,65%	34,1 / 7%
2015-2020	20.8 / 42,4%		
2020-2024	98.1 / 62,6%		43,1 / 9%

Доля лесов увечилась с 160,7 км² до 303,8 км² или с 30 до 56% от общей доли водосбора. Основной прирост приходился на малонаселенные участки на юго-западе и юге бассейна, в том числе существенный прирост выявлен на Берендеевском болоте. Это связано, в первую очередь, с естественным восстановлением лесов за счет климатических факторов – более влажной фазы и ростом средних температур, а также изменениями в землепользовании, значительно снизивших антропогенное воздействие на эти участки [6]. Морфометрический анализ прироста лесной растительности показал, что основной объем приросших лесов расположен на склонах южной экспозиции.

Увеличение доли лесной растительности на водосборе – позитивная тенденция, однако для комплексной оценки устойчивости этих экосистем к меняющимся условиям климата необходим постоянный мониторинг их состояния. Кроме того, необходимость в лесовосстановительных мероприятиях и защите леса обусловлена важной ролью лесных экосистем в поддержании биоразнообразия, регулировании климата и обеспечении экологической устойчивости и безопасности региона и страны.

Доля селитебных земель на водосборе за четверть века возросла с 31,2 км² до 43.1 км² или с 6% до 8% от общей площади бассейна. Основное направление роста – юг и юго-восток и в основном – пригородные районы Переславля-Залесского, хотя карта изменения площади застроенных территорий отображает реальную ситуацию – от западных берегов озера через южные и к восточным берегам сегодня господствуют урбанизированные территории. Основная застройка – малоэтажный частный сектор.

Известно, что рациональным и экономически выгодным считается строительство на склонах с уклоном до 2 градусов [7]. Такие участки обеспечивают более стабильные условия для возведения зданий, минимизируют экономические затраты. Кроме того, пологие склоны способствуют естественному отводу поверхностных вод, снижая риск эрозии и подтоплений, а также упрощают прокладку коммуникаций и транспортных путей. Морфометрический анализ прироста застроенных территорий относительно уклонов рельефа показал, что в начале 2000-х гг. застроенные территории не попадали на участки, уклон которых превышает 4°, а к 2024 году застроенные территории отмечаются на участках с уклоном до 7° и основное направление этого прироста – верховья малых притоков озера.

Последствия истощения и загрязнения подземных и поверхностных вод как важнейших элементов земных недр мало изучены научным сообществом, а потому тенденция застройки участков верховий малых притоков, с последующей организацией скважин и водозабора видится как негативный тренд.

Сельское хозяйство оказывает серьезное антропогенное воздействие на водосбор озера. Площадь земель сельскохозяйственного назначения – возделываемых и не возделываемых увеличилась с 6,51 км^2 в 2000 году до 19,35 км^2 в 2024 году, распаханность территории составляет порядка 3% от площади водосбора. Большая доля возделываемых земель расположена вне границ Переславля-Залесского, что скорее связано с деятельностью частных хозяйств. Примерно половина использовавшихся в период 2000-2010 гг. земель в текущий момент не задействована в хозяйственной деятельности и является залежами.

В результате геоинформационного моделирования получена карта оценки антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево за период 2000-2024 гг. (рис. 8). Использованные в исследовании методы позволили выделить зоны нарушенности и проанализировать долгосрочные тенденции. Полученные интегральные карты показали положительные тренды в восстановлении лесов в малонаселённых районах, однако выявили усиление нагрузки вблизи населённых пунктов и прибрежной зоны из-за роста урбанизации и сельского хозяйства, в частности в верховьях притоков озера Плещеево.

4 Выводы

В исследовании проведен анализ изменений доли площадей по видам землепользования на основе данных дистанционного зондирования Земли, цифровой модели рельефа, картографических и литературных источники. Проведено геоинформационное моделирование антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево, которому предшествовал.

Выявлены причины увеличения доли лесов на водосборе, приуроченные к зарастанию территорий за счет общего роста температур и снижению антропогенного воздействия на них, изучено влияние растущих урбанизированных территорий на общую динамику антропогенной нагрузки, рассмотрены взаимосвязи по видам землепользования. Полученные результаты позволяют оценить долгосрочные тенденции, обусловленные нарастающим антропогенным воздействием на водосбор озера Плещеево.

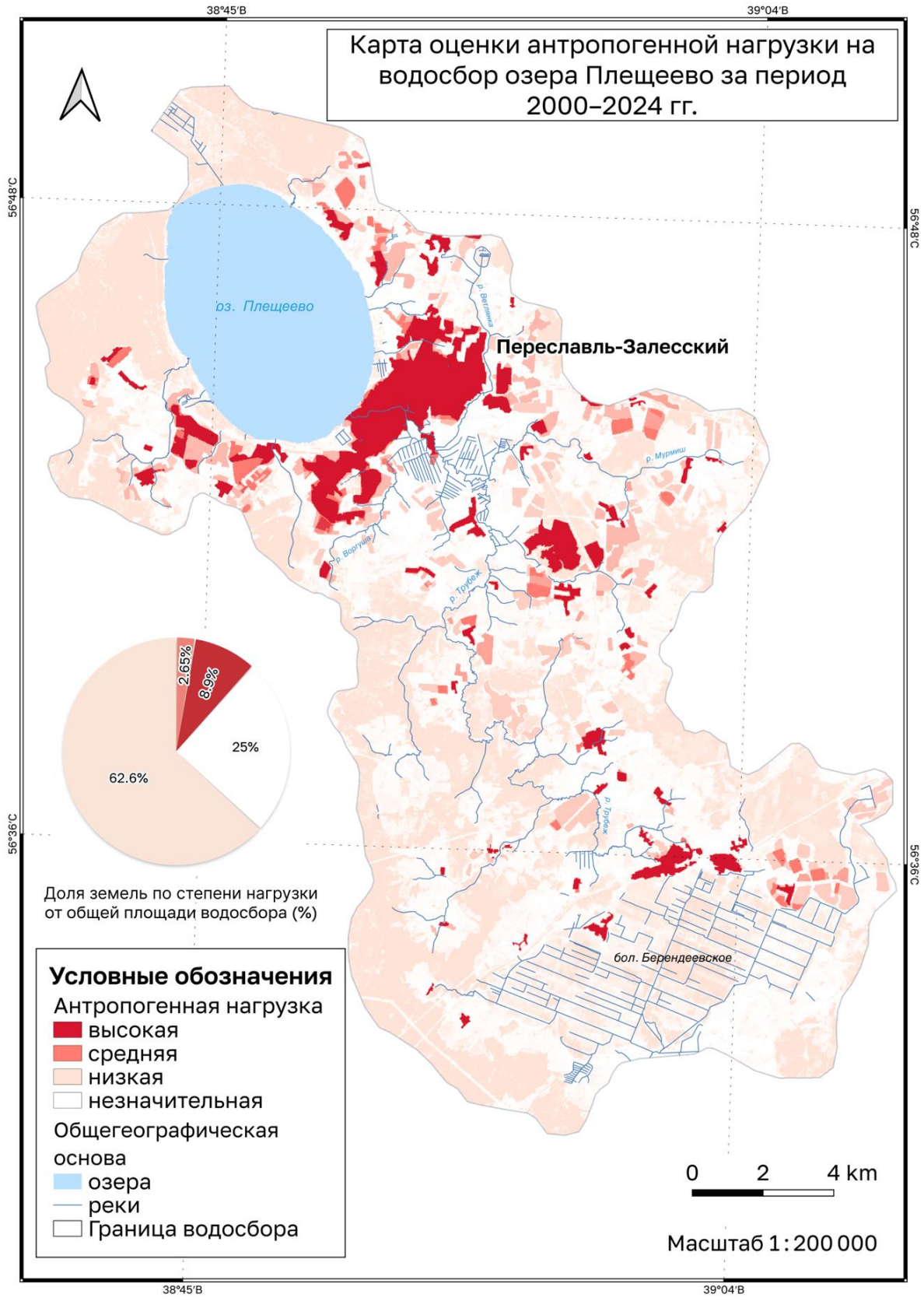


Рис. 8. Карта оценки антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево за период 2000-2024 гг.
Fig. 8. Map of Anthropogenic Pressure Assessment on the Pleshcheyevo Lake Watershed for the Period 2000–2024.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» https://rgo.ru/.

Автор выражает благодарность научному руководителю, доктору географических наук, профессору Браткову В.В. за поддержку, руководство и ценные рекомендации при подготовке публикации.

Библиография

1. Геоэкология: учебник / В. В. Братков, Ш. Ш. Заурбеков, В. А. Мелкий, И. С. Вазарханов. - Москва: КНОРУС, 2023. - 282 с.

2. Авраменко, М. В. Загрязнение вод как фактор, влияющий на качество жизни населения / М. В. Авраменко, Е. О. Смирнова // Актуальные проблемы отраслевой юридической науки: Сборник научных трудов по итогам XII Международной научно-практической конференции и III Международной научно-практической конференции, Владимир, 29 ноября – 01 2023 года. – Владимир: ООО ТСК "Копиа-Сервис", 2023. – С. 172-176. – EDN PDCHWM.

3. Чугреев, М. К. Загрязнение Плещеева озера - потенциальная угроза охотничьим ресурсам и экосистеме водоёма / М. К. Чугреев, И. С. Ткачева, В. С. Воронцова // Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и тенденции развития: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции в 2 частях, Саратов, 27 декабря 2022 года. Том Часть 2. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2022. – С. 10-15. – EDN LELHGB.

4. Хачатуров, С. Х. Гидрологическая характеристика озера Плещеево. Предложения по ее улучшению / С. Х. Хачатуров // Экология и рациональное природопользование: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Ярославль, 12–16 сентября 2017 года. – Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2017. – С. 160-163. – EDN ZICXVZ.

5. Асмус Василий Валентинович, Бучнев Алексей Александрович, Пяткин Валерий Павлович Кластерный анализ в обработке данных дистанционного зондирования Земли // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Пленарное заседание. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/klasternyy-analiz-v-obrabotke-dannyh-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli (дата обращения: 14.06.2025).

6. Russian forests and climate change. Леса России и изменение климата / ред. Leskinen P., Lindner M., Verkerk P. J., Nabuurs G. J., Van Brusselen J., Kulikova E., Hassegawa M., Lerink B.

– Joensuu: European Forest Institute, 2020. – 74 с. – (What Science Can Tell Us; 11). – ISBN 978-952-7426-00-5 (электронн.). – DOI: https://doi.org/10.36333/wsctu11

7. Христев К. И. Особенности строительства на склонах и сложных рельефах // Актуальные исследования. – 2021. – № 50 (77). – С. 35–38. – URL: https://apni.ru/article/3399-osobennosti-stroitelstva-na-sklonakh-i-slozhn (дата обращения: 17.06.2025).

Integrated Assessment of Anthropogenic Pressure on the Catchment of Lake Pleshcheyevo

George G. Shilov[1*]
1 Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
* kf.shilov@yandex.ru

Keywords anthropogenic pressure, Lake Pleshcheyevo, watershed, GIS modeling, remote sensing, retrospective analysis

Abstract The intensification of anthropogenic pressure on limited and unevenly distributed water resources necessitates a comprehensive assessment. GIS analysis of watersheds as integrated geosystems allows for the examination of major land use forms and types of anthropogenic impact at the regional level and over time, using remote sensing data. The object of this study is the Lake Pleshcheyevo basin — a unique natural-territorial complex located in the southern part of the Yaroslavl region, where economic and recreational human activities intersect, and which is currently experiencing negative anthropogenic changes as well as the influence of global climate trends, as evidenced by both qualitative and quantitative transformations of the natural environment within the basin. The study analyzes retrospective changes in the proportions of forested, agricultural, and residential lands, and includes a morphometric analysis based on a digital elevation model. The results are presented in the form of a map of anthropogenic pressure levels.

Acknowledgements

The research was carried out within the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage". The publication was carried out with the financial support of the Russian Geo-Geographical Society, an All-Russian public organization https://rgo.ru.

The author expresses his gratitude to the scientific supervisor, Doctor of Geographical Sciences, Professor Bratkov V.V. for the support of the research, guidance and valuable recommendations during the preparation of the publication.

УДК 528.942/ UDC 004.7

Геоинформационный портал как инструмент анализа пространственно-временных данных и экологического мониторинга озера Плещеево

Е.А. Борисова [1]*, Г.И. Загребин[1]**

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
* Madam.borisovakate@yandex.ru, ** zagrebin@miigaik.ru





Ключевые слова геоинформационный портал, экологический мониторинг, геоинформационное картографирование, пространственно-временной анализ, гидрохимические показатели, визуализация загрязнений, машинное обучение

Аннотация В статье рассмотрена реализация геоинформационного портала, направленного на интеграцию и пространственно-временной анализ экологических данных в водосборе озера Плещеево. Новизна подхода заключается в объединении гидрохимических и гидрологических показателей с цифровыми инструментами визуализации, прогнозирования и машинного обучения в единой ГИС-среде. Разработанный портал использует современные веб-технологии и поддерживает отображение динамических карт, графиков, аналитических панелей и пользовательских запросов к данным. Описаны методы восстановления пропусков в временных рядах, оценки антропогенного воздействия. Показано применение пространственного анализа для оценки пересечений полигональных объектов, связанных с урбанизацией, природными территориями и инженерной инфраструктурой. Система ориентирована на широкое использование: от научных исследований до поддержки принятия решений в сфере экологии и территориального планирования. Портал демонстрирует потенциал масштабируемости и повторного использования в других регионах с учётом специфики локальных данных.

1 Введение

Мониторинг водных экосистем приобретает особую значимость в условиях нарастающей антропогенной нагрузки для обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития. Рост промышленного и сельскохозяйственного производства, урбанизация и изменение климата приводят к увеличению объёмов загрязнений,

поступающих в водные объекты, что вызывает деградацию экосистем и ухудшение качества водных ресурсов.

Традиционные формы представления данных, такие как таблицы и статические отчёты, существенно ограничивают возможности анализа и принятия решений в сфере экологического мониторинга. Они не создают условия для интеграции разнородных пространственно-временных данных и моделирования сценариев развития экологической ситуации. Подобные ограничения подтверждаются практикой мониторинга уникальных экосистем, например, озера Байкал, где статические отчёты не обеспечили своевременного реагирования на кризисные изменения [1]. В этой связи все большую актуальность приобретают геоинформационные системы (ГИС), которые обеспечивают сбор, обработку, хранение и визуализацию пространственно-временных данных, интеграцию результатов полевых исследований, дистанционного зондирования и статистических источников. ГИС-технологии позволяют не только отображать текущие состояния экосистем на тематических картах, но и анализировать динамику изменений, выявлять зоны риска, моделировать распространение загрязнений и прогнозировать последствия различных сценариев развития [2].

Целью данной работы является создание геоинформационного портала, объединяющего различные источники данных и предоставляющего расширенные аналитические возможности для мониторинга водных экосистем. Такой портал служит не только хранилищем данных, но и сильным аналитическим инструментом, позволяющим исследователям и специалистам в области экологии принимать обоснованные решения на основе пространственно-временного анализа.

2 Материалы и методы

Геоинформационные системы (ГИС) представляют собой аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие сбор, хранение, обработку и визуализацию пространственных данных. Основные принципы построения таких систем включают:

- Открытость — возможность включения новых источников и методов сбора данных;
- Согласованность — обеспечение соответствия объёма и качества данных возможностям их обработки и использования для принятия решений.

Геоинформационный подход к экологическому мониторингу позволяет связывать экологические показатели с их пространственным положением, что обеспечивает мониторинг и прогнозирование динамики состояния водных экосистем во времени и пространстве, построение тематических карт и моделирование природных и антропогенных процессов. Функциональные возможности, которые следует заложить в основу построения ГИС для экологического мониторинга, должны обеспечивать

комплексный, своевременный и точный анализ состояния окружающей среды с учётом пространственно-временных аспектов:

1) Интеграция разнородных данных в единую информационную среду;
2) Пространственная привязка и визуализация тематических данных;
3) Анализ временных и пространственных данных;
4) Поддержка принятия решений и прогнозирование;
5) Автоматизация сбора, обработки и обновления данных;
6) Масштабируемость и гибкость.

Для анализа данных применялся метод картографического моделирования, используемого для визуализации количественной и пространственной характеристик загрязнений. Анализ временных рядов при помощи метода интерполяции позволял выявлять тренды и сезонные колебания ключевых экологических параметров. Совмещение различных слоёв данных обеспечивало комплексное понимание состояния экосистемы.

Для отображения в сети «Интернет» пространственных данных, собранных и объединенных в геоинформационной системе, был разработан геопортал [3], объединяющий в себе удаленную базу данных и интернет-страницу с их картографическим отображением. В геопортале использовались следующие виды пространственных данных: гидрохимические показатели (концентрации загрязняющих веществ, показатели качества воды), гидрологические параметры (уровни и расход воды), а также пространственные объекты — водосборные бассейны, административные границы и карты, отражающие изменения населенных пунктов во времени. Хранение и управление данными осуществлялись с помощью реляционной базы данных MySQL, что обеспечило эффективное хранение пространственных объектов и атрибутивных данных. Структура базы данных включала тематические таблицы с информацией о точках наблюдений, параметрах проб, гидрологических данных и пространственных слоях, связанных между собой через ключи для обеспечения целостности и возможности комплексных запросов.

Разработанный геоинформационный портал реализован в виде одностраничного веб-приложения, использующего технологии клиент-серверной архитектуры и современные веб-библиотеки для визуализации пространственных данных. Основу фронтенд-компонента составляет библиотека Mapbox GL JS, обеспечивающая высокопроизводительное отображение векторных тайлов и интерактивную работу с геопространственной информацией в браузере. В качестве базовых технологий использованы HTML5, CSS3 и JavaScript.

Клиентская часть портала представляет собой совокупность модулей, реализующих:

— динамическую загрузку и отображение векторных и растровых слоёв;
— подключение пользовательских источников данных (GeoJSON, CSV);

— реализацию интерактивных фильтров, выпадающих списков, слайдеров и элементов управления видимостью слоёв;
— генерацию всплывающих окон и информационных панелей на основе атрибутивных данных объектов;
— подключение интерактивной легенды, обновляющейся в зависимости от включённых слоёв.

Обработка данных осуществляется в браузере с помощью нативных методов JavaScript и специализированных библиотек, в частности:

— Turf.js — для геометрических операций (вычисление площади, пересечений, буферных зон и др.);
— D3.js / Plotly.js — для визуализации временных рядов, построения графиков и диаграмм;
— jQuery — для работы с DOM и AJAX-запросами.

Обработка запросов к данным осуществляется через набор серверных API-интерфейсов, реализованных с использованием PHP. Сервер предоставляет:

— доступ к хранилищу пространственных и табличных данных (в формате GeoJSON, CSV, JSON);
— выполнение агрегирующих функций по показателям загрязнений (например, расчёт общего объёма загрязнителя по году и точке);
— подгрузку метаданных и атрибутивной информации для всплывающих окон и аналитических панелей.

Таким образом, описанные выше методы и инструменты обеспечивают создание масштабируемой и гибкой геоинформационной системы, способной интегрировать разнообразные экологические данные, проводить их пространственно-временной анализ и визуализацию, что существенно повышает эффективность мониторинга и управления водными экосистемами.

На данном этапе в геоинформационной системе озера Плещеево реализованы два взаимодополняющих модуля визуализации и анализа:

— пространственное отображение гидрохимических параметров по точкам взятия проб;
— временной анализ уровня воды по многолетним наблюдениям.

Оба инструмента интегрированы в веб-интерфейс портала и взаимодействуют с серверной частью через асинхронные запросы и динамически подгружаемые слои.

2.1 Геоинформационное представление гидрохимических данных

Для пространственного отображения и анализа результатов гидрохимических проб водных объектов был разработан специализированный веб-модуль на основе библиотеки Mapbox GL JS, обеспечивающий интеграцию, визуализацию и пользовательское взаимодействие с данными экологического мониторинга. Гидрохимическая информация формируется на основе полевых и лабораторных измерений и сохраняется в базе данных, структурированной для выполнения многомерного анализа. Архитектура базы данных включает таблицы с уникальными идентификаторами точек наблюдения, географическими координатами, временными метками, типами загрязняющих веществ, концентрациями и указанием источников данных. Функция модуля реализует динамическое подключение и отображение пространственно-временных показателей качества воды. Пользовательский интерфейс позволяет выбирать интересующий химический параметр (например, фосфаты, БПК, pH) и год наблюдений, после чего данные автоматически обновляются без перезагрузки страницы. Таким образом, модуль обеспечивает интерактивный анализ и наглядную интерпретацию гидрохимических данных, способствуя принятию обоснованных решений в области экологического мониторинга.

2.1.1 Графическая реализация

В основу картографической визуализации положен динамически подключаемый источник GeoJSON, загружаемый с серверной части посредством AJAX-запроса с параметром химического индикатора (например, «фосфаты», «pH», «железо» и др.). Источник данных обновляется при каждом изменении выбора пользователем через графические элементы интерфейса (рис. 1) — выпадающий список показателей (<select>) и ползунок для выбора года (<input type="range">).

Данные представлены в двух слоях:

— Слой (тип: circle) отображает точки взятия проб.

Радиус кругов масштабируется по значению AvgPDK — отношения среднего показателя к предельно допустимой концентрации (ПДК), в диапазоне от 10 до 35 пикселей. Цветовая шкала реализована в виде пороговой схемы, которая отражает качественную категорию состояния: до 0.86 ПДК — зелёный, от 0.86 до 1.14 ПДК — жёлтый, выше 1.14 ПДК — оранжевый. Выбранные диапазоны соответствуют ошибке измерения при проведении анализов.

— Слой (тип: symbol) содержит подписи, включающие значение AvgPDK и, при наличии, — суммарный объём загрязняющего вещества за год (SumPol), в тоннах).

При отсутствии суммарного значения отображается только «Среднее к ПДК». Формат подписи (рис. 2).



Рис. 1. Интерфейс с визуализацией гидрохимических данных
Fig. 1. Interface for hydrochemical data visualization

<AvgPDK>

<SumPol>



Рис. 2. Картографическая визуализация пространственно-временного описания гидрохимии
Fig. 2. Cartographic visualization of the spatial and temporal description of hydrochemistry

2.1.2 Интерактивные функции

При клике на карту по точке мониторинга активируется всплывающее окно с полной информацией (рис. 3):

— название контрольной точки,
— год наблюдения,
— среднее и максимальное значения загрязнителя,

— отношение к ПДК,
— значение ПДК,
— суммарный объём загрязнения (если доступен).

Также отображается мини-график тренда по годам для выбранного показателя, генерируемый с помощью функции diagram_paint.



Рис. 3. Атрибутивная информация точки мониторинга гидрохимических показателей

Fig. 3. Attribute information of the hydrochemical indicators monitoring point

2.2 Геоинформационное представление гидрологических данных

Для отображения изменений уровня воды озера за период 1932–2024 гг. разработан модуль визуализации временных рядов, основанный на библиотеках Plotly.js и D3.js. Источник данных — CSV-файл с полями Год и Уровень воды (в сантиметрах), загружаемый через асинхронно d3.csv(), что обеспечивает высокую отзывчивость интерфейса и возможность повторного использования данных при переключении параметров отображения.

На этапе загрузки данные проходят предварительную очистку и трансформацию:

```
var years = xData.map(year => parseInt(year, 10));
var waterLevels = ylevel.map(level => parseFloat(level));
```

Данный шаг исключает некорректные строки и преобразует значения в числовой формат, необходимый для регрессионного анализа и построения графиков.

2.2.1. Алгоритмы анализа

Для оценки тренда уровня воды в ключевой исторический период (1959–1975 гг.) применяется метод наименьших квадратов, реализованный вручную на JavaScript без привлечения сторонних статистических библиотек:

```
function leastSquares(xSeries, ySeries) {
  var xBar = d3.mean(xSeries);
  var yBar = d3.mean(ySeries);
  var ssXX = d3.sum(xSeries, d => Math.pow(d - xBar, 2));
  var ssXY = d3.sum(xSeries, (d, i) => (d - xBar) * (ySeries[i] - yBar));
  var slope = ssXY / ssXX;
  var intercept = yBar - (xBar * slope);
  return { slope, intercept };
}
```

Результирующая модель линейной регрессии (уравнение прямой) применяется для генерации массива прогнозных значений, формирующих трендовую линию на графике. Дополнительно реализована функция усреднения уровней воды по произвольно заданным временным диапазонам:

```
function averageWaterLevel(startYear, endYear) {
  var filteredLevels = waterLevels.filter((level, i) => years[i] >= startYear && years[i] <= endYear);
  return d3.mean(filteredLevels);
}
```

С помощью этой функции рассчитываются среднемноголетние значения уровня воды для четырёх ключевых периодов: 1932–1959, 1960–1975, 1976–2024, 1932–2024.

2.2.2 Графическая реализация

Для построения визуального представления используется массив объектов trace, каждый из которых представляет отдельный слой на графике:

- Основная линия (trace1) — динамика уровня воды по годам;
- Трендовая линия (trace2) — линия регрессии 1959–1975 гг.;
- Горизонтальные линии (trace3–trace6) — среднемноголетние уровни воды для разных периодов.

Каждый слой содержит параметры типа (scatter), режима (lines), цвета и стиля линии (сплошная, пунктирная, точечная и пр.).

```
var trace2 = {
  type: "scatter",
  mode: "lines",
```

```
    x: filteredYears_trend,
    y: trendLine,
    name: 'Линия тренда',
    line: { color: 'red', dash: 'dashdot' }
};
```

Масштабирование по оси времени реализовано через встроенный rangeslider, а временной выбор осуществляется при помощи rangeselector с предопределёнными кнопками (1, 5, 15, 30 лет, весь период). График динамики уровня воды в озере представлен на рисунке 4.

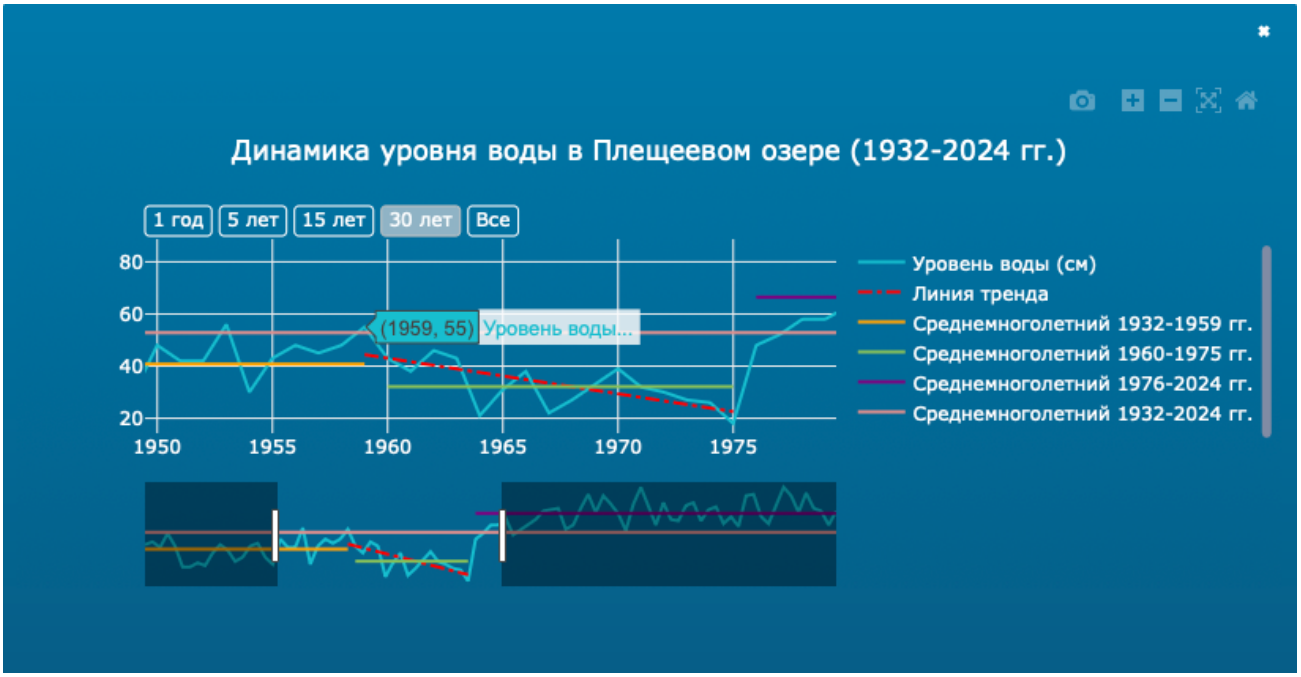


Рис. 4. График динамики уровня воды в озере Плещеево
Fig. 4. Graph of water level dynamics in Lake Pleshcheyevo

Для улучшения доступности реализовано интерактивное справочное окно, вызываемое по кнопке, с описанием действий по управлению ползунками и интерпретации данных. Оно формируется средствами Mapbox GL и позиционируется относительно управляющего элемента интерфейса. Для сенсорных экранов добавлена поддержка жестов свайпа, позволяющая скрывать или раскрывать боковую панель с графиком уровня воды. Это повышает эргономику работы на устройствах с ограниченным экраном. Также предусмотрено программное управление resize графика при изменении размеров контейнера или ориентации экрана.

Таким образом, реализованные модули обеспечивают комплексный подход к визуализации гидрологических и гидрохимических данных в пространственно-временной

структуре, повышая информативность и наглядность экологического мониторинга водосбора.

2.3 Применение методов машинного обучения для восстановления пропусков в гидрологических данных

Одной из задач при обработке временных рядов уровня воды озера Плещеево стала корректная реконструкция недостающих значений, связанных с неполнотой архивных наблюдений. В процессе первичной обработки было выявлено, что прямое заполнение пропусков с помощью стандартных методов может приводить к завышенной оценке качества (MAE = 0, RMSE = 0, R^2 = 1), что зачастую связано с утечкой информации или некорректным подходом к валидации. Для достоверной оценки качества восстановления был реализован подход внешней валидации с контролем истинных (неиспорченных) значений. Основная идея заключается в следующем:

1. исходные данные сохраняются в виде "эталонного" датафрейма без пропусков;
2. создаётся модифицированная версия с искусственными пропусками (например, замена нулевых значений на NaN);
3. заполнение выполняется разными методами, после чего восстановленные значения сравниваются с исходными истинными.

2.3.1 Алгоритмы анализа

В работе протестированы четыре метода:

- Среднее по другим годам**:** простая агрегация по одной точке, исключая текущий год.
- Линейная регрессия**:** построение модели зависимости значения от года.
- Метод ближайших соседей (KNN)**:** восстановление на основе схожести временных рядов.
- Случайный лес**:** ансамблевый метод регрессии с использованием временной переменной.

Метод 1: среднее по другим годам

Реализация машинного обучения для восстановления пропусков в гидрологических данных:

```
# Сделаем копию данных для работы с пропусками
df = df_full.copy()
# Заменим значения на NaN
df[month_cols] = df[month_cols].replace(0, np.nan)  # Заменим 0 на NaN в месячных данных
```

```
# Заполнение методом 1: среднее значение по другим годам
def fill_with_mean(df):
    df_filled = df.copy()
    for point in df['point'].unique():
        group = df[df['point'] == point]
        for col in month_cols:
            for idx, row in group.iterrows():
                if pd.isna(row[col]):
                    same_point_month = group[group['year'] != row['year']][col]
                    if same_point_month.notna().any():
                        df_filled.at[idx, col] = same_point_month.mean()
                    else:
                        df_filled.at[idx, col] = group[col].mean(skipna=True)
    return df_filled
# Метод 2: линейная регрессия
def fill_with_lin_regression(df):
    df_filled = df.copy()
    for point in df['point'].unique():
        point_data = df[df['point'] == point]
        for col in month_cols:
            train_data = point_data[point_data[col].notna()]
            if len(train_data) > 1:
                X_train = train_data[['year']]
                y_train = train_data[col]
                model = LinearRegression()
                model.fit(X_train, y_train)
                missing_data = point_data[point_data[col].isna()]
                if len(missing_data) > 0:
                    X_missing = missing_data[['year']]
                    predicted_values = model.predict(X_missing)
                    df_filled.loc[missing_data.index, col] = predicted_values
```

```
        return df_filled
```

Метод 3: KNN

```
def fill_with_knn(df):
    df_filled = df.copy()
    imputer = KNNImputer(n_neighbors=5)
    df_filled[month_cols] = imputer.fit_transform(df[month_cols])
    return df_filled
```

Метод 4: случайный лес

```
def fill_with_random_forest(df):
    df_filled = df.copy()
    for col in month_cols:
        train_data = df[df[col].notna()]
        missing_data = df[df[col].isna()]
        if len(train_data) > 0:
            X_train = train_data[['year']]
            y_train = train_data[col]
            model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)
            model.fit(X_train, y_train)
            X_missing = missing_data[['year']]
            predicted_values = model.predict(X_missing)
            df_filled.loc[missing_data.index, col] = predicted_values
    return df_filled
```

2.3.2 Результаты и выбор метода

Для всех четырёх подходов были рассчитаны значения MAE, RMSE и коэффициента детерминации R^2. Это позволило объективно сравнить методы между собой и выбрать наилучший по соотношению точности и устойчивости (табл. 1).

Отсутствующие данные за отдельные годы восстановлены с помощью линейной регрессии, реализованной в Python (SciKit-Learn). Модель обучается на существующих наблюдениях по данной точке и параметру, затем применяется для заполнения промежутков. Это позволяет сохранить непрерывность временного анализа, а также обеспечивает отображение прогнозной траектории изменения показателя.

Таблица 1. Сравнение метрик по моделям обучения
Table 1. Comparison of metrics by learning models

Метод/ метрики	Среднее по другим годам	Линейная регрессия	KNN	Случайный лес
MAE	0.962774396	0.909890834	1.907641562	35.130319794
RMSE	6.506682465	6.373040996	8.728370163	104.121858157
R^2	0.999983932	0.999984228	0.999969373	0.995641669

Для каждого параметра в пределах конкретной станции строится линейная регрессионная модель на основе соседних точек. Процесс включает:

- нормализацию временных данных;
- удаление выбросов (если необходимо);
- обучение модели линейной регрессии LinearRegression();
- предсказание значений для пропущенных интервалов;
- сохранение восстановленных значений в отдельную таблицу (interpolated_values), с возможностью их отключения при отображении.

Таким образом, применение машинного обучения в рамках восстановления пропусков обеспечило надёжность анализа и повышение точности выводов.

2.4 Анализ пересечения полигональных слоёв в задачах экологического мониторинга

В рамках платформы реализован инструмент пространственного анализа пересечений между полигональными слоями на карте. Его задача — вычисление площадей объектов и площади их пересечений с отображением относительных показателей в процентах. Использование библиотеки Turf.js позволяет выполнять точные операции над геометриями прямо в браузере.

2.4.1 Принцип работы инструмента

Пользователь выбирает два слоя из списка полигональных объектов, визуализированных на карте (тип fill). После выбора система выполняет:

- расчет площади каждого слоя в квадратных километрах;
- поэлементный перебор геометрий меньшего слоя и проверку их пересечений с объектами второго слоя:

```
const smallerLayer = area1 < area2 ? features1 : features2;

const largerLayer = area1 >= area2 ? features1 : features2;
```

- определение площади пересечения слоёв;

— отображение площади пересечения и процента перекрытия.

Результат отображается в интерфейсе (рис. 5) в виде текстового блока с ключевыми цифрами (в км² и %).

Преимущества реализации:

— учитывается мультигеометрия (через featureCollection);
— обеспечивается автоматическая защита от ошибок: отсутствие данных, одинаковые слои, пустые выборки;
— обеспечивается гибкость: можно адаптировать под любые тематические полигональные слои.

Экологическое значение инструмента и сценарии его применения: может быть использован для оценки воздействия загрязнителей на природные охраняемые объекты, контроля урбанизации, моделирования конфликтов природопользования. Таким образом, функция анализа пересечений полигональных слоёв служит не только удобным визуальным инструментом, но и важной аналитической основой для обоснованных выводов в сфере охраны окружающей среды и устойчивого природопользования.

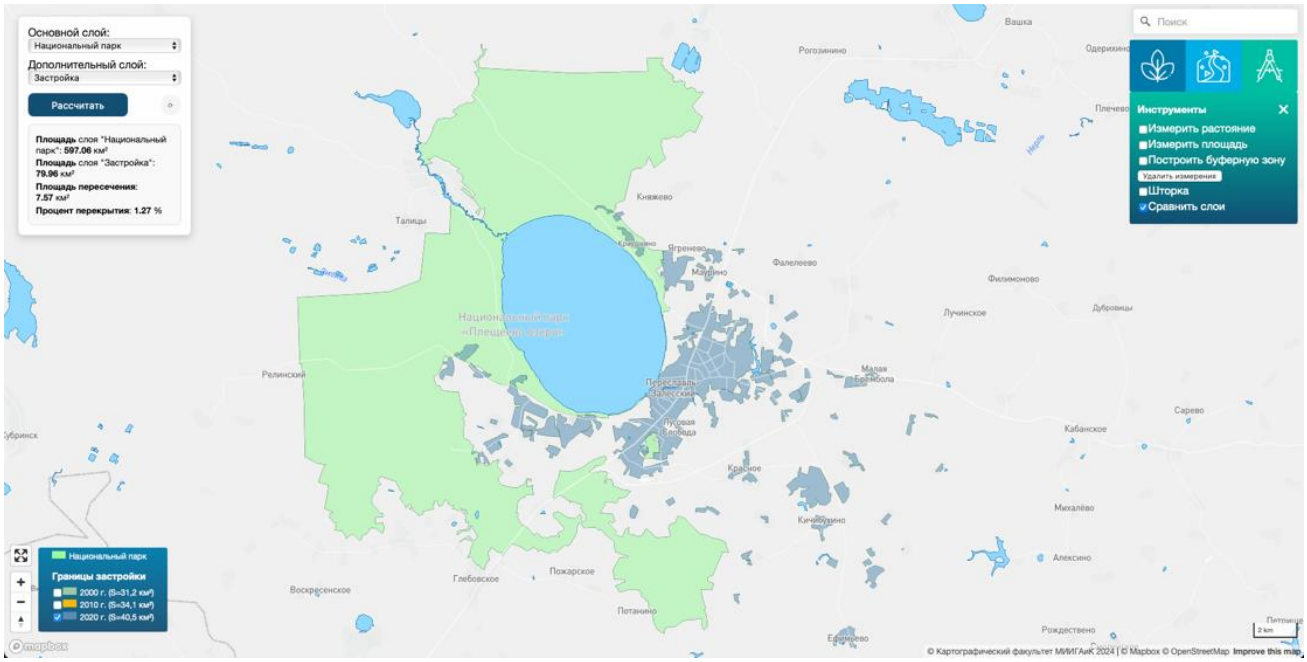


Рис. 5. Интерфейс инструмента пространственного анализа пересечений
Fig. 5. Interface of the intersection spatial analysis tool

3 Функциональные возможности геоинформационного портала

Разработанный геоинформационный портал служит платформой для интеграции, анализа, визуализации и интерпретации пространственных и атрибутивных данных в рамках экологического мониторинга водосборного бассейна озера Плещеево.

3.1 Основные группы данных и слоёв

3.1.1 Гидрографические слои

Портал отображает основные элементы водной сети и гидротехнической инфраструктуры:

- векторные полигоны водосборных бассейнов,
- линейные объекты речной сети,
- точечные слои гидросооружений (дамбы, плотины и др.).

3.1.2 Гидрохимический мониторинг

Реализована визуализация данных химического анализа воды в разрезе годов и загрязнителей. Представление выполнено в виде картодиаграмм, в которых:

- цвет кружков отражает качественную категорию состояния,
- размер соответствует интенсивности загрязнения по выбранному показателю,
- элементы управления позволяют фильтровать отображение по году и веществу в реальном времени,
- при клике на точку отображается подробная информация, включая расчёт общего годового объёма загрязнителя в тоннах**,** вычисляемого на основе концентрации и объёма воды, переносимого в данной точке за год.

3.1.3 Сток воды в контрольных точках

Результаты измерений стока воды по годам в местах отбора проб отображаются в виде диаграмм, масштабируемых пропорционально значению, с привязкой к географическим координатам. При наведении курсора на точку на карте отображается граница водосборного бассейна контрольной точки.

3.1.4 Административное-территориальное деление

Включены слои административных границ:

- субъектов федерации (области),
- муниципальных округов,

— населённых пунктов (города).

Эти слои используются для сопоставления природных и антропогенных процессов в пределах административных единиц.

3.1.5 Функциональное зонирование и рекреационное развитие

Отдельным блоком реализовано интерактивное отображение пространственной структуры Национального парка «Плещеево озеро» и атрибутивной информации, включая:

— функциональные зоны,
— зоны планируемого рекреационного развития,

3.1.6 Антропогенная нагрузка

Блок антропогенных воздействий представлен следующими слоями:

— динамику урбанизированных территорий за 2000, 2010 и 2020 гг.,
— векторные объекты промышленных предприятий с атрибутивной информацией,
— слои инженерной инфраструктуры: канализационные сети и зоны перспективного благоустройства.

3.1.7 Экспедиционные материалы

Геопортал включает маршруты полевых исследований, отображаемые линейными объектами, а также точки обследований притоков р. Трубеж, на которые реализованы всплывающие окна:

— при наведении отображается краткая информация о маршруте,
— при клике — результаты обследований и фотографии, привязанные к конкретным координатам.

3.1.8 Моделирование обводнения Берендеева болота

Реализован динамический слой, отображающий потенциальные зоны затопления болотной системы Берендеево болото. Регулируемый слайдер высот позволяет интерактивно оценивать сценарные последствия изменения уровня и уязвимость территорий.

3.1.9 Базовые подложки и картографическая основа

Для повышения информативности визуализации предусмотрены различные картографические подложки:

- базовая топографическая подложка ЕЭКО,
- мозаика спутниковых снимков,
- архивные картографические материалы (фонд города Переславль-Залесский).

3.1.10 Инструментальная панель пространственного анализа

Геопортал оснащён инструментарием пространственной аналитики, включающим:

- интерактивные линейки и планиметрию для расчёта расстояний и площадей,
- построение буферных зон заданного радиуса от точечных объектов,
- режим «картографической шторки» (map swipe) для сравнительного анализа изображений и векторных слоев,
- инструмент оценки расчёта площади перекрытия между двумя выбранными слоями с определением процентного соотношения.

Все условные обозначения, используемые в слоях, динамически отображаются в легенде по мере активации соответствующего слоя, что делает интерфейс адаптивным и интуитивно понятным.

Важной особенностью разработанного геоинформационного портала является реализация мультимасштабного подхода к отображению данных, обеспечивающего логичное и последовательное представление информации при переходе между различными уровнями детализации. Для каждого масштаба предусмотрена оптимизированная структура отображаемых слоёв, включая генерализацию, фильтрацию и адаптацию картографического содержания. Такой подход способствует повышению информативности визуализации, снижению когнитивной нагрузки на пользователя и улучшению навигационного взаимодействия. Мультимасштабное картографирование требует осознанного подбора проекций и содержания карты на каждом уровне отображения, что позволяет обеспечить устойчивость и логичность картографического интерфейса веб-приложений, а также повысить удобство восприятия пространственной информации пользователем [4].

Таким образом, геоинформационный портал представляет собой многофункциональный инструмент интеграции полевых, лабораторных и пространственных данных, моделирования и визуализации, обеспечивая поддержку управленческих, исследовательских и проектных задач в области природопользования и охраны водных ресурсов.

4 Обсуждение. Перспективы развития геоинформационного портала

Представленная реализация геоинформационного портала продемонстрировала эффективность комплексной интеграции разнородных данных для целей экологического

мониторинга водосборных территорий. Использование современных веб-картографических библиотек позволило обеспечить интерактивность пользовательского интерфейса и гибкости в настройках визуализации.

В развитии системы представляются перспективными следующие направления:

- расширение аналитических функций для моделирования и прогнозирования сценариев изменения экологической обстановки водосборного;
- интеграция методов машинного обучения и искусственного интеллекта для повышения точности анализа, заполнения пробелов в данных и построения прогностических моделей изменения состояния водных экосистем;
- интеграция автоматизированных источников данных, таких как IoT-устройства, сенсоры и гидрологические посты с передачей информации в реальном времени;
- создание открытых API для обмена данными между исследовательскими организациями, государственными органами и иными ГИС-системами;
- расширение функционала платформы для поддержки междисциплинарных исследований;
- обеспечение масштабируемости как по территориальному охвату (применение для других объектов и водосборных бассейнов), так и по спектру обрабатываемых данных.

Ключевым направлением исследований на следующем этапе проекта является моделирование и оценка сценариев экологической трансформации бассейна озера Плещеево при обводнении болотной системы Берендеево болото и проточности озера. Учитывая сложное геоморфологическое строение данной территории, предполагается реализация гидродинамического моделирования с прогнозной оценкой пространственно-временных изменений: уровня воды, масштабов затопления, миграции загрязняющих веществ, воздействия на прибрежные биотопы и транзитные водотоки. Ожидается, что моделирование позволит оценить не только экологические риски, но и потенциальные экосистемные выгоды от регулирования гидрологического режима.

Также необходимо учитывать вызовы, связанные с обеспечением качества исходных и оперативных данных, их верификацией и интеграцией из различных источников, а также гарантией надёжности работы портала при растущем числе пользователей. Безопасность доступа, адаптация интерфейса под пользователей с различной подготовкой и множества вариантов дисплеев могут стать значимыми направлениями повышения прикладной ценности платформы.

5 Выводы

Разработанный геоинформационный портал представляет собой эффективное связующее звено между сбором данных, их анализом, визуализацией и процессом принятия

решений. Его значимость проявляется в нескольких ключевых направлениях: поддержка полевых исследований, использование в образовательных программах и применение в прикладном природопользовании. Кроме того, портал обладает высоким потенциалом для масштабирования и дальнейшего развития, что позволяет адаптировать его под новые задачи и расширять функциональные возможности.

Применённые в реализации портала методы геоинформационного анализа и визуализации соответствуют современным практикам построения систем экологического мониторинга, ориентированных на выявление экологических рисков в водосборных территориях и прилегающих регионах. Использование современных ГИС-технологий, а также динамическая загрузка и отображение пространственных слоёв в сочетании с интерактивными инструментами анализа, позволили значительно повысить информативность и оперативность экологического мониторинга по сравнению с традиционными статическими методами.

Геопортал обеспечивает:

- комплексное объединение разнородных данных (полевые, лабораторные, исторические, гидрологические) в единой информационной среде;
- пространственно-временной анализ загрязнителей с возможностью оценки превышения предельно допустимых концентраций и выявления зон риска;
- наглядную и интуитивно понятную визуализацию, включая масштабируемые легенды, интерактивные графики трендов, всплывающие окна с полной атрибутивной информацией и динамическое обновление слоёв;
- поддержку принятия решений за счёт инструментов пространственной агрегации, сравнения сценариев и прогнозирования изменений состояния экосистем.

Внедрение подобных геоинформационных платформ открывает новые возможности для комплексного мониторинга, анализа и управления водными ресурсами на региональном и национальном уровнях. Благодаря интеграции многомерных данных и современных методов визуализации, становится возможным:

- своевременно выявлять негативные тенденции в состоянии водных объектов;
- проводить более точную оценку эффективности природоохранных мероприятий;
- моделировать последствия различных сценариев антропогенного воздействия и климатических изменений.

В будущем развитие таких систем может привести к формированию единой цифровой среды для поддержки принятия решений в области охраны окружающей среды, автоматизации мониторинга и прогнозирования, а также к повышению экологической грамотности и вовлечённости населения в вопросы устойчивого природопользования. В долгосрочной перспективе это будет способствовать устойчивому развитию, сохранению

биоразнообразия и формированию цифровой среды для поддержки принятия решений в области охраны окружающей среды.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» https://rgo.ru/

Библиография

1. Зайцева Н. В., Климова И. Д., Карташов А. В., Жарова Т. И. Цифровые технологии в экологическом мониторинге: перспективы и вызовы // *Environmental Research*. 2021. Т. 202. Art. № 111715.
DOI:10.1016/j.envres.2021.111715.URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8620454

2. Солнцев И. Н. Геоинформационные технологии: Учебное пособие. – М.: ГИС-Технологии, 2010. 272 с.

3. Загребин, Г. И. Геопортал как средство хранения и поиска геопространственной информации в образовательной и научно-технической деятельности / Г. И. Загребин, А. В. Дворников // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 175-178. – EDN VVZYKX.

4. Загребин Г. И. Выбор оптимальных картографических проекций мультимасштабной карты // Геодезия и картография. 2025. № 4. С. 8–18.

Geoinformation Portal of Lake Pleshcheyevo as a Tool for Environmental Monitoring and Spatial and Temporal Data Analysis

Ekaterina A. Borisova[1]*, Gleb I. Zagrebin[1]**
[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
* Madam.borisovakate@yandex.ru, ** zagrebin@miigaik.ru

Keywords Geoinformation portal, environmental monitoring, geoinformation cartography, spatial and temporal analysis, hydrochemical indicators, pollution visualization, machine learning

Abstract The article presents the implementation of a geoinformation portal designed for the integration and spatial and temporal analysis of environmental data within the watershed of Lake Pleshcheyevo. The novelty of the approach lies in combining hydrochemical and hydrological indicators with digital tools for

visualization, forecasting, and machine learning within a unified GIS environment. The developed portal utilizes modern web technologies and supports the display of dynamic maps, charts, analytical panels, and user-defined data queries. Methods for reconstructing missing values in time series and assessing anthropogenic impact are described. The portal also implements spatial analysis tools to evaluate intersections between polygonal features related to urbanization, natural areas, and engineering infrastructure. The system is designed for broad applicability—from scientific research to decision support in the fields of ecology and spatial planning. The portal demonstrates strong potential for scalability and reuse in other regions, taking into account the specificity of local data.

Acknowledgements

The study was carried out as part of the implementation of the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage" with the financial support of the All-Russian public organization «Russian Geographical Society», https://rgo.ru/

УДК 556 / UDC556.5

Обводнение Берендеева болота как потенциал увеличения проточности озера Плещеева: перспективы и риски

Е.А. Борисова [1]*

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
* Madam.borisovakate@yandex.ru



Ключевые слова озеро Плещеево, Берендеево болото, обводнение, ГИС, моделирование, водообмен, гидрологическая модель

Аннотация На озере Плещеево (Ярославская область) наблюдаются экологические проблемы, такие как «цветение» сине-зеленых водорослей и периодические заморы рыбы. Одной из причин исследователи ИБВВ РАН считают уменьшение проточности озера, связанное в том числе с перекрытием питания основного притока озера – реки Трубеж – от Берендеева болота. В статье рассматривается возможность восстановления гидрологической связи между озером Плещеево и осушенным Берендеевым болотом путём обводнения последнего. Осушение болота в XX веке нарушило водный режим реки Трубеж — основного притока озера, что, вероятно, способствовало деградации водообмена и нарастанию эвтрофикации. С использованием геоинформационных технологий появляется возможность провести пространственный анализ потенциальных зон затопления при повторном обводнении Берендеева болота. Также проведен анализ международного опыта ренатурализации болот, подтверждающий эффективность таких мер для восстановления таких экосистемных функций, как регулирование стока, накопление углерода, повышение биоразнообразия. Обсуждаются экологические перспективы и риски проекта, включая возможное влияние на гидрохимию, водообмен, климат. Отмечена ключевая роль ГИС на стадии предварительного планирования и необходимость дальнейшего применения математического моделирования. Предложены рекомендации по реализации обводнения Берендеева болота с использованием ГИС и адаптивного управления. Результаты демонстрируют потенциал комплексного подхода к восстановлению водно-болотных экосистем с использованием цифровых инструментов.

1 Введение

Озеро Плещеево – крупный водоём Центральной России (площадь ~50 км^2), обладающий высоким природным и рекреационным значением. В последние годы в озере

фиксируются экологические проблемы: отмечается интенсивное «цветение» воды, сопровождаемое локальной гибелью рыбы. Плещеево озеро имеет единственный крупный приток – реку Трубеж, которая исторически питалась водами болотистой системы (ручей Чернавка) в урочище Берендеево болото. Однако в середине XX века на Берендеевом болоте началась интенсификация добычи торфа, были построены дамба, отрезавшая исток реки Трубеж от болота, и дренажные каналы, по которым воды болота были направлены в бассейн реки Малый Киржач. В результате Трубеж стал мелеть, водообмен озера замедлился, и, по мнению исследователей ИБВВ РАН, это могло стать одной из причин, способствующих «цветению» озера сине-зелеными водорослями (в первую очередь - *Gloeotrichia echinulata)* и периодическим вспышкам взрывного роста их биомассы, как, например, в 2023 году. Одним из возможных решений описанной проблемы является восстановление гидрологической роли Берендеева болота путём его повторного обводнения (ренатурализации). Предполагается, что возврат болота к водонасыщенному состоянию увеличит сток в р. Трубеж и усилит проточность озера Плещеево[1].

Ренатурализация болот – природоохранная мера, направленная на восстановление деградированных водно-болотных угодий и их экосистемных функций. В естественном состоянии болота служат накопителями воды и природными фильтрами, поддерживают уникальное биоразнообразие и являются крупными хранилищами углерода. Осушение и деградация торфяников приводят к утрате этих функций и ускоряют климатические изменения. Соответственно, во многих странах реализуют программы восстановления болот, которые позволяют одновременно улучшить качество воды, снизить риски наводнений и сократить выбросы парниковых газов. Примером является международный проект LIFE Peat Restore (2016–2022), в рамках которого восстановлено более 5300 га торфяников в Европе, что привело к сокращению годовых парниковых выбросов и улучшению состояния болотных экосистем [1]. Активно ведутся работы и в Восточной Европе. В Беларуси к 2021 году восстановлено около 60 000 га осушенных болот (≈15% деградированных торфяников страны) путём сооружения каскадных дамб, шлюзов и поднятия уровня грунтовых вод. Эти меры не только предотвращают пожароопасность торфяников, но и способствуют возврату типичных болотных видов флоры и фауны. Международный опыт подтверждает: ренатурализация болот – эффективный инструмент улучшения экосистемных услуг, включая регулирование стока и качества воды.

Отдельно стоит отметить роль геоинформационных систем (ГИС) и гидрологического моделирования в современных проектах восстановления болот. ГИС позволяют интегрировать разнородные данные (цифровые модели рельефа, космические снимки, данные полевых наблюдений и т.п.), проводить пространственный анализ, строить карты потенциальных зон затопления и моделировать различные сценарии управления водным

[1] Отчет о результатах работ по теме «Геологическое обоснование реконструкции дернажной сети для восстановления естественного стока Берендеева болота в Переславском муниципальном округе». Государственное геологическое предприятяе «Центргеология», филиал «Экогеокомплекс», Переславль, 2002.

режимом. С помощью ГИС и высокоточных данных (например, лазерного сканирования) можно детально картографировать микрорельеф болот, что критически важно для прогноза площади затопления при повышении уровня воды. Интеграция ГИС с гидрологическими моделями (HEC-HMS, MIKE SHE и др.) позволяет строить прогнозные модели изменения водного баланса и стока при различных сценариях, оценить влияние renатурализации на прилегающие территории и, таким образом, обосновать целесообразность принимаемых решений по реализации восстановительных мероприятий.

2 Материалы и методы

2.1 Исходные данные и методика

Берендеево болото и связанная с ним гидрологическая система находятся в бассейне реки Трубеж (южная часть Ярославской области). До осушения Берендеево болото являлось одним из крупнейших болот региона и играло ключевую роль в питании р. Трубеж, поддерживая уровень воды в оз. Плещеево. В настоящее время болото значительно трансформировано осушительной сетью дренажных каналов после длительной промышленной добычи торфа.

По данным рекогносцировочного обследования истока реки Трубеж и Берендеева болота летом 2024 года многие дренажные канавы заросли, а уровень воды в ручье Чернавка (исток Трубежа) крайне низкий.

Для проведения моделирования были собраны и подготовлены следующие данные. Цифровая модель местности (ЦММ) получена из открытых источников (спутниковая DEM Copernicus, разрешение 30 м) и преобразована в цифровую модель рельефа инструментами QGIS. Гидрографическая сеть (реки Трубеж, Малый Киржач, осушительные каналы) оцифрована по топографическим картам и спутниковым снимкам; ключевые узловые точки (впадение Трубежа в озеро, точка отвода воды в Малый Киржач и др.) отмечены как контрольные точки для расчётов.

Основным инструментом анализа – технологии ГИС. С использованием инструментов заполнения замкнутых депрессий определены области, где будет накапливаться вода при поднятии её уровня. Иными словами, были вычислены потенциальные зоны затопления болота при условии перекрытия существующей дренажной сети. Результатом явились растровые слои с границами предполагаемого затопления – вплоть до уровня, при котором избыточная вода начала бы переливаться через природные водоразделы или по сохранившимся каналам в соседние водосборы. Тем самым был определён максимальный контур нового водного зеркала. Все картографические материалы (модели рельефа, схемы водосбора болота и др.) подготовлены и проанализированы в среде QGIS с использованием модулей пространственного анализа и растровых вычислений.



Рис. 1. Рекогносцировочное обследование истока реки Трубеж (экспедиция, июль 2024). Берендеево болото, ручей Чернавка на выходе из болота.

Fig.1. Reconnaissance survey of the source of the Trubezh River (expedition, July 2024). Berendeevo swamp, Chernavka stream at the exit of the swamp.

В рамках исследования также рассмотрены возможности применения детальных гидрологических моделей HEC-HMS и MIKE SHE для прогноза динамики водного режима болота. Модель HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) предназначена для имитации полного цикла гидрологических процессов в водосборе, включая расчет поверхностного стока, инфильтрации и формирование гидрографов паводков. Модель MIKE SHE, в свою очередь, представляет интегрированную систему, описывающую в единой физически обоснованной структуре поверхностный сток, процессы в зоне аэрации и грунтовых вод, а также речной поток. В данной работе эти модели рассматривались теоретически – проведён их обзор и оценка применимости – но непосредственного численного моделирования с их помощью не выполнялось. На первом этапе исследования основное внимание уделено получению пространственной оценки потенциального затопления территории средствами ГИС, что позволило наглядно идентифицировать зоны восстановления болотной гидрологии без проведения сложного динамического моделирования.

2.2 Международный опыт восстановления болот

Восстановление деградированных болотных экосистем (прежде всего торфяников) становится приоритетным направлением мировой природоохранной практики из-за их ключевой роли в смягчении климатических изменений, сохранении биоразнообразия и регулировании водного режима. Хотя торфяники занимают лишь ~3% суши, в них аккумулируется порядка 25–30% всего углерода почв Земли. Здоровые, водонасыщенные болота накапливают углерод в течение тысяч лет, тогда как их осушение оборачивает этот

процесс вспять – ранее поглощённый органический углерод стремительно окисляется и поступает в атмосферу в виде парниковых газов. Осушенные торфяные массивы сегодня стали очагами деградации ландшафтов и источниками значительных парниковых выбросов.

Одновременно болота обеспечивают уникальные места обитания редких видов, фильтруют и накапливают пресную воду, защищают окрестности от наводнений и торфяных пожаров. Осознание этих функций привело к запуску глобальных инициатив по сохранению и восстановлению болот. В частности, действует Global Peatlands Initiative под эгидой ООН, Рамсарская конвенция выпускает руководства по восстановлению торфяников, а период 2021–2030 гг. объявлен ООН «Десятилетием восстановления экосистем». При этом торфяники обозначены одной из приоритетных экосистем для срочной реставрации как решение, основанное на природе (Nature-Based Solution). Ниже представлен обзор крупных проектов ренатурализации болот в разных регионах с анализом их целей, методов, достигнутых экологических эффектов, а также плюсов и минусов используемых подходов.

Германия. В Германии осушено около 1,8 млн га торфяников. Хотя болота занимают лишь ~7% земель сельскохозяйственного назначения страны, на их деградацию приходится порядка 7,5% совокупных парниковых выбросов (преимущественно CO_2 из разлагающегося торфа). В 2022 г. в Германии принята национальная стратегия по торфяникам, предусматривающая поэтапное прекращение дренажа и поднятие уровня грунтовых вод на больших площадях. Методы восстановления включают блокирование мелиоративных канав с помощью торфяных перемычек или шлюзов, поднятие уровня воды до околоповерхностного (0–10 см ниже дерна), а также конверсию осушенных земель в новые виды использования, совместимые с заболоченностью (выращивание тростника, осоки, мха сфагнума на влажном торфяном субстрате) [2]. ГИС-технологии активно применяются на этапах планирования и мониторинга: научный центр Грайфсвальдского университета (Greifswald Mire Centre) выпустил подробные цифровые карты распространения торфяников и связанных с ними эмиссий CO_2, что помогает выделить приоритетные регионы для реставрации. В целом немецкий опыт демонстрирует, что при достаточном финансировании и использовании современных цифровых инструментов можно сочетать восстановление болот с созданием инновационных отраслей «зелёной» биоэкономики. Из сложностей отмечаются высокая стоимость работ (необходимость в инженерных сооружениях и перепрофилировании угодий) и длительное время, требуемое для перестройки ландшафтов и рынка сельхозпродукции.

Финляндия. Финляндия — страна с обилием болотных ландшафтов. Болота занимают ~33% территории (≈9 млн га), однако более половины этой площади (около 4,5 млн га) в XX веке была осушена, главным образом под лесное хозяйство. С 1990-х гг. в Финляндии ведётся систематическая экологическая реставрация болот: за ~30 лет восстановлено около 28 тыс. га нарушенных торфяных угодий, преимущественно в охраняемых территориях. В 2019 г. стартовала государственная программа «Helmi» («Жемчужина»), направленная на сохранение биологического разнообразия. Основная цель — реабилитировать

деградированные сфагновые болота (верховые и переходные) посредством обводнения. Методы включают детальную предпроектную съёмку: анализируются старые аэрофотоснимки и карты, чтобы понять исходное состояние гидрологии участка до мелиорации. На местности канавы блокируются и заполняются естественным материалом – торфом, деревом, иногда устанавливаются глинистые перемычки или пластиковые сифоны. Часть мелких каналов полностью засыпается экскаваторами, возвращая микрорельеф болота к приближенным природным формам. В результате уровень грунтовых вод поднимается до исходного верхового горизонта. Это ведёт к оживлению болотной биоты: уже через несколько лет после обводнения фиксируется рост популяций водоплавающих птиц, болотных бабочек, мхов и растений, характерных для сырых местообитаний. Помимо биоразнообразия, отмечены и гидрологические улучшения – увеличивается влагоёмкость ландшафта, болота вновь начинают задерживать паводковые воды, снижая риски наводнений в низовьях [3].

Преимуществом финского подхода является участие государства — значительные бюджетные средства и наличие у государственных лесохозяйственных предприятий мандата на восстановление экосистем. Для повышения эффективности работ применяются ГИС-решения: создаются электронные базы данных осушенных болот, доступные планировщикам; проводятся дистанционные съёмки (LiDAR, БПЛА) для контроля за восстановлением рельефа и отслеживания изменения площади заболоченных участков. Издержки и ограничения: относительная трудоёмкость работ (ручное или машинное закрытие тысяч мелких канав), необходимость балансировать между восстановлением болотных угодий и целями лесного хозяйства. Опыт показывает, что восстановленные болота быстрее достигают устойчивого состояния, если в прилегающей местности сохраняется природный водосбор и минимизируется антропогенная нагрузка.

Швеция. В Швеции также значительные площади торфяников были дренированы, в основном под лесопосадки и сельское хозяйство. Осушенные торфяные леса составляют ~14% «продуктивных» лесных земель страны. Государственная политика в последние годы уделяет особое внимание повторному заболачиванию этих территорий как способу сократить выбросы парниковых газов. Реализуются пилотные проекты по закрытию дренажных канав в южной и центральной Швеции, где много осушенных низинных болот [4]. Например, в проекте «PEATWISE» проводили испытания разных методов подъёма воды на бывших торфяниках при сохранении определённой хозяйственной активности, чтобы найти баланс между снижением эмиссий и продолжением землепользования. В качестве восстановительных мер используются торфяные дамбы, подпруживание лесных канав, создание небольших запруд, а на некоторых участках – очистка ранее захламлённых русел ручьёв для равномерного увлажнения прилегающих болот. Одним из примеров является восстановление болотных массивов в ландшафтном заповеднике Руген (южная Швеция), где в 2020–2023 гг. возвратили воду на деградированные лесные болота и в настоящее время проводят мониторинг изменений грунтовых вод и эмиссии парниковых газов [5].

ГИС и цифровое моделирование играют важную роль в шведских проектах: учитывая огромные площади труднодоступных заболоченных лесов, были разработаны методы лазерного сканирования торфяников. С помощью лазерного сканирования и машинного обучения составлены подробные карты распространения и глубины торфяных почв, показавшие, что общая площадь болот в шведских лесах составляет около 60–72 тыс. км². Эти карты открыты для планировщиков и используются при выборе приоритетных участков для восстановления, оценки ёмкости углеродных хранилищ и прогнозирования эффекта мер по обводнению. Преимущества шведского подхода – чёткая ориентация на климатический эффект (расчёт сокращения выбросов от каждого восстановленного гектара) и интеграция восстановления в лесохозяйственную политику (например, возможность получать компенсации за «углеродное землепользование» болот вместо лесных вырубок). Ограничения — конфликт целей: часть осушенных торфяников используется под продуктивные еловые леса, и возвращение воды там означает потерю лесоматериала.

Беларусь. Беларусь обладает одними из крупнейших болот в Европе (≈2,6 млн га, ~15% территории страны), но более половины этой площади (≈1,5 млн га) была дренирована под сельское хозяйство, лесопосадки и промышленную добычу торфа. К началу 2000-х многие выработанные торфоразработки и заброшенные мелиоративные системы превратились в проблемные земли – непригодные для агроиспользования, регулярно горящие торфяные поля [6]. С 2008 г. Беларусь, опираясь на международную поддержку, реализует национальную программу восстановления торфяников. За ~15 лет восстановлено около 50 тыс. га, что ставит Беларусь в число лидеров региона по масштабу ренатурализации торфяных экосистем.

Сравнительный анализ проектов Германии, Финляндии, Швеции и Беларуси представлен в таблице 1. Приведенные в таблице 1 показатели эффектов (сокращение выбросов, прирост видов и т.д.) усреднены по источникам и проектам. Фактические значения зависят от локальных условий каждого болота.

Таблица 1. Сравнительная таблица международных проектов восстановления болотных угодий
Table 1. Comparative table of international wetland restoration projects.

Страна	Площадь осушения	Основные методы	Роль ГИС	Эффекты	Ограничения
Германия	~1,8 млн га торфяников осушено	поднятие уровня грунтовых вод за счёт перекрытия дренажных канав торфяными и деревянными плотинами; установка шлюзов для регулировки уровня; перевод осушенных лугов под палудикультуру (посадка тростника, осоки на увлажнённых торфяниках)	национальные цифровые карты торфяников (распространение, глубина, выбросы CO2) – созданы при участии Greifswald Mire Centre; модель MoorFutures используется для оценки сокращения выбросов	снижение годовых выбросов CO2 (торфяные почвы превращаются из источника углерода в его поглотитель); восстановление типичной болотной растительности и водно-болотной орнитофауны; уменьшение поверхностного стока и эрозии; появление новых видов биоэкономической продукции (биомасса тростника и др.)	высокая стоимость работ; конфликт с традиционным сельским хозяйством (затопление пастбищ требует компенсаций фермерам); медленная окупаемость инвестиций; необходимость постоянного обслуживания плотин и насосных систем
Финляндия	>4 млн га болот осушено (в т.ч. ~50 тыс. га в охраняемых территориях)	полное закрытие мелиоративных канав (засыпка) с восстановлением микрорельефа – созданием бугров и мочажин; установка торфяных перемычек из вынутого грунта; возведение деревянных и каменных дамб; общее «удержание воды» в ландшафте	анализ исторических карт и аэрофотоснимков для планирования; высокодетальная LiDAR-съёмка рельефа для выявления осушенных участков; создание ГИС-слоёв «осушенности» для выбора приоритетных болот; полевой мониторинг уровня грунтовых вод автоматическими датчиками	поднятие уровня грунтовых вод до естественного; возвращение сфагновых мхов, болотных растений и насекомых; рост популяций болотных птиц; улучшение качества воды (меньше выноса нитратов с дренажным стоком); восстановленные болота вновь начинают аккумулировать углерод вместо утечки в атмосферу	сложность работ из-за тысяч мелких канав; необходимость долгосрочного мониторинга; возможен временный рост выбросов метана; сопротивление лесного сектора (обводнение лесопосадок снижает их продуктивность)
Швеция	5–7 млн га торфяных земель осушено (в лесном фонде насчитывается 60–72 тыс. км² болот)	блокирование лесных дренажных канав торфяными и деревянными плотинами; частичное подтопление торфяных лесов; восстановление мелких болотных озёр; управление стоком через регулируемые шлюзы на крупных каналах	масштабное лазерное сканирование болот (национальная 10-метровая DEM на основе LiDAR) для выявления дренированных участков; модели водного баланса для оценки сокращения выбросов CO2; дистанционное зондирование для отслеживания изменений увлажнённости	сокращение эмиссии CO2 после обводнения (~5–10 т/га*год); снижение пожарной опасности; возврат гидрофильных видов мхов и лишайников; повышение влажности почвы в лесах, что смягчает риски засух и буреломов	противоречия с лесопользованием (потеря продуктивных посадок); технические сложности переувлажнения в холодном климате (усиление выделения CH_4); необходимы стимулы для землевладельцев; требуются меры по контролю состояния плотин
Беларусь	~1,5 млн га торфяников деградировано вследствие осушения	перекрытие мелиоративных каналов торфяными, песчаными и деревянными плотинами (нерегулируемые сооружения); на крупных каналах – бетонные шлюзы для управления стоком; затопление выработанных торфяных карьерных полей; создание земляных валов по периферии болот; посев гидрофильной растительности (тростник, рогоз) для закрепления размываемого грунта	разработан национальный кадастр торфяников и алгоритм размещения плотин (учёт площади, рельефа); проводится гидрологическое моделирование до вмешательства; спутниковый мониторинг позволяет отслеживать изменения (индексы NDVI/NDWI); накопленный опыт передаётся в другие страны (обмен методиками с РФ и др.)	прекращение торфяных пожаров на восстановленных массивах; снижение эмиссии CO2 на 80–90% по сравнению с дренированными торфяниками; восстановление водно-болотной орнитофауны (стабилизация численности вертлявой камышевки и др. видов); начало нового торфонакопления на некоторых болотах; развитие палудибизнеса (заготовка биомассы тростника на топливо и подстилку)	недостаточность ресурсов, чтобы охватить все ~0,5 млн га нарушенных торфяников; часть торфяников по-прежнему используется под агросектор и торфодобычу; требуется постоянный уход за гидротехническими сооружениями; сезонные засухи могут снижать эффект обводнения; с 2020 г. санкционные ограничения на международное финансирование экопроектов

Основные цели проектов: прекратить торфяные пожары, уменьшить выбросы парниковых газов, восстановить места обитания редких видов и дать пригодное для людей альтернативное использование болот (например, сбор тростника, ягод, рекреация). В качестве метода обводнения белорусскими учёными разработан «Кодекс лучших практик по восстановлению торфяников», адаптированный к местным условиям. На каждом болоте перед работами проводится мультидисциплинарное обследование (гидрология, почвы, биоценоз, экономические аспекты) для разработки индивидуального технического решения. Как правило, по периметру и внутри торфяника устанавливаются плотины на мелиоративных каналах – используются местные материалы: древесина, мешки с песком, грунт, часто сам торф из канав. На широких канавах возводят перекрытия из геотекстиля с грунтом или даже бетонные шлюзы на случай, если нужна регулировка уровня воды. Выбор

типа и расположения перекрытий осуществляется с помощью гидрологических моделей: разрабатывается алгоритм расчёта оптимального числа и мест плотин, исходя из размеров болота, рельефа и текущей дренажной сети. Затем техника (например, болотоходные экскаваторы) перекрывает каналы, создает перемычки, иногда возводит кольцевые валы по краям торфяного массива, чтобы удерживать талые и дождевые воды. Уже на следующий сезон после обводнения отмечается значительное поднятие уровня воды на восстановленных болотах, их повторное заболачивание. Достигнутые эффекты: по данным Минприроды РБ и НАН Беларуси, на восстановленных 50 тыс. га практически полностью прекратились торфяные пожары. Например, в заказнике «Ельня» с возвращением воды исчезли ежегодные возгорания торфа, ранее охватывавшие тысячи гектаров. Существенно сократились выбросы CO_2 — оценочно, каждый гектар после обводнения сокращает эмиссию парниковых газов на 20–30 тонн CO_2-экв. в год за счёт прекращения окисления торфа и возобновления накопления углерода растительностью. На ряде болот возобновилось торфонакопление (отмечен прирост торфяного слоя на несколько миллиметров в год) — признак восстановления естественного торфяного баланса. Биоразнообразие также отреагировало на изменения: стабилизировались или выросли популяции водно-болотных видов птиц (вертлявая камышевка, гоголь, журавль), вернулись редкие виды растений (росянки, орхидеи), появились массовые поля ягод (клюква, голубика) на местах бывших гарей [7]. Белорусские специалисты активно применяли цифровые модели рельефа и гидрологические расчёты. Например, для каждого проекта строилась модель водосбора и водного баланса, что позволило оптимально расположить сооружения. Впоследствии все восстановленные болота ставятся на дистанционный мониторинг – спутниковые снимки используются для отслеживания динамики уровня воды (по индексу NDWI) и изменений растительного покрова.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Применимость решений для Берендеева болота

Рассмотренные мировые примеры показывают, что независимо от климатической зоны основные принципы успешной ренатурализации торфяников имеют много общего:

- восстановление гидрологического режима (поднятие уровня грунтовых вод до близкого к естественному);
- прекращение дренажа и эрозии;
- стимулирование роста характерной болотной растительности.

Для условий Центральной России – на примере Берендеева болота – наиболее релевантен опыт умеренной зоны Европы и Беларуси. Берендеево болото, будучи аналогом низинных и переходных болот Белорусского Полесья, может извлечь пользу из следующих решений:

3.2 Перекрытие дренажных каналов и канав

Как показали проекты в Беларуси, Германии и Финляндии, самый прямой путь к восстановлению – обводнение через блокирование существующей мелиоративной сети. Для Берендеева болота целесообразно провести инвентаризацию всех сохранившихся каналов и перекрыть ключевые из них. На основе гидрологических моделей следует спланировать установку торфяных и грунтовых перемычек. Ожидается, что это подняло бы уровень грунтовых вод, снизило минерализацию торфа и предотвратило бы возможные пожары.

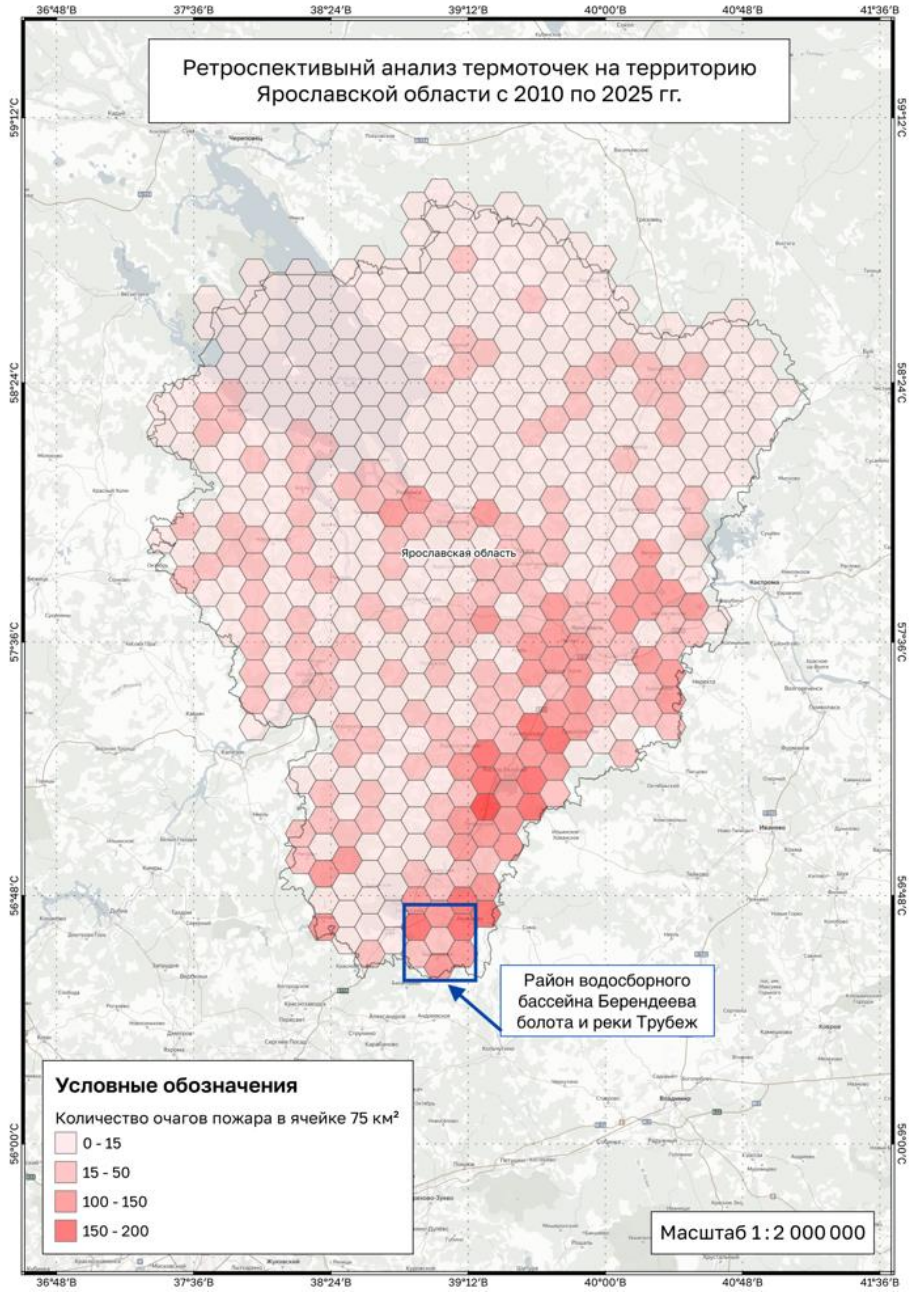


Рис. 2. Картосхема ретроспективного анализа термоточек на Ярославскую область

Fig. 2. Cartographic diagram of the retrospective analysis of thermal points in the Yaroslavl region

С помощью набора спутниковых данных и ГИС-инструментов был проведен ретроспективных анализ термоточек на Ярославскую область с 2010 по 2025 гг. (рис. 2).

По картосхеме видно, что в районе бассейна Берендеева болота наблюдается высокое количество очагов природных возгораний.

3.3 Методы непосредственного обводнения

Хорошо зарекомендовали себя простые торфяные дамбы. Технологию, которую применяли белорусские специалисты, можно перенести на Берендеево болото: использовать местный торф и грунт как строительный материал, укладывать плотины «внахлёст» по длине канала, с запасом высоты на возможную усадку материала. На крупных каналах-коллекторах целесообразно установить деревянно-глиняные шлюзы, чтобы при необходимости была возможность спустить воду (в экстремально влажные годы) или регулировать уровень. Установка регулируемых сооружений, вероятно, дала бы более гибкое управление водным режимом, но это значительно дороже и требует регулярного обслуживания, поэтому на начальном этапе достаточно пассивных перемычек.

3.4 Восстановление растительности

Мировой опыт подчёркивает важность реинтродукции ключевых видов растений – в первую очередь сфагновых мхов – для ускорения восстановления экосистемы. Для оценки флоры Берендеева болота следует провести ботаническое исследование, на основе которого принять решение о высадке на обезвоженные участки маты сфагнума, а также рассадке живых куртин характерных видов (росянки, пушицы, багульника и др.), которые могли сохраниться на близлежащих референсных болотцах. Это ускорит возвращение экосистемы к естественному состоянию.

3.5 ГИС и цифровое планирование

Применение ГИС-анализа рельефа для Берендеева болота позволило выявить ключевые области, которые подлежат затоплению при восстановлении его водного режима. В результате пространственного моделирования получены потенциальные зоны затопления болота по уровням высот (рис. 3), отображающие участки внутри границ болота, где вода будет устойчиво удерживаться при прекращении дренажа на каждой из высот с шагом 1м. Расчёты по ЦМР показали, что после блокирования существующих каналов вода начнёт заполнять понижения и выработанные котлованы, формируя единый водный массив на значительной части болота. По данным пространственного анализа, суммарная площадь устойчивого затопления может составить значительную долю территории болота (точное значение зависит от сценария подъёма уровня воды).

Визуальный анализ продольных профилей рельефа подтвердил, что наиболее глубокие впадины совпадают с районами наиболее интенсивных торфоразработок в прошлом, что коррелирует с ожидаемыми местами максимального накопления воды.

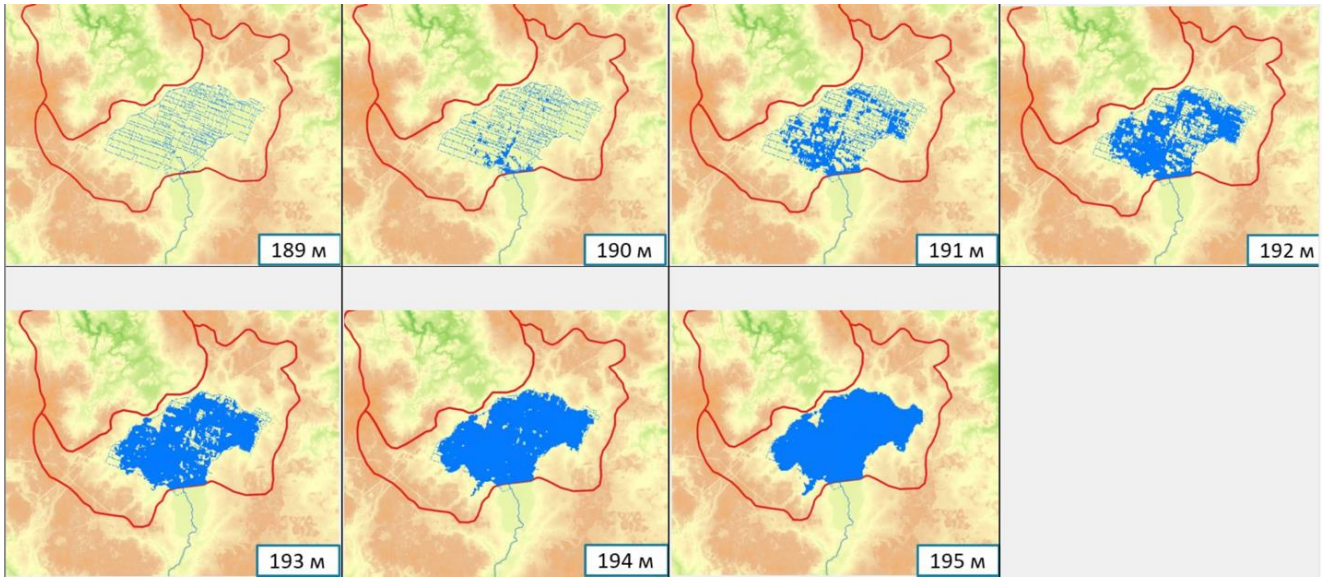


Рис. 3. Визуализация зон затоплений
Fig. 3. Visualization of flood zones

Границы зон на схеме проведены по отметкам рельефа до уровня, при превышении которого вода предположительно начнет переливаться за пределы болотного массива – через естественные водоразделы либо по существующим каналам в смежные водосборы. Таким образом, схема позволяет определить, какие участки болота возобновят функции накопления и удержания воды. Проведение гидрологического моделирования позволит провести в ГИС более точное моделирование обводнения территории и выйти на моделирование проточности оз. Плещеево.

Использование современных геоинформационных инструментов — ключ к эффективному проекту ренатурализации. Для Берендеева болота необходимо задействовать аэрофотосъёмку или съемку с БПЛА для построения более точной цифровой модели рельефа с более высоким разрешением. Это поможет точнее определить оптимальные места для плотин и участки, наиболее нуждающиеся в увлажнении. Опыт белорусских коллег показывает важность сбора всех данные (топография, гидрология, землепользование, землеустройство) в единой ГИС-платформе для управления проектом. В дальнейшем для мониторинга можно использовать спутниковые индексы влажности (NDWI) либо установить простые автоматические датчики уровня воды в ключевых точках.

3.6 Ожидаемые эффекты

Применение перечисленных мер на Берендеевом болоте (по аналогии с проектами в Беларуси) приведёт к стабилизации гидрологического режима: болото будет дольше удерживать талые и дождевые воды, что повысит водность местного водосбора (Берендеево болото питает реки Малый Киржач и Трубеж). Также снизится пожарная опасность: насыщенный водой торф не горит, а окружающие леса станут менее подвержены

верховым пожарам благодаря влажному микроклимату. Восстановится углеродная функция болота – вместо источника CO_2 (осушенные торфяники Центральной России сейчас эмитируют ~5–10 т С/га*год) оно начнёт вновь аккумулировать углерод. Биоразнообразие выиграет: можно ожидать увеличение численности журавлей, бекасов, уток, появления редких видов мхов. Берендеево болото уже сейчас имеет статус памятника природы за уникальную флору; ренатурализация усилит его природную ценность.

В заключение, мировой лозунг охраны торфяников «Moor muss nass» («болото должно быть мокрым») полностью применим и для России – только во влажном состоянии болото выполняет свои природные функции. От Европы до тропиков восстановление торфяников приносит множественные выгоды: от сокращения парниковых выбросов до возрождения живой природы и появления новых экономических возможностей. Решения, опробованные в зарубежных проектах, могут быть адаптированы для Центральной России. Берендеево болото, при наличии научно обоснованного плана восстановления и участии заинтересованных сторон, способно стать образцовым проектом ренатурализации торфяника в регионе. Это не только сохранит уникальный уголок природы, но и станет вкладом в достижение национальных целей по восстановлению гидрологического режима водных объектов бассейна и сохранению биосферных функций экосистем.

Полученные результаты демонстрируют целесообразность использования ГИС и цифровой модели рельефа как основного инструмента для предварительной оценки обводнения экосистемы Берендеева болота. Преимущество такого подхода – наглядность и относительная простота: анализ ЦМР позволяет быстро и экономично определить потенциально затопляемые территории. Эти данные служат ценным основанием для планирования восстановительных мероприятий. В частности, картографирование зон затопления даёт возможность целенаправленно размещать гидротехнические сооружения (перекрытия каналов, небольшие плотины) именно там, где они обеспечат максимальный эффект по удержанию воды. Кроме того, пространственный анализ с использованием ГИС позволил интегрировать разнородные данные – топографию, сведения о загрязнителях притоков реки Трубеж, современные спутниковые снимки – и получить целостную картину современного состояния болота, а также прогноз его изменений при повторном обводнении.

Ограниченность применённого подхода заключается в статичности полученной оценки. Фактически анализ по ЦМР отразил геометрию затопления, но не учитывал динамические гидрологические процессы – осадки, испарение, инфильтрацию и подпитку грунтовых вод. Для полноценного прогноза развития экосистемы при восстановлении водного режима необходимы дальнейшие исследования с привлечением расчётных моделей. Изученные в подготовке методики (HEC-HMS, MIKE SHE) представляются перспективными инструментами для таких целей. Их применение в последующих работах позволит количественно оценить водный баланс болота во времени: например, вычислить

приток поверхностного стока с водосбора при различных сценариях дождей и снеготаяния (с помощью HEC-HMS) и смоделировать взаимодействие поверхностных и подземных вод в условиях восстанавливающегося торфяника (с помощью MIKE SHE). Интеграция этих моделей даст возможность прогнозировать колебания уровня воды на болоте по сезонам, оценивать риски перелива или, наоборот, неполного заполнения отдельных участков, а также анализировать качество воды на выходе из восстановленной экосистемы. Таким образом, включение динамических гидрологических моделей дополнило бы ГИС-анализ, добавив временной компонент и повысив точность прогнозов.

В дальнейшем рекомендуется совместить оба подхода: использовать ГИС как основу для пространственного планирования и первичной оценки, а математическое моделирование – для проверки различных сценариев и оптимизации проекта обводнения. Такой комбинированный методический подход обеспечит более надёжное научное обоснование мероприятий по восстановлению Берендеева болота. Настоящее исследование подчёркивает ключевую роль ГИС на начальном этапе — без сложных вычислительных моделей удалось получить важные сведения о зонах затопления и потенциальной конфигурации нового водоёма.

3.7 Экологические перспективы

Восстановление гидрологических связей между болотом и озером несёт множество экологических преимуществ. Ожидается улучшение качества воды озера Плещеево за счёт разбавления и вымывания избыточных биогенных элементов. Повышение уровня грунтовых вод в самом болоте создаёт условия для возвращения типичной болотной растительности (сфагновых мхов, осок) и обитания водоплавающих птиц. Зарубежные данные показывают, что сразу после повышения уровня воды на деградированных торфяниках возвращаются редкие виды. Так, на восстановленных болотах Беларуси уже через год появились кулики и журавли, ранее исчезнувшие из осушенных участков. Есть основания ожидать, что Берендеево болото также вновь станет местом обитания богатой болотной фауны. Более того, увеличение заболоченной площади в верховьях Трубежа сыграет роль естественного фильтра: болото способно задерживать взвеси и избыточные питательные вещества, предотвращая их поступление в озеро. Помимо перечисленных выше предположений, важную роль играет предотвращение пожаров.

3.8 Потенциальные риски

Несмотря на позитивные прогнозы, реализация обводнения сопряжена с рисками и должна проводиться с осторожностью.

Во-первых, существует риск локальных наводнений: в сезон сильных дождей или весеннего половодья при недостаточном контроле избыточная вода может затопить низкие прилегающие территории (например, сельхозугодья или постройки возле болота).

Во-вторых, возможны изменения качества воды: поднятие уровня может мобилизовать накопленные в торфяной толще вещества, что ухудшит цветность воды, а приток органики в озеро может вызвать краткосрочный всплеск продуктивности фитопланктона. Для минимизации этих рисков следует усилить мониторинг гидрохимических показателей, чтобы вовремя заметить и устранить такие эффекты.

В-третьих, произойдут биологические изменения: смена водного режима повлияет на экосистему болота – часть древесной растительности погибнет от подтопления, изменится сообщество почвенных микроорганизмов. Хотя в долгосрочной перспективе эти изменения желательны (возврат к болотной экосистеме), на начальном этапе они могут сопровождаться, к примеру, всплеском метаногенеза. Известно, что после ренатурализации торфяников метановые выбросы возрастают, так как восстановление анаэробных условий активизирует метанобразующие микробы [8].

Еще один важный аспект – влияние на соседний бассейн реки Малый Киржач. Перекрытие отвода болотных вод в этот приток восстановит сток в р. Трубеж, но уменьшит питание р. Малый Киржач, что теоретически может негативно сказаться на его экосистеме. Однако можно предположить, что ожидаемый эффект не будет столь значительным, поскольку изначально отвод был искусственным и река не получала эти воды и у нее есть собственный водосбор. Тем не менее, следует учесть этот риск и при проектировании координировать действия с водохозяйственными организациями по бассейну р. Малый Киржач.

3.9 Социально-экономические факторы

Возврат болота к природному состоянию может столкнуться с непониманием местных жителей, которые привыкли использовать осушенные земли. Необходима разъяснительная работа и поиск компромиссов – как уже отмечалось, возможно, обустройство экологической тропы, привлечение местных жителей к мониторингу и обслуживанию территории. Международный опыт (например, программы Care-Peat в Европе) показывает, что вовлечение местного сообщества существенно повышает успех восстановительных проектов.

3.10 Влияние восстановления гидрологического режима болота на температурный и кислородный режим воды в озере Плещеево

Известно, что застойные водоёмы с длительным временем водообмена подвержены сильному летнему прогреву, формированию устойчивой температурной стратификации и сезонному дефициту кислорода в придонных слоях. Это провоцирует анаэробные процессы в донных отложениях и высвобождение из них аммония, соединений железа и фосфора, усугубляя эвтрофикацию. Восстановление стока из Берендеева болота может способствовать частичному смягчению этих процессов. Дополнительный объём

поступающей воды, особенно весной и в начале лета, будет способствовать перемешиванию озёрных водных масс и оксигенации глубинных слоёв. Хотя приток из болота невелик в процентном отношении к объёму озера, его сезонная динамика (весенний паводок) способна повлиять на стратификацию и вертикальную циркуляцию. Эти предположения требуют отдельного численного моделирования с использованием гидрофизических моделей (например, CE-QUAL-W2 или Delft3D).

3.11 Комплексность подхода к восстановлению

Обводнение Берендеева болота не должно рассматриваться как изолированная мера. Для устойчивого улучшения состояния озера Плещеево нужны параллельные усилия: сокращение загрязнения водосбора озера (в том числе – диффузного загрязнения), регулирование рекреационной нагрузки на озеро, создание буферных прибрежных зон с болотной и луговой растительностью. Кроме того, проект восстановления болота должен сопровождаться детальной оценкой и постоянным мониторингом экологических факторов. В этой связи необходимым условием для достижения успеха является совершенствование системы мониторинга Национального парка через внедрение автоматизированных систем наблюдения за уровнем воды, расходом, качеством поступающей воды и т.п., а также возможность регулярно проводить исследования и отслеживать изменения в биоценозах болотной и озёрной экосистем. Современные методы мониторинга – дистанционное зондирование (спутниковые индексы NDVI, NDWI, снимки Sentinel-2), автоматические логгеры, БПЛА, наземные сенсоры – позволяют отслеживать динамику среды в режиме реального времени. Эти данные будут незаменимы для оперативного управления проектом и научного анализа его эффективности.

Таким образом, ренатурализация Берендеева болота может стать примером комплексной экологической реконструкции, учитывающей гидрологические, климатические, экологические и социальные аспекты. Её реализация способна внести вклад не только в улучшение состояния озера Плещеево, но и в развитие методической базы природо-ориентированных решений для других регионов России.

4 Выводы

Берендеево болото исторически играло ключевую роль в питании реки Трубеж и поддержании водного баланса озера Плещеево. Осушение болота в середине XX века привело к ослаблению притока и снижению проточности озера, что, вероятно, способствовало неблагоприятным экологическим эффектам (застой воды, «цветение» водорослей, локальная гибель рыбы).

Проведённое исследование продемонстрировало потенциал интеграции геоинформационных систем в процесс планирования восстановления деградированных водно-болотных экосистем, служащих ключевыми звеньями регионального водного и

экологического баланса. На примере Берендеева болота показано, что пространственное моделирование, основанное на цифровой модели рельефа и анализе водосборной структуры, способно выявить зоны возможного затопления. На начальном этапе – до запуска математических моделей и привлечения обширных данных по гидрологии – можно получить картографическую основу для принятия управленческих решений. ГИС-технологии позволяют перейти от интуитивных или описательных подходов к формализованному проектированию обводнения.

Важным следствием стало осознание потенциальной роли Берендеева болота как природного буфера и стабилизатора гидрологического режима. Повышение увлажнённости верховий р. Трубеж способно повлиять на водообмен в озере Плещеево, на уровень кислорода в глубинных горизонтах, на увеличение проточности озера. Полученные результаты подтверждают актуальность создания более детализированных цифровых моделей рельефа (вплоть до лазерного сканирования), а также интеграции ГИС-подхода с динамическими гидрологическими моделями и дистанционным мониторингом.

Таким образом, исследование заложило концептуальные основы для запуска комплексного проекта обводнению Берендеева болота с использованием ГИС как опорной технологии.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» https://rgo.ru/

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю к.т.н. Г.И.Загребину за методическое руководство, всестороннюю научную поддержку и ценные консультации, оказанные в процессе выполнения работы. Особая благодарность адресуется руководителям экспедиции к.б.н. Г.Д. Кузнецовой и д.г.н. В.В. Браткову за организацию комплексных обследований, профессиональное сопровождение и предоставление эмпирических данных. Отдельную признательность автор выражает зав. лабораторий гидроинформатики Института водных проблем РАН к.г.н. В. М. Морейдо за консультации и участие в обсуждении результатов исследований.

Библиография

1. LIFE Peat Restore Project. Climate change mitigation by means of rewetting peatlands (Final Report). – EU LIFE Programme, 2022. – 71 p.

2. Peatland restoration in Germany: A dynamic general equilibrium analysis // Ecological Economics. – 2024. – Vol. 220(C). – Article ID: 108187. – DOI: 10.1016/j.ecolecon.2024.108187.

3. Peatland restoration strengthens Finland's biodiversity [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://finland.fi/life-society/peatland-restoration-strengthens-finlands-biodiversity

4. Nordic Council of Ministers. Peatland restoration in the Nordic-Baltic region. – Temanord 2025:524. – 2025 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pub.norden.org/temanord2025-524/8-sweden.html

5. Elenius M., Pers C., Schützer S., Arheimer B. Where can rewetting of forested peatland reduce extreme flows? // Hydrology and Earth System Sciences Discussions. – 2024. – Preprint. – DOI: 10.5194/hess-2024-271. – Режим доступа: https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2024-271/

6. United Nations Environment Programme. Smoke on the Water: Countering Global Threats from Peatland Loss and Degradation. – Nairobi: UNEP, 2022. – 96 с.

7. Kozulin A., Bambalov N., Belyakova N., Korol I., Minchenya P., Lisyukov M. *Belarus: Development of a National Peatland Strategy*. – Minsk: Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus; IUCN UK Peatland Programme, 2018. – 20 с.

8. Günther A., Tiemeyer B., Köhler S., et al. Increased methane emissions following peatland rewetting – a meta-analysis // Communications Earth & Environment. – 2024. – Т. 5. – № 150. – DOI: 10.1038/s43247-024-01226-9.

The Potential of Watering the Berendeyev Swamp to Increase the Flow Rate of Lake Pleshcheyevo: Prospects and Challenges

Ekaterina A. Borisova [1]*
[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
* Madam.borisovakate@yandex.ru

Keywords lake Pleshcheyevo, Berendeyevo swamp, flooding, GIS, modeling, water exchange, hydrological model

Abstract Lake Pleshcheyevo is experiencing environmental problems related to water stagnation, including water blooming and local fish deaths. The article considers the possibility of restoring the hydrological connection between Lake Pleshcheyevo and the drained Berendeyev swamp by renaturalizing the latter. The drainage of the swamp in the 20th century disrupted the water regime of the Trubezh River, the main tributary of the lake, which probably contributed to the degradation of water exchange and the increase in

eutrophication. A spatial analysis of potential flooding zones during repeated flooding of the Berendeyev swamp was carried out using geoinformation technologies. The constructed digital model of the relief made it possible to estimate the volume of retained water and the configuration of the future water mirror. The international experience of the renaturalization of swamps is also analyzed, confirming the effectiveness of such measures to restore ecosystem functions: regulation of runoff, carbon accumulation, and increase biodiversity. The environmental prospects and risks of the project are discussed, including possible impacts on hydrochemistry, water exchange, and climate. The key role of GIS at the preliminary planning stage and the need for further application of mathematical models are noted. Recommendations for the implementation of irrigation of the Berendeyev swamp using GIS and adaptive management, as well as monitoring measures are proposed. The results demonstrate the potential of an integrated approach to restoring wetland ecosystems using digital tools.

Acknowledgements

The research was carried out within the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage". The publication was carried out with the financial support of the Russian Geo-Geographical Society, an All-Russian public organization https://rgo.ru.

The author expresses his deep gratitude to the scientific supervisor, Candidate of Technical Sciences G.I. Zagrebin, for his methodological guidance, comprehensive scientific support and valuable advice provided during the work. Special thanks are addressed to the expedition leaders, PhD Kuznetsova G.D. and PhD Bratkov V.V. for organizing comprehensive surveys, professional support and providing empirical data. The author also thanks the Rediscovering Russia program for its assistance in conducting research and contribution to the development of expeditionary activities. Special thanks are due to the Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences (Borok) and researcher Alexander I. Tsvetkov for consultations and participation in scientific support of research.

УДК 504.064.2: 504.05:528.9:351/354/ UDC 504.054:528.9

Организационно-технологическая схема реагирования органов государственной власти и органов местного самоуправления на результаты экологического мониторинга (на примере озера Плещеево)





С.Г. Герасимова[1*], С.В. Серебряков[1,2]**

[1] АО «Оператор пространственных данных и сервисов», Москва, Россия

[2] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

*s.g.gerasimova@gmail.com, ** serebryakovsv@mail.ru

Ключевые слова экологический мониторинг, национальный парк, межведомственное взаимодействие, ситуационный центр, градостроительное регулирование, ГИС-мониторинг, устойчивое управление

Аннотация В условиях роста рекреационной нагрузки и климатической нестабильности экологический мониторинг приобретает ключевое значение как механизм раннего предупреждения и устойчивого управления территориями. На примере Национального парка «Плещеево озеро» исследование выявляет институциональные, технологические и управленческие разрывы между сбором данных о состоянии окружающей среды и принятием решений на муниципальном и региональном уровнях. Разработана организационно-технологическая схема реагирования, основанная на концептуальном моделировании, цифровых инструментах и сценарном подходе. Предложенная модель включает цикл «мониторинг — анализ — оповещение — реакция — оценка», распределяя функции между федеральными ведомствами (Росприроднадзор, Роспотребнадзор), дирекцией национального парка, органами местного самоуправления и научным сообществом. Модель демонстрирует воспроизводимость и масштабируемость, предлагая прототип для других ООПТ России.Сделан вывод о необходимости институционализации межведомственного взаимодействия и цифровой трансформации природоохранного управления в целях охраны здоровья населения и сохранения экосистем.

1 Введение

В условиях роста антропогенной нагрузки и изменения климата экологический мониторинг приобретает решающее значение как система раннего предупреждения и основа для принятия управленческих решений. Он представляет собой не просто сбор данных о состоянии компонентов окружающей среды, но и инструмент выстраивания механизмов межведомственного реагирования и взаимодействия на различных уровнях управления. Особенно это важно для территорий с высокой природоохранной ценностью и социально-рекреационной значимостью, таких как Национальный парк «Плещеево озеро».

Плещеево озеро — природный комплекс федерального значения, характеризующийся хрупким балансом между природоохранной функцией, хозяйственным использованием и туристической нагрузкой. Здесь наблюдается острое противоречие между различными субъектами хозяйствования: с одной стороны — дирекция Национального парка как орган федеральной власти, уполномоченный заниматься охраной природы; с другой — частные и муниципальные пользователи, действующие согласно нормативно-правовым актам (НПА), зачастую - без прямой координации. Наиболее типичная ситуация — размещение объектов туризма, частного жилья и инфраструктуры водного транспорта на территории, регулируемой одновременно федеральным природоохранным режимом (ООПТ) и муниципальными или региональными программами развития.

При этом Национальный парк не включён в контур целевого управления бассейном Волги в рамках одноимённой федеральной программы, что делает невозможным полноценную увязку природоохранных и водохозяйственных решений. Это создаёт разрыв между федеральными задачами и локальной реализацией политики охраны среды и здоровья населения.

Сама структура мониторинга на таких территориях (как показано в региональных отчётах и планах управления) уже достаточно развита: включены показатели по гидрохимии, микробиологии, биоиндикации, рекреационным нагрузкам, шуму. Однако отсутствует единая организационно-технологическая схема, которая бы определяла, кто, как и когда должен реагировать на те или иные превышения или отклонения. Большинство данных либо остаются в отчётности, либо передаются в несвязанные ведомственные системы, где нет процедуры преобразования информации в управленческое действие.

В научной литературе данная проблема получила частичное освещение. Авторы Куролап, Губер, Козеева и др. [1,2,3] подчёркивают необходимость создания ситуационных центров и ГИС-платформ, обеспечивающих автоматизированное оповещение и сценарный анализ. Однако в реальных условиях национальных парков такие системы либо отсутствуют, либо находятся на уровне пилотных инициатив. Системность и воспроизводимость реагирования, особенно в межведомственном аспекте, по-прежнему слабо проработаны.

В международной литературе Brander, Loomis, Freeman и др. [4,5,6] предлагают подходы на основе экономической оценки экосистемных услуг и их интеграции в управленческие механизмы. В ряде стран акцент делается на то, чтобы стоимость утраты или деградации экосистем автоматически инициировала действия: от компенсаций до административных санкций. На этом основании формируется система экологического

менеджмента (EMS) как часть общей системы управления, что соответствует подходам, изложенным в стандартах ISO 14000[1] и Рамочной конвенции ООН по устойчивому развитию (Рио-де-Жанейро, 1992).

Цель данного исследования — разработать воспроизводимую и управляемую модель организационно-технологической схемы реагирования органов государственной власти и органов местного самоуправления на результаты экологического мониторинга на примере НП «Плещеево озеро». Модель должна учитывать не только технологическую цепочку «показатель → решение», но и институциональные особенности: множественность акторов, разграничение полномочий и недостаточную увязку с водосборной системой. Это позволит не только выстроить сценарии реагирования, но и повысить устойчивость экологического управления в условиях ограниченного бюджета и растущей рекреационной нагрузки.

2 Материалы и методы

Исследование основано на системном междисциплинарном подходе, объединяющем нормативно-правовой анализ, концептуальное моделирование, функционально-структурное картографирование субъектов управления, а также инструменты цифрового и гидроэкологического мониторинга. Особенность подхода состоит в интеграции разрозненных управленческих, санитарных и экологических данных в единый сценарный контур реагирования — с фокусом на территорию Национального парка «Плещеево озеро» и прилегающих населённых пунктов.

2.1 Источники данных

В исследовании использованы разнообразные группы данных:

Нормативно-правовая база**:**

- Федеральные законы: № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», № 33-ФЗ «Об ООПТ»;
- Постановления Правительства РФ № 219 (о мониторинге ООС), № 486 (о СГМ);
- Приказы Минприроды, Роспотребнадзора, Росгидромета, регламенты и формы 2-ТП, 5, 18 и др.;
- Региональные документы Ярославской области (законы и стратегии в сфере экологии и здравоохранения);
- Муниципальные программы г.Переславль-Залесский (экологическая безопасность, охрана здоровья).

Эмпирические и экспедиционные данные:

- Результаты натурных наблюдений и интервью, собранные в рамках студенческих экспедиций в НП «Плещеево озеро» (июль 2024, октябрь 2024);
- Официальные отчёты дирекции национального парка (2020–2023);

[1] ISO 14001:2015. Environmental Management Systems – Requirements with Guidance for Use. International Organization for Standardization

- Открытые данные Росгидромета, ГИС-экология, МЧС России и Emercom;
- Информация Роспотребнадзора по заболеваемости, качеству воды, воздуха, почв и пляжей.

2.2 Методология концептуального моделирования

Базой для построения организационно-технологической схемы реагирования стала методология концептуального моделирования, где ключевыми звеньями выступают:

- показатель (факт состояния среды);
- объект воздействия (экосистема, население, инфраструктура);
- субъект управления (орган власти, ведомство, администрация);
- действие (реакция, предписание, ограничение, информирование).

Модель выстроена как блок-схема обратной связи, отражающая путь от мониторингового сигнала до управленческого решения, с учётом точек передачи информации и разрывов между системами. Методология опирается на подходы Морейдо [7] по «цифровым водосборам» и международную практику ситуационных центров.

2.2.1 Функционально-институциональный анализ

С целью выделения субъектов, ответственных за сбор и реагирование на мониторинговые данные, проведён анализ институциональной структуры, включая:

- иерархизацию управления (федеральный – региональный – локальный уровни);
- сопоставление ведомств с типами показателей (экологические ↔ санитарно-гигиенические);
- анализ дублирования и разрывов в системе передачи данных между Минприроды / Росприроднадзором и Роспотребнадзором / Минздравом.

Выявлено, что большинство показателей, связанных с состоянием среды, обслуживаются раздельными ведомствами без межведомственного регламента совместных действий. Например, микробиологическое загрязнение воды (Роспотребнадзор) и химическое (Росприроднадзор) рассматриваются как изолированные сигналы без общего механизма экстренного реагирования.

2.2.2 Инструменты цифровизации и анализа

В исследовании анализируются существующие и перспективные ИТ-инструменты:

- сенсорные платформы: автоматизированные метеостанции, логгеры температуры воды и уровня, микробиологические экспресс-лаборатории;
- ГИС-инфраструктура: пространственная привязка наблюдений к зонам НП (заповедная, туристическая, прибрежная и пр.);
- системы визуализации: прототип дашборда ситуационного центра с отображением критических показателей (разработка на базе данных 2020–2023);

— прогностическая аналитика: моделирование последствий нарушений и «реактивных окон» на основе сценарных матриц;
— связь с программой «Цифровые водосборы», где методы Морейдо (7) включают трансграничные экосистемные и управленческие связи.

2.2.3 Критерии оценки и сценарии реагирования

Сценарии действий органов власти и дирекции национального парка при обнаружении критических значений мониторинга формировались с учётом:

— Нормативов ПДК / МДУ (по СанПиН, ФЗ-7, ведомственным инструкциям);
— Типовых кейсов (например, эвтрофикация, рост ОКИ, превышение шумовых порогов);
— Времени реакции разных структур (по результатам анализа реальных кейсов);
— Участия в межведомственных и муниципальных комиссиях по ЧС, экологии, здравоохранению.

Таким образом, методы исследования опираются на совмещение нормативного анализа, концептуального проектирования и цифровых инструментов пространственного и индикативного реагирования, что позволяет выявить институциональные и технологические разрывы и предложить воспроизводимую модель координированного реагирования.

3 Анализ существующей схемы реагирования органов власти на результаты экологического мониторинга

Результаты анализа мониторинговых данных, нормативно-правовой базы и институциональных связей, проведённого в рамках данного исследования, позволяют выявить противоречия и слабые места в существующей организационно-технологической схеме реагирования органов государственной власти (ОГВ) и органов местного самоуправления (ОМСУ) на экологические сигналы в Национальном парке «Плещеево озеро».

3.1 Информационное поле и реальные события

Мониторинг качества воды, почвы и воздуха в районе озера Плещеево регулярно показывает, что значения большинства показателей соответствуют установленным нормативам**.** Тем не менее, в летние месяцы фиксируются эпизоды, вызывающие общественное беспокойство и свидетельствующие о наличии экологического ущерба**:**

— Массовая гибель рыбы (лето 2023 г.) — локализованное заморное явление, не подтверждённое ни в одной из официальных форм отчётности;
— Аллергические реакции и жалобы купальщиков в зоне пляжей — при формально нормальных показателях по микробиологическим и химическим параметрам;
— Периодическое «цветение» воды, сопровождающееся неприятным запахом и мутностью, не фиксируемое в официальных комментариях Роспотребнадзора;
— Несоответствие информации между локальными наблюдениями жителей, научными экспедициями и формальными докладами надзорных органов.

Это расхождение между эмпирическими фактами и официальными отчётами подчёркивает ограниченность существующей системы оценки — как с точки зрения науки (ограниченный набор показателей, редкие замеры), так и с точки зрения организации обмена информацией и реагирования на уровне местной власти.

3.2 Проблема фрагментации информации и слабая управленческая реакция

Оперативный разрыв между наблюдением события и управленческой реакцией объясняется:

- Отсутствием системы комплексной верификации данных от жителей, туристов, научных групп и автоматизированных постов;
- Формальным характером мониторинга, выполняемого ведомствами без обязательства реагирования на отклонения, если они «в пределах допустимого»;
- Неразвитой системой муниципального реагирования: мэрия Переславля-Залесского не имеет прямых протоколов действий при экологических сигналах в границах национального парка и полагается на реакцию федеральных ведомств;
- Неавтоматизированным документооборотом и отсутствием интеграции данных в Ситуационный центр региона или муниципалитета в виду отсутствия оного.

Таким образом, реальные риски для здоровья населения остаются без должного реагирования, а доверие к официальным сообщениям ослабевает. Слабое звено — именно местная система управления, не получающая прямых оперативных указаний или методической поддержки как реагировать при экологических инцидентах.

3.3 Инфраструктурные ограничения и неразвитость инженерных решений

Наряду с информационными и административными барьерами, ключевую роль в ухудшении рекреационной и санитарной обстановки играет низкий уровень развития автономной инфраструктуры в прибрежной зоне:

- Большинство кемпингов и пляжных зон не оборудованы системами автономной канализации, водоотведения и утилизации отходов;
- Отсутствует централизованная система водоснабжения на значительном участке восточного побережья озера;
- Не развита сеть санитарных точек, душевых, контейнерных площадок, что приводит к накоплению бытового мусора и деградации почв.

Отсутствие инженерной поддержки со стороны муниципалитета и региона препятствует развитию организованного туризма. Таким образом, негибкость в управлении и слабость санитарной инфраструктуры препятствуют реализации экологически устойчивого развития территории.

Проведённое исследование выявило:

- наличие системного разрыва между наблюдаемыми экологическими явлениями и управленческой реакцией;

— недостаточную скоординированность действий между федеральными надзорными структурами и органами местного самоуправления;
— неэффективность существующей модели обмена данными, построенной на ведомственной замкнутости и юридически «разнесённых» обязанностях;
— отсутствие устойчивых каналов реагирования на основании показателей мониторинга в санитарной и экологической сфере одновременно.

Всё это делает необходимым разработки актуальной, «рабочей» схемы взаимодействия и внедрение единой платформы координации с механизмами автоматического реагирования и сценарного моделирования воздействия.

4 Технология ситуационного управления в условиях природоохранной территории

4.1 Основы и принципы построения схемы

Разработка организационно-технологической схемы реагирования на основе данных экологического мониторинга предполагает не только техническое обеспечение наблюдений, но и институциональную интеграцию всех субъектов, имеющих отношение к охране природы и здравоохранению населения. Для территории Национального парка «Плещеево озеро» ключевым вызовом является фрагментарность реагирования: надзорные, научные и муниципальные структуры работают в рамках собственных нормативов, без выстроенной цепочки обмена данными и согласованных сценариев действий.

Данная схема ориентирована на цикл:

«Мониторинг → Анализ → Оповещение → Реакция → Оценка эффективности»,

где каждый шаг формализован и распределён между ведомствами и муниципалитетом. Она базируется на принципах концептуального моделирования и системного экологического управления, реализуемых в ряде европейских стран (EFAS, Norway EMCS), а также на опыте цифровых платформ ситуационного реагирования, таких как ГИС «Амур» в России, и предназначена обеспечить своевременное реагирование на сигналы мониторинга с участием всех уровней управления и с использованием цифровых технологий.

4.1 Структура схемы: от сигнала к действию

Схема включает пять функциональных блоков:

1) Мониторинг и первичное выявление сигнала

— Федеральные и региональные службы (Росгидромет, Росприроднадзор, Роспотребнадзор) осуществляют плановый контроль по утверждённым параметрам (качество воды, воздуха, почв, микробиология, санитарные условия).
— Дирекция НП, научные группы и инициативные граждане фиксируют дополнительные сигналы (массовая гибель рыбы, цветение воды, жалобы купальщиков), которые поступают через локальную платформу краудсорсинга — мобильное приложение или веб-интерфейс PPGIS.

— Цифровая система наблюдений (стационарные датчики температуры воды, показателей pH, растворённого кислорода, концентрации водорослей) фиксирует аномалии и автоматически передаёт данные в ГИС-диспетчерскую.

2) Объединение и анализ информации

— Все данные стекаются в цифровой ситуационный центр, создаваемый на базе либо администрации Переславля, либо дирекции НП.

— Система использует алгоритмы машинного обучения (по аналогии с проектами eFlows и EFAS) для определения вероятности развития негативного сценария.

— Аналитический модуль сравнивает сигналы с нормативами (ПДК, МДУ, эпидемиологические индикаторы) и определяет необходимость активации оповещения.

3) Оповещение субъектов управления и населения

При подтверждении экологической угрозы формируется сигнал тревоги, который автоматически передаётся:

— в мэрию и региональное Министерство охраны природы,

— в Роспотребнадзор и Росприроднадзор,

— в дирекцию НП для возможного ограничения доступа к рекреационным зонам,

— в платформу массового оповещения (SMS, push-уведомления).

4) Управленческое реагирование

Каждое ведомство выполняет регламентированную роль:

— Росприроднадзор — инициирует проверку источников загрязнения, отбор проб, предписания;

— Роспотребнадзор — оценивает санитарно-эпидемиологическую обстановку, публикует рекомендации по ограничению контакта с водой или продуктами;

— Мэрия — организует выезд ЖКХ, мобильных лабораторий, обеспечивает инфраструктурные меры;

— Дирекция НП — временно закрывает зоны отдыха, усиливает патрулирование, информирует посетителей;

— Научные группы — проводят полевые экспресс-исследования и уточняют источники или динамику явлений.

5) Оценка и обратная связь

Через 7–14 дней проводится переоценка состояния среды и последствий реагирования. В рамках «реактивного окна» (временного интервала между событием и решением) оцениваются адекватность действий, скорость обмена данными, удовлетворённость граждан (по результатам опросов) (рис.1).



Рис. 1. Предлагаемая схема реагирования
Fig. 1. Proposed Response Framework

Для наглядности данная схема представлена в виде таблицы 1.

Таблица 1. Организационно-технологическая схема реагирования на результаты экологического мониторинга
Table 1. Organizational and Technological Framework for Responding to Environmental Monitoring Results

Этап	Содержание этапа	Основные участники	Инструменты / ресурсы
1. Мониторинг (сбор данных)	Сбор экологических данных (вода, воздух, почва, микробиология, шум и др.)	Росприроднадзор, Роспотребнадзор, Росгидромет, дирекция НП, жители	Стационарные станции, мобильные лаборатории, сенсоры, краудсорсинг, научные наблюдения
2. Интеграция и хранение данных	Передача, объединение и хранение информации	Ситуационный центр (мэрия / НП), научные группы	ГИС-платформа, база мониторинговых данных, дашборд, API ведомств
3. Анализ и верификация	Сопоставление с нормативами, выявление аномалий, расчет рисков	Ситуационный центр, научные группы	Прогнозные алгоритмы, машинное обучение, карта риска, сравнение с ПДК / МДУ
4. Оповещение ведомств и населения	Уведомление ответственных ведомств и населения	Ситуационный центр, МЧС, мэрия, СМИ	OKSION, push-уведомления, радио, интернет-платформы
5. Реагирование ведомств	Выполнение предписанных действий по результатам сигнала	Росприроднадзор, Роспотребнадзор, мэрия, НП	Санитарные меры, ограничения доступа, проверки, информирование населения

6. Локальные меры (действия НП и мэрии)	Локальные меры: закрытие пляжей, выезд коммунальных служб, корректировка маршрутов	Дирекция НП, администрация Переславля	Приказы, уведомления, выезды, временные регламенты
7. Оценка результатов	Повторный замер, опрос населения, анализ окна реакции	Все участники схемы	Повторный мониторинг, оценка скорости и эффективности действий
8. Отчётность и корректировка протоколов	Подведение итогов, доработка протоколов реагирования	Ситуационный центр, профильные ведомства	Информационный отчёт, обновление регламентов, аналитическая записка

4.2 Преимущества и новизна подхода

По сравнению с существующей практикой, предлагаемая схема обладает рядом ключевых преимуществ, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение существующих и предлагаемых подходов
Table 2. Comparison of Existing and Proposed Approaches

Элемент	Сейчас	Предложенная модель
Обмен данными	Разрозненный, ведомственный	Интегрированный ситуационный центр
Участие населения	Пассивное, постфактум	Активное: через PPGIS и краудсорсинг
Прогнозирование	Отсутствует	Алгоритмическое моделирование развития событий
Реакция мэрии	Не регламентирована	Встроена в цепочку сценариев
Инфраструктурные меры	Затруднены	Сопровождаются цифровым контролем и визуализацией

Таким образом, предложенная схема позволяет преодолеть институциональную разобщённость, сделать экологическое управление более гибким и ориентированным на здоровье населения. Внедрение цифрового ситуационного центра, совместное участие ведомств, науки и общества и чёткая регламентация действий в критических ситуациях являются основой устойчивого развития ООПТ и прилегающих территорий.

5 Обсуждение. Интерпретация результатов и институциональные перспективы

Результаты исследования подтверждают наличие серьёзных институциональных и организационно-технологических разрывов между сбором экологических данных и принятием управленческих решений на уровне муниципалитета, региона и ООПТ. На примере Плещеева озера становится очевидным, что при наличии сложившейся системы мониторинга (как ведомственного, так и научного) отсутствует единый механизм интерпретации данных, формулирования сценариев реагирования и встраивания их в процессы территориального управления.

Предложенная схема реагирования позволяет преодолеть ряд ключевых барьеров:

- фрагментацию данных между Роспотребнадзором, Росприроднадзором, дирекцией НП и органами местного самоуправления;
- ограниченность ведомственного подхода, при котором даже зафиксированные нарушения (заморы рыбы, рост заболеваемости, ухудшение санитарных условий) не становятся основанием для межведомственных или муниципальных действий;
- отсутствие каналов быстрой обратной связи между населением, научными группами и управленческими структурами.

В этих условиях особую значимость приобретает роль системного интегратора, способного обеспечить связь между мониторинговыми структурами, экспертным сообществом и исполнительной властью [9]. Эту функцию в перспективе могут выполнять организации, выступающие в качестве операторов цифровой платформы и действующие через проектный офис в системе ситуационного центра (пример – АО ОПДС). Используя свои компетенции в области цифровизации мониторинга, моделирования сценариев и координации ведомственных ИТ-инфраструктур, такая организация может обеспечить:

- организацию единого контекста мониторинга (синхронизацию форматов и частоты наблюдений),
- поддержку сценарного анализа и прогнозирования экологических и санитарных рисков,
- разработку и сопровождение цифровых дашбордов для управления в режиме реального времени.

Не менее важным направлением развития системы является встраивание экологических сценариев в градостроительное регулирование и муниципальное планирование. В настоящее время показатели мониторинга практически не используются для обоснования корректировки правил землепользования, размещения объектов рекреации, инженерной инфраструктуры. Однако при системной интеграции с участием проектного офиса и экспертной среды возможно:

- спрогнозировать территории пространственных рисков (экосистемная деградация, санитарные зоны, избыточная нагрузка),
- разработать систему ограничений и предельных параметров рекреационного и хозяйственного использования,
- включить данные мониторинга в основание корректировки генеральных планов и ПЗЗ, обеспечив устойчивое развитие территории.

Сравнение с зарубежными практиками (например, EFAS, Situational Water Management в Нидерландах, модели eFlows и FloodEarlyWarning) показывает, что только многоуровневая система управления, основанная на сценариях, экспертных интерпретациях и цифровом обмене, позволяет перейти от наблюдения к управлению.

Для успешного функционирования предложенной схемы реагирования в будущем необходимо:

- разработать протоколы межведомственного реагирования, формализовав действия при ключевых типах отклонений (эвтрофикация, загрязнение, рост заболеваемости и т.д.);

- создать действующий ситуационный центр и провести его пилотную апробацию в НП «Плещеево озеро»;
- провести социологическое исследование по восприятию экологических рисков населением и включить эту компоненту в систему индикаторов.
- тестировать экономические и градостроительные модели интеграции экологических ограничений в процедуры планирования.

Таким образом, экологический мониторинг становится не просто источником данных, а основой для адаптивного, устойчивого управления природными территориями и городскими агломерациями, при условии выстраивания механизмов интерпретации, координации и внедрения.

6 Выводы

Результаты исследования демонстрируют необходимость перехода от разрозненной, ведомственно ориентированной системы экологического мониторинга к целостной, интегрированной модели реагирования, основанной на цифровых инструментах, межведомственном взаимодействии и сценарном анализе. На примере Национального парка «Плещеево озеро» выявлены институциональные разрывы между сбором и интерпретацией данных, слабая вовлечённость органов местного самоуправления в реагирование, а также отсутствие регламентированной технологической цепочки от сигнала до управленческого действия.

Предложенная организационно-технологическая схема не только воспроизводима, но и масштабируема на другие особо охраняемые природные территории. Она включает не только технические элементы (сбор данных, ГИС, дашборды), но и формализует роли акторов, включая мэрию, федеральные надзорные ведомства, дирекцию НП и научное сообщество.

Как уже упоминалось выше, Ключевым элементом предлагаемой модели выступает организация, выполняющая роль системного интегратора. Ее участие через создание проектного офиса / ситуационного центра позволяет обеспечить:

- сквозную цифровизацию контуров наблюдения;
- согласование показателей мониторинга с потребностями управления и охраны здоровья населения;
- генерацию сценариев воздействия, которые могут быть встроены в градостроительное регулирование на уровне муниципалитета.

Такой подход обеспечивает не только оперативное реагирование на экологические риски, но и устойчивое управление территорией в условиях роста антропогенной нагрузки, климатических изменений и требований к качеству городской среды.

Сформированная схема может быть рекомендована как прототип для разработки типовых моделей реагирования на ООПТ и в зонах с высокой рекреационной и санитарной значимостью. Внедрение данной модели позволит существенно повысить эффективность природоохранной политики и устойчивость территорий к экологическим угрозам.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» https://rgo.ru/

Библиография

1. Куролап С.А., Клепикова О.В. Интеграция геоинформационных систем в природоохранный мониторинг на ООПТ // Вестник экологического образования. 2021. №3. С. 85–94.

2. Губер К.А. Применение ГИС в управлении экологической безопасностью территорий // Геоэкология. 2020. №2. С. 110–122.

3. Козеева Т.А. Сценарный подход к управлению территориями природного наследия // Вестник СГУ. Серия География. 2019. №4. С. 57–68.

4. Brander L.M., Florax R.J.G.M., Vermaat J.E. The Empirics of Wetland Valuation: A Comprehensive Summary and a Meta-Analysis of the Literature // Environmental and Resource Economics. 2006. Vol. 33. P. 223–250.

5. Loomis J., Kreutzwiser R. Economic Efficiency and Markets for Environmental Goods // Canadian Journal of Agricultural Economics. 2004. Vol. 52. No. 4. P. 423–438.

6. Freeman A.M. The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods. 2nd ed. Washington: Resources for the Future, 2003. 491 p.

7. Морейдо В.М. Цифровые водосборы как инструмент координации экологического управления // Известия РАН. Серия географическая. 2023. №6. С. 24–35.

8. Ситуационные центры управления: опыт EFAS и eFlows в странах ЕС // Материалы международной конференции «Цифровая трансформация территориального планирования». Москва, 2022. С. 143–150.

9. Панарина Т.Н., Кучкаров З.А. Моделирование ситуационного реагирования при мониторинге состояния окружающей среды // Информационные технологии и нанотехника. 2022. №3. С. 133–141.

Organizational and Technological Framework for the Response of State and Local Authorities to Environmental Monitoring Results: A Case Study of Lake Pleshcheyevo

Svetlana G. Gerasimova[1], Sergey V. Serebryakov[1,2]**

[1]Spatial Data and Services Operator JSC
[2] Moscow State University of Geodesy and Cartography
*s.g.gerasimova@gmail.com , **serebryakovsv@mail.ru

Keywords environmental monitoring, national park, interagency coordination, organizational and technological framework, situational center, urban planning regulation, GIS-based monitoring, sustainable management

Abstract In the context of increasing recreational pressure and climate instability, environmental monitoring plays a critical role as an early warning system and a tool for sustainable territorial management. Using the case of Pleshcheyevo Lake National Park, this study reveals institutional, technological, and administrative gaps between the collection of environmental data and the decision-making processes at municipal and regional levels. The article presents an organizational and technological response framework based on conceptual modeling, digital tools (GIS, sensors, dashboards), and scenario-based analysis. The proposed model follows a full cycle: monitoring, analysis, alerting, response, and evaluation — with functions distributed among federal agencies (Rosprirodnadzor, Rospotrebnadzor), the national park administration, local authorities, and the academic community. A special role is assigned to jrganization as a systems integrator capable of coordinating data, establishing a situational response center, and embedding ecological scenarios into urban planning regulations. The model is scalable and replicable, offering a prototype for other protected natural areas across Russia. The study concludes with recommendations for institutionalizing interagency cooperation and promoting the digital transformation of environmental governance to safeguard public health and preserve ecosystem integrity.

Acknowledgements

The research was carried out within the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage". The publication was carried out with the financial support of the Russian Geo-Geographical Society, an All-Russian public organization https://rgo.ru.

Научное издание

ВЕСТНИК МИИГАиК

Специальный выпуск

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ХРАНИТЕЛЬ НАСЛЕДИЯ «ПЛЕЩЕЕВО ОЗЕРО»

Сборник статей по материалам исследовательского проекта,

Часть 1

Партнеры проекта:

Руссское гоеграфическое общество (РГО)

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)

Национальный парк «Плещеево озеро»

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Институт водных проблем РАН

Фото на обложке – Даниил Артемов (МИИГАиК)

Москва, МИИГАиК

2026

Проект «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро»» реализуется при грантовой поддержке Русского географического общества (РГО, 2025-2026)
https://rgo.ru/

ПАРТНЕРЫ ПРОЕКТА

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ (МИИГАиК)
https://miigaik.ru/

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПАРК «ПЛЕЩЕЕВО ОЗЕРО»
https://plesheevo-lake.ru/

ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ВНУТРЕННИХ ВОД им. И. Д. ПАПАНИНА РАН
https://www.ibiw.ru/

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РАН
https://www.iwp.ru/

АО «ОПЕРАТОР ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ И СЕРВИСОВ»
https://opds.info/

ISBN 978-5-91188-083-5