БИОЛОГИЯ

БИОТЕХНОЛОГИИ И БИОНАНОТЕХНОЛОГИИ

Статья поступила в редакцию: 04.09.2026
Статья принята к публикации: 21.09.2026
Статья опубликована: 07.10.2026

УДК 579.222+628.35+631.847

DOI: 10.32743/UniChem.2026.148.10.23453

Практическое внедрение цианобактериальных технологий в условиях Узбекистана

Абдумуталиева Дилнавоз Эраж кизи
магистрант
Наманганский филиал Международного университета Кимё в Ташкенте
Республика Узбекистан, г. Наманган
E-mail: dilnavozabdumutaliyeva@gmail.com

Мирзаолимова Мохизар Мухаматкарим кизи
PhD, преподаватель
кафедры фундаментальных медицинских дисциплин Наманганский филиал Международного университета Кимё в Ташкенте
Республика Узбекистан, г. Наманган
E-mail: mohizar_95@mail.ru

Камалова Гулнора Гулямовна
PhD, преподаватель
научный руководитель кафедры фундаментальных медицинских дисциплин Наманганский филиал Международного университета Кимё в Ташкенте
Республика Узбекистан, г. Наманган
E-mail: gkamalovamed1972@gmail.com

Practical implementation of cyanobacterial technologies in the conditions of Uzbekistan

Abdumutalieva Dilnavoz Erazh kizi
master's student
Namangan Branch of Kimyo International University in Tashkent
Republic of Uzbekistan, Namangan

Библиографическое описание: Абдумуталиева Д.Э. кизи, Мирзаолимова М.М. кизи, Камалова Г.Г. Практическое внедрение цианобактериальных технологий в условиях Узбекистана // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 10(148). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23453

Mirzaolimova Mokhizar Mukhamatkarim kizi
PhD, Lecturer
Department of Fundamental Medical Disciplines Namangan Branch of Kimyo International University in Tashkent
Republic of Uzbekistan, Namangan

Kamalova Gulnora Gulyamovna
PhD, Lecturer
scientific Supervisor, Department of Fundamental Medical Disciplines Namangan Branch of Kimyo International University in Tashkent
Republic of Uzbekistan, Namangan

Аннотация

В статье обобщены научные, технологические и организационные предпосылки практического внедрения цианобактериальных технологий в условиях Узбекистана. Цель исследования — определить применимые направления использования цианобактерий с учетом аридного климата, дефицита воды, сезонных температурных колебаний и требований биобезопасности. Методология включает аналитический обзор научных публикаций, сравнительный анализ технологических цепочек культивирования и переработки биомассы, элементы оценки жизненного цикла и концептуальное моделирование сценариев. Выделены три взаимодополняющих направления: получение биоудобрений и биостимуляторов, поддержание плодородия почв посредством биологической фиксации азота и фототрофная доочистка сточных вод с получением биомассы. Для каждого сценария определены основные технологические параметры, показатели мониторинга и ограничения масштабирования. Наиболее перспективной стартовой схемой рассматривается сочетание очистки сточных вод и получения биомассы, поскольку оно объединяет экологическую функцию с возможностью последующей валоризации. Показана необходимость контроля цианотоксинов, микробиологической чистоты, состава биомассы и предотвращения контаминации. Предложена поэтапная логика перехода от лабораторного скрининга к пилотным и демонстрационным объектам. Сделан вывод о необходимости экспериментальной проверки разработанной модели в региональных условиях.

Abstract

This article summarizes the scientific, technological, and organizational prerequisites for implementing cyanobacterial technologies in Uzbekistan. The aim is to identify applicable pathways while considering arid climate conditions, water scarcity, seasonal temperature fluctuations, and biosafety requirements. The methodology combines an analytical review of scientific publications, comparative assessment of cultivation and biomass-processing chains, selected life-cycle elements, and conceptual scenario modeling. Three complementary pathways are identified: production of biofertilizers and biostimulants, maintenance of soil fertility through biological nitrogen fixation, and phototrophic wastewater polishing with biomass recovery. Key technological parameters, monitoring indicators, and scaling constraints are specified for each pathway. Wastewater treatment coupled with biomass recovery is considered a promising starting configuration because it combines an environmental service with potential biomass valorization. The analysis emphasizes control of cyanotoxins, microbiological purity, biomass composition, and

contamination prevention. A phased pathway from laboratory screening to pilot and demonstration facilities is proposed. The resulting model is conceptual and requires experimental validation under local conditions before practical scaling.

Ключевые слова: цианобактерии, биоудобрения, азотфиксация, фототрофная доочистка, биомасса, аридный климат, биобезопасность.

Keywords: cyanobacteria, biofertilizers, nitrogen fixation, phototrophic wastewater treatment, biomass valorization, arid climate, biosafety.

Введение

Практическое внедрение цианобактериальных технологий в Узбекистане связано с дефицитом пресной воды, деградацией почвенного плодородия и необходимостью повышения ресурсной эффективности агропромышленного комплекса. Цианобактерии способны преобразовывать солнечную энергию и неорганический углерод в биомассу, а отдельные таксоны фиксируют атмосферный азот. Поэтому они рассматриваются как компоненты биоудобрений и биостимуляторов, а также фотобиологических систем доочистки сточных вод [16; 9]. Для региона существенны высокая инсоляция, сезонные колебания температуры, неоднородная минерализация воды и различная органическая нагрузка стоков, определяющие требования к подбору штаммов и режимам культивирования.

Современные исследования развиваются по двум основным направлениям. Первое связано с агробиотехнологией: биомасса и метаболиты цианобактерий используются как компоненты биоудобрений, биостимуляторов и почвенных кондиционеров, в том числе для повышения устойчивости растений к засолению и засухе [15; 12; 3; 10]. Второе относится к экологической инженерии: фототрофные консорциумы применяются для удаления биогенных элементов и органической нагрузки из сточных вод, а также для получения биомассы [5; 1; 8]. При переносе зарубежных решений без адаптации возможны снижение продуктивности, рост затрат на водоподготовку и нестабильность культур.

Цель работы — разработать концептуальную модель практического внедрения цианобактериальных технологий в условиях Узбекистана. Задачи: систематизировать применимые технологические цепочки, сопоставить три сценария использования, определить ключевые показатели мониторинга и требования биобезопасности, а также обозначить барьеры масштабирования. Работа носит аналитический характер и не заменяет лабораторную или полевую валидацию.

Материалы и методы

Исследование основано на аналитическом обзоре публикаций по биоудобрениям, биологической азотфиксации, фототрофной очистке сточных вод и использованию фототрофной биомассы [8; 1; 3; 10; 12]. Источники сопоставлялись по релевантности к аридным регионам, описанию режимов культивирования, показателям эффективности и технологической воспроизводимости. При рассмотрении штаммов учитывались продуктивность, устойчивость к минерализации и температурным колебаниям, способность к азотфиксации и отсутствие известных признаков токсигенности.

Сравнивались технологические цепочки подготовки воды и питательной среды, культивирования в открытых и закрытых системах, сбора и первичной переработки биомассы и контроля качества. Параметры освещенности, температуры, pH и состава среды не задавались как универсальные, поскольку они должны уточняться для конкретного штамма на пилотной стадии. Дополнительно использовались элементы оценки жизненного цикла для выявления водных и энергетических ограничений и концептуальное моделирование связей между ресурсами, биологическими параметрами и целевыми результатами.

Для региональной адаптации учитывались опубликованные сведения о климатической сезонности, водохозяйственных системах и биотехнологических разработках в регионе [6]. Отсутствие собственных полевых экспериментов рассматривается как основное ограничение; поэтому экономические и технологические выводы имеют предварительный характер и требуют проверки на пилотных объектах [9; 13; 1].

Результаты и обсуждение

Анализ позволил выделить три сценария внедрения. Первый — производство биоудобрений и биостимуляторов на основе биомассы или экзополисахаридов. Для него критичны стабильность состава биомассы, содержание основных элементов питания, отсутствие токсигенных свойств, микробиологическая чистота и воспроизводимость дозировок. Технологическая цепочка включает подбор нетоксигенных штаммов, использование воды с контролируемой минерализацией, сбор биомассы и ее стабилизацию для хранения и транспортировки [3; 10; 12].

Второй сценарий связан с поддержанием плодородия почв посредством биологической фиксации азота и формирования биопленок в агроценозах. Результатом является не только товарный продукт, но и экосистемная услуга — увеличение доступного азота и улучшение свойств почвы. Мониторинг должен включать динамику минеральных форм азота, органического вещества, водопрочности агрегатов и показатели продуктивности культур. Практическая устойчивость повышается при использовании локально адаптированных инокуляций и контроле водного и солевого режима [14; 12].

Третий сценарий — фототрофная доочистка сточных вод с одновременным получением биомассы. Целевыми показателями являются удаление аммонийного азота и фосфатов, снижение органической нагрузки, стабилизация pH и растворенного кислорода. Биомасса может рассматриваться как сопутствующий поток для дальнейшей переработки, но ее назначение должно определяться результатами контроля качества. Открытые системы допустимы только при наличии протоколов биобезопасности и предотвращения распространения нежелательных организмов [5; 1; 8].

Сопоставление сценариев показывает целесообразность поэтапного внедрения. На стартовом этапе может использоваться связка «очистка стоков + биомасса», затем — стандартизованные биоудобрения и биостимуляторы, и далее — локальные решения по биологической азотфиксации. Такая последовательность позволяет переходить от функции экологической услуги к товарным продуктам после накопления данных о качестве

и безопасности. Для всех сценариев необходимы паспорт штамма, протоколы предотвращения контаминации, аналитический контроль и регламент обращения с биомассой [16; 5; 1; 8].

Агросценарии требуют особенно строгой стандартизации, поскольку состав биомассы и почвенно-климатические условия влияют на результат применения [15; 3; 10; 12]. Для Узбекистана важны засоление и неоднородность орошаемых почв, поэтому необходимы отбор устойчивых штаммов и адаптация схем внесения. Биологическая азотфиксация также зависит от микробиома почвы, режима орошения и агротехнических операций, что ограничивает ее внедрение без локальных сравнительных испытаний.

Ключевым аспектом биобезопасности является исключение токсигенных штаммов и контроль нежелательных цветений. В программу мониторинга следует включать микроцистины, анатоксин-а и сакситоксины, а допустимые уровни определять в соответствии с назначением воды или биомассы и действующими нормативами [9; 17]. При выявлении токсинов биомасса не должна направляться на аграрное применение без дополнительной оценки. Экономическую эффективность следует рассчитывать отдельно для каждого пилотного сценария с учетом капитальных затрат, энергии, водоподготовки, сбора биомассы и ее возможной стоимости; в данной работе срок окупаемости не определялся из-за отсутствия локальных исходных данных.

Заключение

Практическое внедрение цианобактериальных технологий в условиях Узбекистана следует рассматривать как поэтапный процесс, учитывающий биологические свойства штаммов и водно-ресурсные ограничения аридного региона. Анализ выделил три взаимосвязанных направления: биоудобрения и биостимуляторы, биологическая азотфиксация и фототрофная доочистка сточных вод с получением биомассы. Стартовой платформой может стать сочетание очистки стоков с последующей валоризацией биомассы, однако этот вывод требует пилотной проверки. Для аграрных решений необходимы стандартизация состава, полевые испытания и контроль биобезопасности. Для всех направлений рекомендуются лабораторный скрининг нетоксигенных штаммов, пилотное испытание, контроль воды и биомассы, предварительная экономическая оценка и только затем переход к демонстрационному масштабу.

Список литературы

1. Абдельфаттах, А., Али, С.С., Рамадан, Х. и др. Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects // Environmental Science and Ecotechnology. – 2023. – Т. 13. – Art. 100205. – DOI: 10.1016/j.ese.2022.100205.
2. Абед, Р.М.М., Добретцов, С., Судеш, К. Applications of cyanobacteria in biotechnology // Journal of Applied Microbiology. – 2009. – Т. 106. – Р. 1–12. – DOI: 10.1111/j. 1365–2672.2008.03918.x.

3. Биби, С., Саадауи, И., Биби, А. и др. Applications, advancements, and challenges of cyanobacteria-based biofertilizers for sustainable agro and ecosystems in arid climates // Bioresource Technology Reports. – 2024. – Т. 25. – Art. 101789. – DOI: 10.1016/j.biteb.2024.101789.
4. Де-Башан, Л.Е., Башан, Й. Immobilized microalgae for removing pollutants: Review of practical aspects // Bioresource Technology. – 2010. – Т. 101. – P. 1611–1627.
5. Крэггс, Р.Дж., Хюбек, С., Лундквист, Т.Дж., Бененманн, Дж.Р. Algal biofuels from wastewater treatment high rate algal ponds // Water Science and Technology. – 2011. – Т. 63. – P. 660–665.
6. Мухамедов, Ш.М., Юлдашев, Н.Н. Биотехнологические основы получения биомассы микроводорослей в условиях засушливого климата. – Ташкент: Издательство «Фан», 2019. – 216 с.
7. Пак, Дж.Б.К., Крэггс, Р.Дж., Шилтон, А.Н. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production // Bioresource Technology. – 2011. – Т. 102. – P. 35–42. – DOI: 10.1016/j.biortech.2010.06.158.
8. Санчес-Кинтеро, А., Фернандеш, С.К.М., Бегбедер, Ж.-Б. Overview of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants produced from wastewater and CO2 streams towards sustainable agriculture: A review // Microbiological Research. – 2023. – Т. 277. – Art. 127505. – DOI: 10.1016/j.micres.2023.127505.
9. Хорус, И., Велкер, М. Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management. – 2-е изд. – Лондон: CRC Press, 2021. – 859 P.
10. Чабили, А., Минауи, Ф., Хаккум, З. и др. A comprehensive review of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants for agriculture uses // Plants. – 2024. – Т. 13. – Art. 159. – DOI: 10.3390/plants13020159.
11. Чисти, Й. Biodiesel from microalgae // Biotechnology Advances. – 2007. – Т. 25. – P. 294–306. – DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001.
12. Ramakrishnan B., Maddela N.R., Venkateswarlu K., Megharaj M. Potential of microalgae and cyanobacteria to improve soil health and agricultural productivity: a critical view // Environmental Science: Advances. – 2023. – Т. 2, № 4. – P. 586–611. – DOI: 10.1039/D2VA00158F.
13. Richmond A., Hu Q. Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology. – 2nd ed. – Oxford: Wiley-Blackwell, 2013. – 719 P.
14. Rossi F., Li H., Liu Y., De Philippis R. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal // Earth-Science Reviews. – 2017. – Т. 171. – P. 28–43. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.05.006.
15. Singh J.S., Kumar A., Rai A.N., Singh D.P. Cyanobacteria: A Precious Bio-resource in Agriculture, Ecosystem, and Environmental Sustainability. – New Delhi: Springer, 2016. – 404 P.

16. Whitton B.A., Potts M. The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space. – Dordrecht: Springer, 2012. – 760 P.
17. World Health Organization. Management of cyanobacteria in drinking-water supplies: information for regulators and water suppliers. – 2nd ed. – Geneva: World Health Organization, 2024. – 28 P. – DOI: 10.2471/B09130.

References

1. Abdelfattah A., Ali S.S., Ramadan H., El-Aswar E.I., Eltawab R., Ho S.-H., Elsamahy T., Li S., El-Sheekh M.M., Schagerl M., Kornaros M., Sun J. Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects // Environmental Science and Ecotechnology. – 2023. – Vol. 13. – Art. 100205. – DOI: 10.1016/j.ese.2022.100205.
2. Abed R.M.M., Dobretsov S., Sudesh K. Applications of cyanobacteria in biotechnology // Journal of Applied Microbiology. – 2009. – Vol. 106. – P. 1–12. – DOI: 10.1111/j. 1365–2672.2008.03918.x.
3. Bibi S., Saadaoui I., Bibi A., Al-Ghouti M., Abu-Dieyeh M.H. Applications, advancements, and challenges of cyanobacteria-based biofertilizers for sustainable agro and ecosystems in arid climates // Bioresource Technology Reports. – 2024. – Vol. 25. – Art. 101789. – DOI: 10.1016/ j.biteb.2024.101789.
4. De-Bashan L.E., Bashan Y. Immobilized microalgae for removing pollutants: Review of practical aspects // Bioresource Technology. – 2010. – Vol. 101. – P. 1611–1627.
5. Craggs R.J., Heubeck S., Lundquist T.J., Benemann J.R. Algal biofuels from wastewater treatment high rate algal ponds // Water Science and Technology. – 2011. – Vol. 63. – P. 660–665.
6. Mukhamedov Sh.M., Yuldashev N.N. [Biotechnological foundations of microalgae biomass production under arid climate conditions. 216 P.]. – Tashkent: Izdatel'stvo «Fan», 2019 (In Russ.)
7. Park J.B.K., Craggs R.J., Shilton A.N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production // Bioresource Technology. – 2011. – Vol. 102. – P. 35–42. – DOI: 10.1016/ j.biortech.2010.06.158.
8. Санчес-Кинтеро А., Фернандеш С.К.М., Бегбедер Ж.-Б. [Sánchez-Quintero Á., Fernandes S.C.M., Beigbeder J.-B. Overview of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants produced from wastewater and CO2 streams towards sustainable agriculture: A review] // Microbiological Research. – 2023. – Vol. 277. – Art. 127505. – DOI: 10.1016/j.micres. 2023.127505. (In Russ.)
9. Chorus I., Welker M. Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management. – 2nd ed. – London: CRC Press, 2021. – 859 P.
10. Chabili A., Minaoui F., Hakkoum Z., Douma M., Meddich A., Loudiki M. A comprehensive review of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants for agriculture uses // Plants. – 2024. – Vol. 13. – Art. 159. – DOI: 10.3390/plants13020159.

11. Chisti Y. Biodiesel from microalgae // Biotechnology Advances. – 2007. – Vol. 25. – P. 294–306. – DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001.
12. Ramakrishnan B., Maddela N.R., Venkateswarlu K., Megharaj M. Potential of microalgae and cyanobacteria to improve soil health and agricultural productivity: a critical view // Environmental Science: Advances. – 2023. – Vol. 2, No. 4. – P. 586–611. – DOI: 10.1039/D2VA00158F.
13. Richmond A., Hu Q. Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology. – 2nd ed. – Oxford: Wiley-Blackwell, 2013. – 719 P.
14. Rossi F., Li H., Liu Y., De Philippis R. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal // Earth-Science Reviews. – 2017. – Vol. 171. – P. 28–43. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.05.006.
15. Singh J.S., Kumar A., Rai A.N., Singh D.P. Cyanobacteria: A Precious Bio-resource in Agriculture, Ecosystem, and Environmental Sustainability. – New Delhi: Springer, 2016. – 404 P.
16. Whitton B.A., Potts M. The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space. – Dordrecht: Springer, 2012. – 760 P.
17. World Health Organization. Management of cyanobacteria in drinking-water supplies: information for regulators and water suppliers. – 2nd ed. – Geneva: World Health Organization, 2024. – 28 P. – DOI: 10.2471/B09130.