Научная статья
УДК 627.8:579.64

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ И РИСКОВ ВНЕДРЕНИЯ БИОТЕХНОЛОГИЙ В ГИДРОТЕХНИКУ МЕТОДОМ SWOT-АНАЛИЗА

А.А. Кадысева[1,*], С.В.Максимова[2], В.В.Миронов[2], Н.В.Ханов[1], К.С.Семенова[1]

[1] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия
[2] Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
* E-mail: kadyseva@mai.ru

Аннотация. В условиях активного развития инфраструктуры и возрастания антропогенной нагрузки на водные экосистемы возрастает необходимость применения инновационных технологий, сочетающих инженерную надёжность и экологическую безопасность. Одним из наиболее перспективных направлений является использование биотехнологических методов в гидротехническом строительстве. В работе проведён комплексный анализ существующих подходов, включающих процессы микробного цементирования грунтов (MICP), разработку биобетонов и биополимерных материалов, а также применение фитотехнологических систем для очистки и стабилизации водных объектов. Описаны ключевые механизмы, лежащие в основе биоцементирования и самовосстанавливающихся материалов, а также влияние микроорганизмов на структуру и долговечность строительных конструкций. Рассмотрены фитосистемы, выполняющие функции биофильтрации и берегоукрепления, их эффективность в уменьшении содержания загрязняющих веществ и восстановлении экосистем. С помощью SWOT-анализа определены сильные и слабые стороны применения биотехнологий, выявлены возможности и потенциальные угрозы в их практической реализации. Полученные результаты указывают на высокий потенциал интеграции биологических процессов в инженерные решения, что может стать основой для перехода к экологически ориентированной модели гидротехнического строительства, соответствующей международным стандартам устойчивого развития и «зелёного» проектирования.

Ключевые слова: *биотехнологии; гидротехническое строительство; микробное цементирование; биобетон; фитотехнологические системы; биополимеры; экологическая инженерия; устойчивое развитие.*

Для цитирования: Кадысева А.А., Максимова С.В., Миронов В.В., Ханов Н.В., Семёнова К.С. Оценка возможностей и рисков внедрения биотехнологий в гидротехнику методом SWOT-анализа // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 4. С. 82–96.

Original article

ASSESSMENT OF OPPORTUNITIES AND RISKS OF BIOTECHNOLOGY INTEGRATION IN HYDRAULIC ENGINEERING USING THE SWOT ANALYSIS METHOD

A.A. Kadyseva[1,*], S.V. Maksimova[2], V.V. Mironov[2], N.V. Khanov[1], K.S. Semenova[1]

[1] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
[2] Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
* E-mail: kadyseva@mail.ru

Abstract. In the context of active infrastructure development and increasing anthropogenic pressure on aquatic ecosystems, there is a growing need for innovative technologies that combine engineering reliability with environmental safety. One of the most promising directions is the use of biotechnological methods in hydraulic engineering. This paper presents a comprehensive analysis of existing approaches, including microbial-induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization, development of bioconcrete and biopolymer materials, as well as phytotechnological systems for water body purification and stabilization. The key mechanisms underlying biocementation and self-healing materials are described, along with the influence of microorganisms on the structure and durability of construction elements. Phytosystems serving as biofilters and bank stabilizers are examined, with emphasis on their effectiveness in reducing pollutant concentrations and restoring ecosystems. Using SWOT analysis, the strengths and weaknesses of biotechnology applications are identified, and opportunities and potential threats to their practical implementation are revealed. The findings indicate a high potential for integrating biological processes into engineering solutions, which may serve as the foundation for transitioning to an environmentally oriented model of hydraulic engineering aligned with international standards of sustainable development and green design.

Keywords: *biotechnology; hydraulic engineering; microbial-induced calcite precipitation (MICP); bioconcrete; phytotechnological systems; biopolymers; environmental engineering; sustainable development.*

For citation: Kadyseva A.A., Maksimova S.V., Mironov V.V., Khanov N.V., Semenova K.S. Assessment of opportunities and risks of biotechnology integration in hydraulic engineering using the SWOT analysis method. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 4, pp. 82–96.

Введение

Классическая биотехнология традиционно рассматривается как самостоятельная область науки и промышленности, обособленная от гидротехнического строительства. Она прочно зарекомендовала себя в различных сферах [1], включая сельское хозяйство (например, выращивание трансгенных растений и производство биологических удобрений), медицинскую промышленность (разработка антибиотиков, вакцин, технологий генной терапии), пищевую промышленность (ферментация, создание функциональных продуктов) и экологию (биоремедиация загрязнённых почв, очистки сточных вод [2]).

Хотя лабораторные исследования в этой области ведутся интенсивно, биотехнологические методы пока не получили масштабного применения в проектировании и строительстве гидротехнических сооружений, несмотря на их очевидный потенциал. Связано это во многом с разделением инженерных и биологических дисциплин, а также с недостаточным развитием междисциплинарных исследований в этой области.

Гидротехническое строительство, являясь базовой отраслью инженерной инфраструктуры, оказывает значительное воздействие на природные ландшафты и водные экосистемы. Масштабное возведение плотин, дамб, водозаборных узлов и каналов приводит к изменению естественного течения вод, нарушению гидрологического режима и деградации береговых зон. В связи с этим возникает необходимость поиска инновационных технологий, обеспечивающих сочетание инженерной надёжности с экологической устойчивостью [3].

Одним из перспективных направлений подобных исследований являются биотехнологические методы, основанные на управляемом использовании биологических процессов в инженерных целях [4]. Микроорганизмы, растения и биополимерные материалы не только повышают эффективность строительных решений, но и способствуют экологической реабилитации нарушенных территорий. В последние годы активное развитие получили направления, связанные с микробным осаждением минералов, биокоррозионной защитой бетонных конструкций, фитотехнологической стабилизацией берегов и

применением биоактивных добавок для бетонов [5]. Эти решения особенно актуальны для российских регионов с высокой степенью водной нагрузки на инженерные сооружения.

В данной статье предпринята попытка рассмотреть уже существующие биотехнологические подходы с позиций их актуальности и применимости в гидротехническом строительстве.

Цель исследования — показать, что интеграция биотехнологий в гидротехническое строительство возможна для достижения экологической устойчивости инженерных сооружений.

Материалы и методы

Для достижения целей исследования была применена комплексная методология, включающая теоретический анализ, сравнительные расчёты и систематизацию данных по существующим инженерным и биотехнологическим решениям. Исследование базировалось на обзоре научных публикаций, патентов, нормативных документов, технических отчётов и проектных решений, касающихся внедрения биотехнологий в гидротехническом строительстве.

Для оценки эффекта от внедрения биотехнологий рассматривались такие направления, как биоцементирование (MICP — Microbial Induced Calcite Precipitation), биобетоны и биополимерные добавки, а также фитотехнологии.

Для комплексной оценки перспектив и рисков применения биотехнологических методов в гидротехническом строительстве, был выполнен SWOT-анализ [6].

Метод SWOT-анализа (от англ. Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) представляет собой инструмент стратегического анализа, предназначенный для комплексной оценки внутреннего и внешнего потенциала объекта исследования. Концепция метода была сформулирована в 1960-е гг. в Гарвардской школе бизнеса под руководством профессора Альберта Хамфри. Изначально SWOT применялся в менеджменте и стратегическом планировании, однако впоследствии получил широкое распространение в инженерных, экологических и технологических исследованиях, особенно на стыке естественных и технических наук.

Процедура выполнения SWOT-анализа включает несколько этапов: определение объекта анализа; идентификацию внутренних сильных и слабых сторон (характеристик, зависящих от исследуемого объекта); выявление внешних возможностей и угроз (влияющих факторов среды); и построение матрицы SWOT, отражающей соотношение этих параметров. Итогом анализа становится стратегическая интерпретация данных, направленная на выявление направлений развития, снижение рисков и усиление конкурентных преимуществ объекта или технологии.

В контексте интеграции биотехнологий в системы гидротехнического строительства SWOT-анализ позволяет оценить инновационные подходы, такие как биобетоны, фитосистемы и микробное цементирование, с точки зрения их технического потенциала, экологической устойчивости, нормативных барьеров и рыночных возможностей. Применение данного метода способствует формированию сбалансированной стратегии внедрения природоподобных технологий при минимизации финансовых и технических рисков.

Результаты исследования

В современных условиях развития инфраструктуры гидротехническое строительство играет критически важную роль в обеспечении безопасности и устойчивого развития территорий, подверженных воздействию водных объектов. Традиционные методы строительства, несмотря на свою эффективность, зачастую сталкиваются с рядом экологических и экономических ограничений, что требует поиска инновационных решений.

В данной ситуации значительный интерес вызывают проверенные биотехнологические методы, которые уже доказали свою эффективность в смежных сферах [7] гидротехнического строительства. Эти технологии, получившие признание в аналогичных проектах, демонстрируют высокий потенциал для применения и в других областях гидротехнического строительства. Их успешное использование в схожих условиях позволяет рассматривать их как перспективные решения для реализации современных гидротехнических проектов.

Биоцементирование (микробное цементирование)

В современной практике активно развиваются инновационные методы замены традиционных цементных материалов. Одним из перспективных направлений является биоцементирование, которое привлекает внимание учёных из различных областей — геологии, биотехнологии, химической инженерии, геофизики, экологической инженерии и гражданского строительства.

Исследователи всё чаще обращаются к технологии биоцементирования [8] как к эффективному способу улучшения характеристик грунтов. Этот метод базируется на процессе микробно-индуцированного осаждения карбонатов (MICP), в результате которого образуется карбонат кальция ($CaCO_3$). Это позволяет значительно повысить прочностные характеристики и жёсткость грунтовых массивов.

Технология особенно эффективна при решении задач, требующих увеличения устойчивости геоструктур к сдвиговым нагрузкам на межфазных границах. Благодаря своим свойствам, биоцементирование становится незаменимым инструментом в ситуациях, где необходимо обеспечить повышенную надёжность и долговечность грунтовых конструкций.

Процесс микробного осаждения кальцита (MICP) [9] обеспечивает естественное упрочнение грунта за счёт обмена ионов в присутствии микроорганизмов, катализирующих разложение мочевины. Образующийся карбонат кальция заполняет поры и образует твёрдый скелет, увеличивая прочность на сжатие до 1,5–2 МПа, что сопоставимо с действием цементационных добавок. При этом пропускная способность грунта уменьшается на 60–80 %, что особенно важно для безопасности водопропускных сооружений и фильтрационных экранов дамб.

Технология MICP находит широкое применение в различных областях. Она эффективно используется для стабилизации песчаных и супесчаных грунтов в основании фундаментов и дамб, создания противофильтрационных защитных экранов, восстановления нарушенных фильтрационных барьеров и укрепления трещиноватых оснований. Кроме того, данная технология позволяет значительно повысить несущую способность склонов и береговых сооружений, что делает её перспективным инструментом в решении задач по укреплению и защите различных инженерных объектов. Данный метод может стать основой для создания инновационных, экологически безопасных материалов, сочетающих в себе свойства природных и искусственных систем [10].

SWOT-анализ применения технологии биоцементирования в гидротехническом строительстве представлен в таблице 1.

Таблица 1 - SWOT-анализ применения технологии биоцементирования в гидротехническом строительстве

Категория анализа	**Факторы**
Сильные стороны (Strengths)	- Экологическая безопасность. - Высокая эффективность структурирования грунтов. - Долговечность. - Самовосстанавливающаяся способность.
Слабые стороны	- Недостаточная нормативная и методическая база.

(Weaknesses)	- Ограниченный диапазон условий применения (необходимо учитывать температуру, pH, минерализацию воды водного объекта). - Сложность биотехнического контроля (требуется регулярный мониторинг жизнеспособности штаммов и биохимического состава питательной среды). - Неравномерность цементации при неоднородных грунтах, что снижает прочность сооружения.
Возможности (Opportunities)	- Адаптация к региональным условиям и биотопам. - Интеграция в экологические стандарты и программы наилучших доступных технологий (НДТ). - Использование в комплексных структурных системах (совместно с геосинтетиками, биополимерами, микроармированием)
Угрозы (Threats)	- Климатические ограничения. - Биоэкологические риски (неконтролируемое размножение внесённых штаммов может вызвать биотическое дисбалансирование). - Инвестиционная неопределенность. - Необходимость согласования с надзорными органами. - Консервативный подход инженерного сообщества.

Технология микробно-индуцированного осаждения кальцита находится в стадии активного совершенствования. Современные исследования направлены на повышение однородности укрепления и разработку новых биокомпозитных реагентов, обеспечивающих сбалансированный рост кристаллов $CaCO_3$ [11]. На стыке биотехнологии и строительной инженерии появляются гибридные подходы — например, биоцементирование с добавлением уреолитических бактерий и минеральных связующих (пуццолан, цеолит, шлаки). Эти материалы обеспечивают более длительный жизненный цикл бактерий, стабильность pH и прогнозируемый результат при эксплуатации.

Биоцементирование способно стать частью природоподобных технологий гидротехнического строительства, обеспечивая баланс между инженерной прочностью и экологическим восстановлением береговых экосистем.

Биобетоны, биополимерные материалы, биопокрытия и антикоррозионная защита

Добавление бактерий и биополимерных соединений в бетонные смеси создаёт самовосстанавливающиеся материалы [12-14]. Активизация бактерий происходит при проникновении влаги в трещину: микроорганизмы запускают минерализацию и формируют кристаллы кальцита, «заращивая» микродефекты.

Создание биоактивных защитных слоёв на поверхности бетонных конструкций позволяет снизить процессы биокоррозии. Ферментативные составы образуют тонкую мембрану, препятствующую проникновению деструктивных агентов [15, 16]. Применение биополимеров замедляют скорости деградации по сравнению с традиционными материалами [17].

Помимо замены цемента возобновляемыми компонентами, всё большее внимание уделяется применению натуральных биологических добавок, способствующих повышению экологичности и прочности бетона. Одним из таких дешёвых и доступных решений является использование микроорганизмов в составе бетонных смесей.

Микроорганизмы присутствуют во всех средах, где есть влага, питательные вещества и минимальное пространство для существования, поэтому их доступность практически неограниченна. Благодаря уникальной устойчивости к экстремальным физико-химическим условиям и способности адаптироваться, некоторые бактерии способны выживать даже в щелочной и плотной среде бетона.

Введение определённых видов бактерий в бетон способствует формированию самовосстанавливающихся материалов. Наиболее часто в таких экспериментах используются бактерии рода *Bacillus* (в частности, *Bacillus subtilis* и *Bacillus pasteurii*), отличающиеся способностью образовывать споры, сохраняющие жизнеспособность в течение десятков лет [18].

Для обеспечения самозалечивания бетонных конструкций микробные агенты (чаще — штаммы Bacillus subtilis) вводят в материал в виде разрушаемых капсул (например, на основе отверждённого альгината кальция); при образовании трещин капсулы вскрываются, обеспечивая доступ воздуха, влаги и питательных веществ (например, лактата кальция), что активирует бактерии. В процессе жизнедеятельности микроорганизмы выделяют карбонат кальция (кальцит), который кристаллизуется и заполняет трещины, восстанавливая целостность материала. При этом микроорганизмы, завершив цикл минерализации, вновь переходят в спящее состояние, сохраняя потенциал к реактивации при будущих повреждениях [5]. Эффективность процесса зависит от влажности среды, обеспечивающей транспорт питательных веществ; при этом бактериальные штаммы должны сохранять жизнеспособность в форме спор в течение всего срока службы конструкции, активизируясь только при растрескивании.

Практические испытания подтверждают, что добавление бактериальных капсул повышает плотность бетона, увеличивает время до появления микротрещин и снижает его водопроницаемость. Кроме того, достигается существенное повышение долговечности материала за счёт самозалечивания начальных повреждений. Кроме того, бетон с микроорганизмами демонстрирует повышенную устойчивость к коррозии арматуры за счёт герметизации капилляров кальцитом [19].

Тем не менее главным вызовом при использовании биологических добавок остаётся ограниченность источников питания микроорганизмов в толще бетонной матрицы. С течением времени активных питательных веществ становится меньше, что снижает длительность жизненного цикла бактерий. В качестве решения рассматриваются технологии капсулирования питательных субстратов и комбинирование микроорганизмов с пуццолановыми компонентами, позволяющими поддерживать оптимальные условия pH и влажности для их дальнейшей активности.

SWOT-анализ использования биобетонов, биополимерных материалов, биопокрытий и антикоррозионной защиты в гидротехническом строительстве представлен в таблице 2.

Таблица 2 - SWOT-анализ применения биобетонов, биополимерных материалов, биопокрытий и антикоррозионной защиты в гидротехническом строительстве

Категория анализа	**Факторы**
Сильные стороны (Strengths)	- Повышенная коррозионная и биологическая стойкость. - Самозалечивающиеся свойства (биобетоны способны «запечатывать» микротрещины размером 0,2–0,8 мм в результате биоминерализации, что снижает риск протечек и увеличивает водонепроницаемость конструкции). - Экологическая устойчивость и низкий углеродный след. - Долговечность.
Слабые стороны (Weaknesses)	- Недостаточная нормативная и методическая база. - Высокая стоимость внедрения и недостаточный опыт апробации (биоматериалы дороже стандартных на 25-40%). - Зависимость от условий эксплуатации (активность биокомпонентов значительно снижается при низких температурах, высоком pH или солёности воды).

	- Невысокая ремонтопригодность (при повреждении «живого» слоя покрытия трудно восстановить исходное биосостояние). - Особые требования к хранению и транспортировке биодобавок.
Возможности (Opportunities)	- Интеграция в «зеленые» стандарты строительства (ESG, BREEAM, LEED) и государственные программы по циркулярной экономике. - Совместное применение с фитотехнологиями и биотехническими системами для стабилизации берегов и очистки воды.
Угрозы (Threats)	- Коррозионная активность специфических сред (морская среда, ледовая обстановка, биофаулинг могут снизить эффект от применения технологии). - Недостаточная подготовка кадров в области биотехнологий. - Инвестиционная неопределенность (длительный период окупаемости затрудняет массовое внедрение). - Риск биоразложения в неблагоприятных условиях.

Применение биобетонов, биополимерных материалов, биопокрытий и антикоррозионной защиты в гидротехническом строительстве является перспективным направлением для перехода к формированию интеллектуальных (так называемых «умных») и экологически устойчивых строительных конструкций, способных обеспечивать повышенную долговечность, адаптивность к внешним воздействиям и снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Фитотехнологические системы в гидротехническом строительстве

Фитотехнологические системы представляют собой инновационное инженерно-экологическое решение, основанное на интеграции водных и прибрежных растений (макрофитов) с естественными процессами самоочищения и биофильтрации воды. Эти системы играют ключевую роль в биологической стабилизации берегов водоёмов, очистке сточных вод и снижении экологической нагрузки на водные экосистемы [20, 21].

Конструктивно фитотехнологические системы включают фильтрационные элементы (гравий, песок, керамзит) и специально подобранные виды водной растительности, такие как тростник (Phragmites australis), камыш (Typha angustifolia), рогоз, стрелолист, телорез и рдест.

Основные типы фитосистем:

Биоплато — участки мелководья с высокой плотностью растительных насаждений, выполняющие функцию биофильтров [22].

Гидроботанические площадки — мелководные зоны с естественными зарослями водной растительности.

Фитофильтрационные полосы — линейные зоны прибрежных территорий с плотным растительным покровом, задерживающие поверхностный сток.

Биопруды — искусственные водоёмы, где растения осуществляют очистку воды от биогенных элементов и частиц.

Процесс очистки воды в этих системах включает несколько механизмов: контакт воды с субстратом, фильтрацию, биосорбцию, фотосинтетическую активность и микробиологическое окисление. В корневой зоне макрофитов формируются аэробные и анаэробные микросреды, где активно протекают процессы разложения органических веществ, нитрификации, денитрификации и фосфатосвязывания.

Механизм действия фитотехнологий основан на использовании природных свойств растений и микроорганизмов их ризосферы. Растения способны эффективно поглощать биогенные вещества, осуществлять сорбцию тяжёлых металлов и органических загрязнителей, а также участвовать в процессах окисления токсичных соединений [23].

Помимо фильтрационных свойств, фитосистемы выполняют важную берегоукрепительную функцию [24, 25]. Корни растений формируют устойчивую структуру, повышая сопротивляемость берегов к гидродинамическим нагрузкам.

Экологическая ценность этих систем заключается в их способности поддерживать биоразнообразие. Обширные растительные зоны становятся средой обитания для различных видов рыб, моллюсков и птиц, способствуя формированию устойчивых экосистем.

Преимущества фитотехнологических систем заключаются в их экологической безопасности, поскольку они не требуют использования химических реагентов и оказывают минимальное воздействие на окружающую экосистему. Эти системы отличаются высокой долговечностью: срок их службы составляет от 30 до 50 лет, что исключает необходимость частой замены основных элементов.

Экономическая эффективность фитотехнологий обусловлена низкими эксплуатационными затратами, так как движение воды осуществляется самотёком, что исключает необходимость в насосах и других механических устройствах. Важное преимущество данных систем — их комплексное действие, включающее фильтрацию, биодеградацию, сорбцию загрязняющих веществ и фотосинтетическую активность.

Кроме того, фитосистемы обладают уникальной способностью к природной интеграции: они гармонично вписываются в природный ландшафт, не только не нарушая его эстетическую ценность, но и значительно повышая его экологическую устойчивость.

SWOT-анализ применения фитотехнологических систем в гидротехническом строительстве представлен в таблице 3.

Таблица 3 - SWOT-анализ применения фитотехнологических систем в гидротехническом строительстве

Категория анализа	**Факторы**
Сильные стороны (Strengths)	- Экологическая устойчивость и интеграция с природой (использование автохтонных видов растений способствует биологической саморегуляции и увеличению биоразнообразия). - Энергоэффективность и низкие эксплуатационные затраты (системы не требуют постоянного энергопотребления и сложного обслуживания). - Снижение эрозии и повышение устойчивости берегов (корневая система растений укрепляет прибрежную зону, снижает скорость поверхностного стока и фильтрационного давления). - Социально-экологическая привлекательность (системы создают эстетически ценные прибрежные ландшафты и служат природными рекреационными зонами).
Слабые стороны (Weaknesses)	- Недостаточная нормативная и методическая база (отсутствуют стандарты проектирования в отличие от бетонных сооружений). - Ограничения по глубинам водного объекта (системы неэффективны для глубин более 2-3 метра непосредственно у берега). - Сезонная активность биоты (эффективность фильтрации и фиторемедиации снижается в холодное время года). - Необходимость периодического биотехнического ухода (требуется выемка биомассы растений с накопленными загрязнениями). - Долгий период становления экосистемы (требуется время для укоренения растений и формирования устойчивого фитоценоза).
Возможности (Opportunities)	- Интеграция с «зелёной» инфраструктурой и концепцией «устойчивых городов». - Восстановление деградированных водных экосистем.

	- Междисциплинарное развитие (сочетание инженерных, геоботанических и биотехнологических подходов). - Участие в государственных программах экологического восстановления (возможность финансирования в рамках национальных проектов). - Научно-исследовательский и экспортный потенциал (создание инновационных технологий для стран с аналогичными климатическими и экологическими проблемами).
Угрозы (Threats)	- Климатические изменения (повышение частоты засух, паводков и колебаний уровней водоёмов влияет на жизнеспособность фитоценозов). - Негативное влияние инвазивных видов растений и снижение эффективности систем. - Угнетение растений при высоких антропогенных нагрузках и уровнях загрязнений. - Недостаточная инженерная проработка проектов (ошибки в гидрологическом расчёте и выборе видов растений могут привести к разрушению береговой линии). - Конкуренция с традиционными технологиями, которые могут быть дешевле и быстрее в реализации.

Фитотехнологические системы представляют собой высокоэффективный и устойчивый инструмент биоинженерной защиты водных объектов. Их применение в гидротехническом строительстве способствует не только улучшению качества воды и стабилизации берегов, но и формированию экологически устойчивых ландшафтов, соответствующих принципам современного «зелёного строительства».

В рамках данного исследования был проведён SWOT-анализ применения биотехнологий в гидротехническом строительстве (табл. 4), который позволил комплексно оценить потенциал и ограничения данного направления. Анализ выявил ключевые сильные и слабые стороны биотехнологических решений, а также определил возможности для их дальнейшего развития и потенциальные угрозы при внедрении в практику гидротехнического строительства.

Полученные в результате SWOT-анализа данные имеют практическую значимость для специалистов в области экологического проектирования и гидротехнического строительства, поскольку помогают принимать обоснованные решения при выборе оптимальных технологий укрепления берегов и очистки водоёмов. Результаты анализа могут быть использованы для разработки стратегий внедрения биотехнологий, определения приоритетных направлений исследований и оптимизации затрат на реализацию проектов с учётом выявленных преимуществ и потенциальных рисков.

Таблица 4 - SWOT-анализ применения биотехнологий в гидротехническом строительстве

Категория анализа	**Факторы**
Сильные стороны (Strengths)	- Экологичность и снижение углеродного следа в строительстве за счёт замены цементных и химических материалов биологическими аналогами. - Способность биотехнологий повышать долговечность и устойчивость гидротехнических сооружений (например, за счёт микробного цементирования, самозалечивающихся бетонов, фитофильтрации). - Совместимость с природными экосистемами и снижение

	разрушительного воздействия на водные объекты. - Возможность использования доступных ресурсов — микроорганизмов, растений и отходов биопроизводств. - Поддержание принципов «зелёного строительства» и устойчивого развития.
Слабые стороны (Weaknesses)	- Недостаточная нормативная и методическая база для широкого внедрения биотехнологий в гидротехническое строительство. - Высокая чувствительность биологических систем к колебаниям температур, влажности и химического состава воды. - Необходимость долгосрочных наблюдений для оценки надёжности технологий. - Более высокая стоимость на этапе научных исследований и пилотных внедрений по сравнению с традиционными методами. - Ограниченная квалификация специалистов в инженерно-биотехнологической области.
Возможности (Opportunities)	- Создание новых устойчивых строительных материалов на основе микробиологических и растительных компонентов. - Интеграция биотехнологий с цифровыми моделями гидродинамики и мониторинга состояния сооружений (BioDigital Engineering). - Развитие биотехнологических методов реабилитации водных объектов и берегов. - Возможность участия в международных программах «зелёного строительства» и привлечения ESG-инвестиций. - Расширение рынка экологичных технологий и повышения экспортного потенциала российских разработок.
Угрозы (Threats)	- Низкий уровень промышленного внедрения и скептицизм отрасли к инновационным биологическим методам. - Конкуренция с крупными цементными и химическими корпорациями, продвигающими традиционные технологии. - Возможные риски биоактивности или мутаций микроорганизмов при изменении условий эксплуатации. - Вероятность бюрократических препятствий и сложностей сертификации новых технологий. - Зависимость от климатических и региональных условий, ограничивающих универсальность применения.

Проведённый SWOT-анализ демонстрирует значительный потенциал биотехнологий в гидротехническом строительстве при условии преодоления существующих ограничений и активного развития данного направления. Результаты исследования подтверждают необходимость развития данного направления, расширения экспериментальной базы для внедрения инновационных биотехнологических решений.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило, что биотехнологические методы способны существенно повысить эффективность и экологичность гидротехнического строительства, обеспечивая гармоничное сочетание инженерных и природных процессов. Такие технологии, как микробное цементирование грунтов, биобетоны и фитотехнологические системы, открывают новые возможности для повышения прочности конструкций, самоочищения экосистем и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Биоцементирование обеспечивает упрочнение грунтов с минимальными энергетическими затратами; биобетоны

формируют самовосстанавливающиеся структуры, продлевая срок службы сооружений; фитотехнологии способствуют природной фильтрации воды и укреплению берегов. SWOT-анализ выявил, что биотехнологии могут быть применимы в экологическом строительстве. Перспективы дальнейшего развития связаны с внедрением цифровых платформ, гибридных биокомпозитов и биосенсорного мониторинга, что позволит реализовать концепцию «умных» и устойчивых гидротехнических систем будущего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лачинина Т. А., Чистяков М. С. Биотехнологии в формировании постиндустриального облика человеческой цивилизации // Экономическое возрождение России. 2021. № 2(68). С. 130–145.
2. Кадысева А. А., Кныш А. И. Биотехнологические методы очистки сточных вод: монография. // Омск: Омский государственный аграрный университет, 2009. 126 с.
3. De Vriend H., Van Koningsveld M., Van Koningsveld M. et. al. Sustainable hydraulic engineering through building with nature // Journal of Hydro-Environment Research. 2015. No.9, pp. 159-171.
4. Преснов О. М., Дорошко А. Д., Зуева Д. В., Матвеев Л. П. Перспективные биотехнологии в строительном инжиниринге // Экономика строительства. 2024. № 5. С. 181–184.
5. Черных Т. Н., Горбачевских К. А., Криушин М. В. и др. Биоминеральные добавки для самозалечивания бетона // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 4. С. 569–579..
6. Баев Л. А. Развитие метода SWOT-анализа как инструмента стратегического проектного планирования и синтеза управленческих решений // Известия Байкальского государственного университета. 2024. Т. 34, № 4. С. 656–665.
7. Преснов О. М., Дорошко А. Д., Зуева Д. В., Матвеев Л. П. Перспективные биотехнологии в строительном инжиниринге // Системные технологии. 2024. № 2(51). С. 40–48.
8. Umar M., Kassim K. A., Chiet K. T. P. Biological process of soil improvement in civil engineering: A review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 8. P. 767–774.
9. Li J., Bi W., Yao Y., Liu Z. State of the Art Review of Utilization of Microbial Induced Calcite Precipitation for Improving Moisture Dependent Properties of Unsaturated Soils // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, № 4. Art. 2502. doi: 10.3390/app13042502.
10. Строкова В. В., Власов Д. Ю., Франк-Каменецкая О. В., Духанина У. Н., Балицкий Д. А. Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 83–103.
11. Anbu P., Kang C. H., Shin Y. J. et al. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications // SpringerPlus. 2016. Vol. 5. Art. 250. doi: 10.1186/s40064-016-1869-2.
12. Ерофеев В. Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Смирнов В. Ф. Бактерии для получения самовосстанавливающихся бетонов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2018. № 4. URL: https://t-s.today/PDF/07SATS418.pdf
13. Wang J., Ersan Y. C., Boon N. et al. Application of microorganisms in concrete: a promising sustainable strategy to improve concrete durability // Applied Microbiology and Biotechnology. 2016. Vol. 100. P. 2993–3007.
14. Карпов М. В., Жиздюк А. А., Наумова О. В. Обоснование использования биобетонов для строительства гидротехнических сооружений // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14, № 5. URL: https://esj.today/PDF/14SAVN522.pdf

15. Царовцева И. М., Власов Д. Ю., Майорова М. А., Беляева И. Д. Современные подходы к защите гидротехнических сооружений от биообрастаний // Гидротехническое строительство. 2023. № 2. С. 19–23.

16. Низина Т. А., Ковшов А. О. Современное состояние научных исследований в области самовосстанавливающихся бетонов // Умные композиты в строительстве. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 35–54.

17. Mohammed H., Abbas W.A. Effect of biopolymer alginate on some properties of concrete // Journal of Engineering. 2020. Vol. 26, No. 6, pp. 121–131.

18. Nathaniel O., Sam A. R. M., Lim N. H. A. S., Adebisi O., Abdulkareem M. Biogenic approach for concrete durability and sustainability using effective microorganisms: A review // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 261. Art. 119664. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119664.

19. Huseien G. F., Saleh A. T., Ghoshal S. K. Effective Microorganism Solution and High Volume of Fly Ash Blended Sustainable Bio-Concrete // Biomimetics (Basel). 2022. Vol. 7, № 2. Art. 65. doi: 10.3390/biomimetics7020065. PMID: 35645192; PMCID: PMC9149993.

20. Тимофеева С. С., Тимофеев С. С., Мишенькина Е. А. Роль фитотехнологий в улучшении среды обитания человека // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2013. Т. 6, № 3-2. С. 73–77.

21. Черных О. Н., Ханов Н. В., Бурлаченко А. В. Пути решения проблем комплексной экологической реабилитации и природоприближённого восстановления малых рек русских усадеб Москвы // Природообустройство. 2019. № 1. С. 47–55.

22. Evdokimova G. A., Ivanova L.A., Mozgova N.P. et al. Floating bioplato for purification of waste quarry waters from mineral nitrogen compounds in the Arctic // Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2016. Vol. 51, pp. 833–838.

23. Салищева О. В., Ворошилин Р. А. От традиционных процессов адсорбции до биоремедиации: современные технологии очистки природных вод от загрязнителей // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 2. С. 205–234.

24. Ханов Н. В., Курбанов С. О., Черных О. Н., Дударова Ф. Т. Биоинженерные технологии защиты и обустройства прибрежных земель малых водных объектов АПК // Природообустройство. 2024. № 3. С. 53–62.

25. Ханов Н. В., Курбанов С. О., Черных О. Н., Дударова Ф. Т. Инновационные технологические решения инженерно-биологических сооружений на мелиоративных системах АПК // Природообустройство. 2024. № 4. С. 67–74.

REFERENCES

1. Lachinina T. A., Chistyakov M. S. *Biotekhnologii v formirovanii postindustrial'nogo oblika chelovecheskoy tsivilizatsii* [Biotechnology in shaping the post-industrial image of human civilization]. *Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii.* 2021. No. 2(68), pp. 130–145.

2. Kadyseva A. A., Knysh A. I. *Biotekhnologicheskie metody ochistki stochnykh vod: monografiya* [Biotechnological methods of wastewater treatment: monograph]. Omsk: Omsk State Agrarian University Publ., 2009. 126 p.

3. De Vriend H., Van Koningsveld M., Van Koningsveld M. et. al. Sustainable hydraulic engineering through building with nature . Journal of Hydro-Environment Research. 2015. No.9, pp. 159-171.

4. Presnov O. M., Doroshko A. D., Zueva D. V., Matveev L. P. *Perspektivnye biotekhnologii v stroitel'nom inzhiniringe* [Promising biotechnologies in construction engineering]. *Ekonomika stroitel'stva*. 2024. No. 5, pp. 181–184.

5. Chernykh T. N., Gorbachevskikh K. A., Kriushin M. V. et al. *Biomineral'nye dobavki dlya samozalechivaniya betona* [Biomineral additives for self-healing concrete]. *Vestnik MGSU*. 2024. Vol. 19, No. 4, pp. 569–579.

6. Baev L. A. *Razvitie metoda SWOT-analiza kak instrumenta strategicheskogo proektnogo planirovaniya i sinteza upravlencheskikh resheniy* [Development of the SWOT analysis method as a tool for strategic project planning and synthesis of management decisions]. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta.* 2024. Vol. 34, No. 4, pp. 656–665.

7. Presnov O. M., Doroshko A. D., Zueva D. V., Matveev L. P. *Perspektivnye biotekhnologii v stroitel'nom inzhiniringe* [Promising biotechnologies in construction engineering]. *Sistemnye tekhnologii.* 2024. No. 2(51), pp. 40–48.

8. Umar M., Kassim K. A., Chiet K. T. P. Biological process of soil improvement in civil engineering: A review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 8, pp. 767–774.

9. Li J., Bi W., Yao Y., Liu Z. State of the Art Review of Utilization of Microbial Induced Calcite Precipitation for Improving Moisture Dependent Properties of Unsaturated Soils // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No. 4. Art. 2502. doi: 10.3390/app13042502.

10. Strokova V. V., Vlasov D. Yu., Frank-Kamenetskaya O. V., Dukhanina U. N., Balitskiy D. A. *Primenenie mikrobnoy karbonatnoy biomineralizatsii v biotekhnologiyakh sozdaniya i vosstanovleniya stroitel'nykh materialov: analiz sostoyaniya i perspektivy razvitiya* [Application of microbial carbonate biomineralization in biotechnologies for creating and restoring construction materials: state analysis and development prospects]. Stroitel'nye materialy. 2019. No. 9, pp. 83–103.

11. Anbu P., Kang C. H., Shin Y. J. et al. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. SpringerPlus. 2016. Vol. 5. Art. 250. doi: 10.1186/s40064-016-1869-2.

12. Erofeev V. T., Al Dulaymi Salman Dawood Salman, Smirnov V. F. *Bakterii dlya polucheniya samovosstanavlivayushchikhsya betonov* [Bacteria for producing self-healing concretes]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya»*. 2018. No. 4. URL: https://t-s.today/PDF/07SATS418.pdf.

13. Wang J., Ersan Y. C., Boon N. et al. Application of microorganisms in concrete: a promising sustainable strategy to improve concrete durability. Applied Microbiology and Biotechnology. 2016. Vol. 100, pp. 2993–3007.

14. Karpov M. V., Zhizdyuk A. A., Naumova O. V. *Obosnovanie ispol'zovaniya biobetonov dlya stroitel'stva gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Justification of using bioconcretes for hydraulic structure construction]. *Vestnik evraziyskoy nauki*. 2022. Vol. 14, No. 5. URL: https://esj.today/PDF/14SAVN522.pdf.

15. Tsarovtseva I. M., Vlasov D. Yu., Mayorova M. A., Belyaeva I. D. *Sovremennye podkhody k zashchite gidrotekhnicheskikh sooruzheniy ot bioobrastaniy* [Modern approaches to protecting hydraulic structures from biofouling]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo.* 2023. No. 2, pp. 19–23.

16. Nizina T. A., Kovshov A. O. *Sovremennoe sostoyanie nauchnykh issledovaniy v oblasti samovosstanavlivayushchikhsya betonov* [Current state of scientific research in the field of self-healing concretes]. *Umnye kompozity v stroitel'stve.* 2024. Vol. 5, No. 4, pp. 35–54.

17. Mohammed H., Abbas W.A. Effect of biopolymer alginate on some properties of concrete. Journal of Engineering. 2020. Vol. 26, No. 6, pp. 121–131.

18. Nathaniel O., Sam A. R. M., Lim N. H. A. S., Adebisi O., Abdulkareem M. Biogenic approach for concrete durability and sustainability using effective microorganisms: A review. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 261. Art. 119664. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119664.

19. Huseien G. F., Saleh A. T., Ghoshal S. K. Effective Microorganism Solution and High Volume of Fly Ash Blended Sustainable Bio-Concrete. Biomimetics (Basel). 2022. Vol. 7, № 2. Art. 65. doi: 10.3390/biomimetics7020065. PMID: 35645192; PMCID: PMC9149993.

20. *Timofeeva S. S., Timofeev S. S., Mishenkina E. A. Rol' fitotekhnologiy v uluchshenii sredy obitaniya cheloveka* [Role of phytotechnologies in improving human living environment]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya.* 2013. Vol. 6, No. 3-2, pp. 73–77.

21. Chernykh O. N., Khanov N. V., Burlachenko A. V. *Puti resheniya problem kompleksnoy ekologicheskoy reabilitatsii i prirodopriblizhennogo vosstanovleniya malykh rek russkikh usadeb Moskvy* [Ways to solve problems of comprehensive ecological rehabilitation and nature-like restoration of small rivers in Moscow's Russian estates]. *Prirodoobustroystvo.* 2019. No. 1, pp. 47–55.

22. Evdokimova G. A., Ivanova L.A., Mozgova N.P. et al. Floating bioplato for purification of waste quarry waters from mineral nitrogen compounds in the Arctic. Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2016. Vol. 51, pp. 833–838.

23. Salishcheva O. V., Voroshilin R. A. *Ot traditsionnykh protsessov adsorbtsii do bioremediatsii: sovremennye tekhnologii ochistki prirodnykh vod ot zagryazniteley* [From traditional adsorption processes to bioremediation: modern technologies for purifying natural waters from pollutants]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ekologiya.* 2025. Vol. 25, No.. 2, pp. 205–234.

24. Khanov N. V., Kurbanov S. O., Chernykh O. N., Dudarova F. T. Bioinzhenernye tekhnologii zashchity i obustroystva pribrezhnykh zemel' malykh vodnykh ob"ektov APK [Bioengineering technologies for protection and arrangement of coastal lands of small water bodies in agro-industrial complex]. *Prirodoobustroystvo.* 2024. No. 3, pp. 53–62.

25. Khanov N. V., Kurbanov S. O., Chernykh O. N., Dudarova F. T. *Innovatsionnye tekhnologicheskie resheniya inzhenerno-biologicheskikh sooruzheniy na meliorativnykh sistemakh APK* [Innovative technological solutions for engineering-biological structures in land reclamation systems of agro-industrial complex]. *Prirodoobustroystvo.* 2024. No. 4, pp. 67–74.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Кадысева Анастасия Александровна – доктор биологических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА им.К.А.Тимирязева (127550,Россия, г. Москва, ул. Б. Академическая, д. 44с4, e-mail: kadyseva@mail.ru)	*Kadyseva Anastasia Alexandrovna* – Dr. Sci. (Biol), Assoc. Prof., Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy (44c4 B. Akademicheskaya St., Moscow, 127550, Russia, e-mail: kadyseva@mail.ru
Максимова Светлана Валентиновна – кандидат технических наук, доцент, Тюменский индустриальный университет (625001, Россия, г. Тюмень, ул. Луначарского, д.4, e-mail: maksimovasv@tyuiu.ru)	*Maximova Svetlana Valentinovna* – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Tyumen Industrial University (4 Lunacharsky St., Tyumen, 625001, Russia, e-mail: maksimovasv@tyuiu.ru)
Миронов Виктор Владимирович – доктор технических наук, профессор, Тюменский индустриальный университет (625001, Россия, г. Тюмень, ул. Луначарского, д.4, e-mail: vvmironov@list.ru)	*Mironov Viktor Vladimirovich* – Dr. Sci. (Eng), Prof., Tyumen Industrial University (4 Lunacharsky St., Tyumen, 625001, Russia, e-mail: vvmironov@list.ru

Ханов Нартмир Владимирович – доктор технических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – МСХА им.К.А.Тимирязева (127550, Россия, г. Москва, ул. Б. Академическая, д. 44с4, e-mail: nvkhanov@yahoo.com)	*Khanov Nartmir Vladimirovich* — Dr. Sci. (Eng), Prof., Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (44b4 Bolshaya Akademicheskaya St., Moscow, 127550, Russia; e-mail: nvkhanov@yahoo.com).
Семёнова Кристина Сергеевна – кандидат технических наук, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А.Тимирязева (127550, Россия, г. Москва, ул. Б. Академическая, д. 44с4, e-mail: semenova@rgau-msha.ru)	Semenova Kristina Sergeevna — Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (44b4 Bolshaya Akademicheskaya St., Moscow, 127550, Russia; e-mail: semenova@rgau-msha.ru).

Статья поступила в редакцию 01.11.2025; одобрена после рецензирования 14.11.2025, принята к публикации 20.11.2025.
The article was submitted 01.11.2025; approved after reviewing 14.11.2025; accepted for publication 20.11.2025.