

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 км²), 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 Плещеево¹.

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 дренажной сети для восстановления естественного стока Берендеева болота в Переславском муниципальном округе». Государственное геологическое предприятие «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 ренатурализации 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 CO₂ 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 сфагнома 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 CO₂, 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 отмечают высокую 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 ($\approx 2,6$ млн га, $\sim 15\%$ территории страны), но более половины этой площади ($\approx 1,5$ 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 ренатуризации 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 CO ₂) – созданы при участии Greifswald Mire Centre; модель MoorFutures используется для оценки сокращения выбросов	снижение годовых выбросов CO ₂ (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 биологической 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 вынутаго грунта; возведение деревянных и каменных дамб; общее «удержание воды» в ландшафте	анализ исторических карт и аэрофотоснимков для планирования; высокоточная LiDAR-съёмка рельефа для выявления осушенных участков; создание ГИС-слоев «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. км ² 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 CO ₂ ; дистанционное зондирование для отслеживания изменений увлажнённости	сокращение эмиссии CO ₂ 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 CO ₂ на 80–90% по сравнению с дренированными торфяниками; восстановление водно-болотной орнитофауны (стабилизация численности вертячий камышевки и др. видов); начало нового торфонакопления на некоторых болотах; развитие палудизмуса (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 CO₂ — оценочно, каждый гектар после обводнения сокращает эмиссию парниковых газов на 20–30 тонн CO₂-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 (вертялая 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.

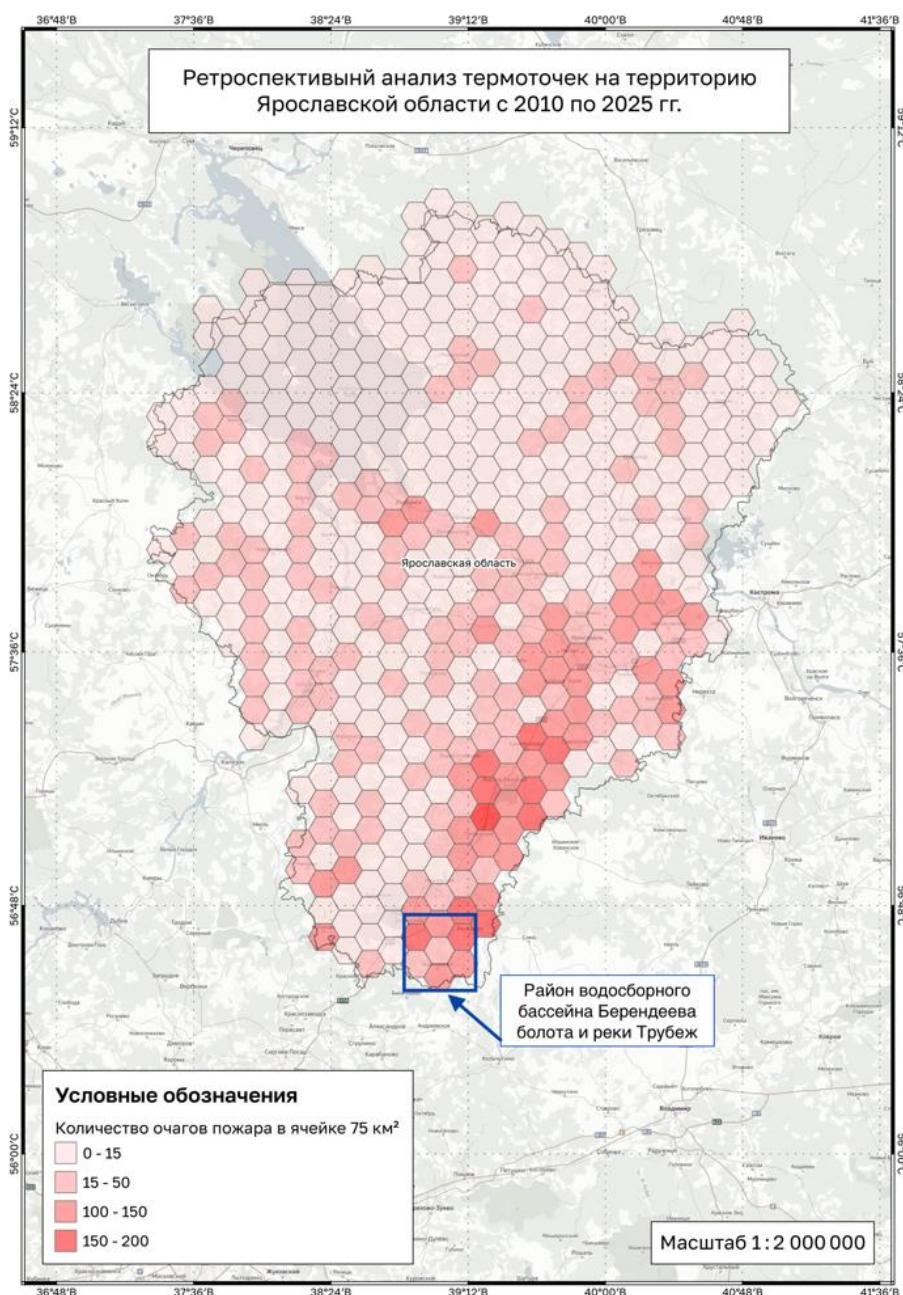


Рис. 2. Картограмма ретроспективного анализа термоточек на Ярославскую область

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 ретроспективный 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 «внахлѣст» 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 подчѣркивает 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 начнѣт 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 подъѣма уровня воды).

Визуальный анализ продольных профилей рельефа подтвердил, что наиболее глубокие впадины совпадают с районами наиболее интенсивных торфопереработок в прошлом, что коррелирует с ожидаемыми местами максимального накопления воды.

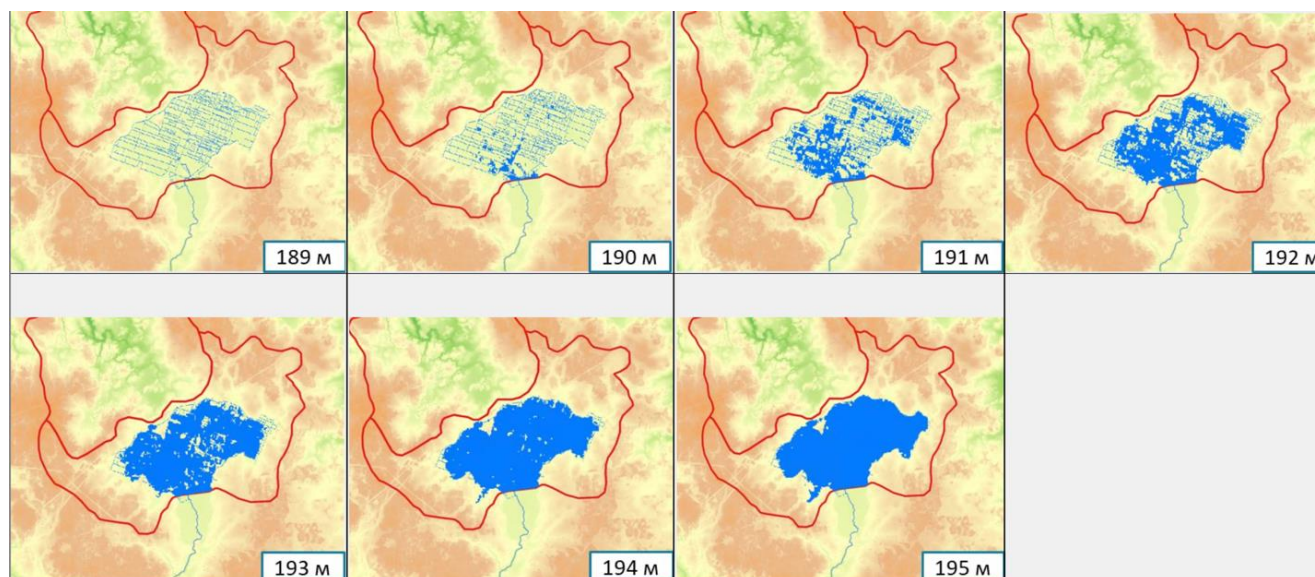


Рис. 3. Визуализация зон затоплений
Fig. 3. Visualization of flood zones

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 аэрофотосъемку 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 данных (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 $\sim 5\text{--}10 \text{ т С/га*год}$) 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 pass» («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, Berendeyev 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.