

Вестник¹⁶⁺

Башкирского государственного
педагогического университета
им. М. Акмуллы



Серия:
Естественные науки

2/2026

ВЕСТНИК



БАШКИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕДАГОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. М. АКМУЛЛЫ

Научно-практический журнал

Серия:

Естественные науки

№ 2/ 2026

Учредитель

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Башкирский государственный
педагогический университет им. М.
Акмуллы»

Адрес издателя и учредителя:

450077, РБ, г. Уфа,
ул. Октябрьской революции, 3-а.

Адрес редакции:

450077, РБ, г. Уфа,
ул. Октябрьской революции, 3-а,
корп. 3., каб. 02
Тел.: 8 (347) 246-92-42
E-mail: vestnik.bspu@yandex.ru

© Редакция Вестника БГПУ
им. М. Акмуллы.

© Муратов И.М., обложка, 2024.

Издается с 2000 года.

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по
надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций.
Рег. №: ПИ №ФС77-87973 от 30
июля 2024 г.

Ответственный редактор:

Аманбаева З.С.

Ответственный секретарь:

Масалимова В.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Саттаров
Венер
Нуруллович**

главный редактор, д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой экологии, географии и природопользования ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы» (г. Уфа, Россия).

**Аюбов
Ильгар
Гаджи оглу**

д-р хим. наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории «Циклоолефины» Института нефтехимических процессов им. акад. Ю.Г. Мамедалиева Министерства науки и образования (г. Баку, Азербайджан).

**Воробьева
Светлана
Леонидовна**

д-р с.-х. наук, проректор по образовательной деятельности и молодежной политике, профессор кафедры кормления и разведения сельскохозяйственных животных ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет» (г. Ижевск, Россия).

**Гаджиева
Гюльсум
Энвер кызы**

канд. хим. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Изучение антимикробных реагентов и биоповреждений» Института нефтехимических процессов имени академика Ю.Г. Мамедалиева Министерства науки и образования (г. Баку, Азербайджан).

**Джафаров
Иса
Ага оглу**

канд. хим. наук, доцент кафедры «Аналитическая и органическая химия» Азербайджанского государственного педагогического университета (г. Баку, Азербайджан).

**Земскова
Наталья
Евгеньевна**

д-р биол. наук, зав. кафедрой «Зоотехния» ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет» (г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, Россия).

**Измаилов
Рамиль
Наильевич**

канд. ф.-м. наук, доцент, зав. кафедрой физики и нанотехнологий ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы» (г. Уфа, Россия).

**Ильясов
Рустем
Абузарович**

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нейробиологии развития ФГБУН Институт биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН (г. Москва, Россия).

**Маликов
Рамиль
Фарукович**

д-р ф.-м. наук, профессор, руководитель научно-исследовательской лаборатории «Системный анализ и математическое моделирование» ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы» (г. Уфа, Россия).

Мамедбейли Эльдар Гусейнгулу оглу	д-р хим. наук, профессор, зав. лаборатории «Изучение антимикробных реагентов и биоповреждений» Института нефтехимических процессов им. акад. Ю.Г. Мамедалиева Министерства науки и образования (г. Баку, Азербайджан).
Маннапов Альфир Габдуллович	д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой аквакультуры и пчеловодства ФГБОУ ВО «РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева» (г. Москва, Россия).
Морева Лариса Яковлевна	д-р биол. наук, профессор кафедры зоологии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» (г. Краснодар, Россия).
Насретдинова Римма Наилевна	канд. хим. наук, доцент кафедры физической химии и химической экологии, зам. директора института химии и защиты в чрезвычайных ситуациях по учебной работе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (г. Уфа, Россия).
Седых Татьяна Александровна	д-р биол. наук, зав. кафедрой генетики и химии ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы» (г. Уфа, Россия).
Семенов Владимир Григорьевич	д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой морфологии, акушерства и терапии ФГБОУ ВО «Чувашский государственный аграрный университет» (г. Чебоксары, Россия).
Суханова Наталья Викторовна	д-р биол. наук, зав. кафедрой биоэкологии и биологического образования ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы» (г. Уфа, Россия).
Улугов Одилджон Пардаалиевич	канд. с.-х. наук, зав. кафедрой естествознания ОУ «Таджикский государственный финансово-экономический университет» (г. Душанбе, Таджикистан).
Юлдашбаев Юсупжан Артыкович	д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН, ФГБОУ ВО «РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева» (г. Москва, Россия).
Юсупов Азат Равилевич	канд. ф.-м. наук, директор института физики, математики, цифровых и нанотехнологий ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы» (г. Уфа, Россия).

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Абдикалилов Н.Н., Бурханова Э.У., Чубак У.С., Умарова С.Т., Суханова Н.В., Тотубаева Н.Э.* 6
Технология создания природных семенных шариков с использованием гидрогеля для восстановления деградированных пастбищных угодий, находящихся под климатическим стрессом
- Абдрахманова М.А., Жумабекова Б.К.* 20
Моделирование как инструмент решения проблем преподавания биохимии и молекулярной биологии в подготовке будущих учителей биологии
- Бурханова Э.У., Чубак У.С., Абдикалилов Н., Умарова С.Т., Суханова Н.В., Тотубаева Н.Э.* 28
Системы seed-ball на основе цианобактерий и водорослей для восстановления деградированных почв: баланс механической стабильности и биологической функциональности
- Захарова Я.А., Исмаилова А.А., Ухаткина К.Б., Суханова Н.В.* 43
Сравнительный анализ содержания внеклеточных и внутриклеточных метаболитов у различных видов микроскопических водорослей и цианобактерий
- Исмаилова А.А., Ухаткина К.Б., Захарова Я.А., Суханова Н.В.* 52
Влияние суспензии микроскопических зеленых водорослей на рост пряных культур в условиях зимнего сада
- Махмутов А.Р., Гайсина Л.А.* 60
Воздействие биогенных аминов на рост и развитие зелёных одноклеточных водорослей
- Рахматуллина А.Р., Саттаров В.Н.* 72
Листоядные вредители липы мелколистной в условиях Уфы (липовые насаждения около БГПУ им. М. Акмуллы)
- Ухаткина К.Б., Исмаилова А.А., Захарова Я.А., Суханова Н.В.* 81
Сравнительный анализ содержания внеклеточных и внутриклеточных метаболитов у различных видов микроскопических водорослей и цианобактерий

Чернов В.М., Максютова А.И., Якупова А.Р., Суханова Н.В. 88
Оценка токсичности почвы города Уфы с использованием
многокомпонентной тест-системы

Чубак У.С., Бурханова Э.У., Абдикалилов Н., Умарова С.Т., 97
Суханова Н.В., Тотубаева Н.Э.

Цианобактериально-водорослевая экосистемная инженерия как
механизм ускоренного формирования биологических почвенных
корок и функционального восстановления деградированных почв

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Гаджиева Г.Ф., Расулов Ч.К., Алиева К.Ш., Гейдарли Г.З. 113
Розмариновая кислота и ее биологические функции

Сафарова И.Р., Ибрагимова М.Д. 124
Тетрациклододецен: свойства и области применения

Ширинов П.М., Турабханлы С.Э., Шахтактинская П.Т. 141
К методам алкилирования ароматических аминов

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Общие положения 154

Рекомендуемая структура публикаций 155

Требования к текстовой части статьи 164

Образцы оформления ссылок на литературу 165

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 502.3/.7

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-6-19

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ПРИРОДНЫХ СЕМЕННЫХ ШАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОГЕЛЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ПАСТБИЩНЫХ УГОДИЙ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТРЕССА

*Нурбол Нурланович Абдикалилов¹, Элизабет Усеновна
Бурханова², Уулу Сыргак Чубак³, Севархон Тахировна
Умарова⁴, Наталья Викторовна Суханова⁵, Нурзат
Эрмековна Тотубаева⁶*

*^{1,2,3,4,6} Кыргызско-Турецкий университет «Манас», Бишкек,
Кыргызстан, nurzat.totubaeva@manas.edu.kg*

*⁵ Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы, Уфа, Россия, n_suhanova@mail.ru*

Аннотация. В настоящее время наблюдается глобальное расширение сельскохозяйственных земель, увеличение пастбищной нагрузки и рост поголовья скота, в результате которых значительно усилились процессы деградации почвы. Площадь деградированных земель продолжает расширяться, а в регионах, подверженных водной и ветровой эрозии, наблюдается снижение кормовой продуктивности пастбищных экосистем. Для решения этой проблемы в данном исследовании изучается применение технологии семенных шариков как эффективного подхода к восстановлению деградированных пастбищ и повышению их устойчивости к изменению климата. Эта технология обеспечивает механическую защиту семян и создает благоприятную микросреду для их прорастания. Состав семенных шариков включал гидрогель (HG), способный долго удерживать влагу и постепенно высвобождать воду в почву; активированный уголь из рисовой шелухи (RHAC), служащий дополнительным источником углерода и способствующий улучшению структуры почвы; комплекс минеральных удобрений и компост, полученный из пищевых отходов. Результаты показали, что применение этой технологии обеспечило успешное прорастание более 30% семян. Совместное использование гидрогеля и RHAC способствовало ускоренному развитию корневой системы проростков, при этом количество боковых корней увеличилось на 50% по сравнению с контрольными растениями. Также

наблюдалось значительное усиление надземного роста: длина стебля увеличилась на 3,3 см. В то время как у контрольных растений развился только один побег, у растений, обработанных HG + RHAC, образовалось два побега, что указывает на усиленный вегетативный рост. Полученные результаты подтверждают высокий потенциал технологии семенных шариков для восстановления деградированных и засушливых земель, что позволяет в дальнейшем эффективно использовать их в сельскохозяйственном производстве.

Ключевые слова: деградация пастбищ, природоориентированные решения, гидрогель, изменение климата, семенные шарики.

Для цитирования: Абдикалилов Н.Н., Бурханова Э.У., Чубак У.С., Умарова С.Т., Суханова Н.В., Тотубаева Н.Э. Технология создания природных семенных шариков с использованием гидрогеля для восстановления деградированных пастбищных угодий в условиях климатического стресса // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №. С. 6-19.

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

HYDROGEL-ENHANCED NATURE-BASED SEED BALL TECHNOLOGIES FOR RESTORATION OF DEGRADED GRAZING LANDS UNDER CLIMATE STRESS

Nurbol Nurlanovich Abdikalilov¹, Elizabet Usenovna Burkhanova², Uulu Syrgak Chubak³, Sevarkhon Takhirovna Umarova⁴, Natalya Viktorovna Sukhanova⁵, Nurzat Ermekovna Totubaeva⁶

^{1,2,3,4,6} Kyrgyz-Turkish «Manas» University, Bishkek, Kyrgyzstan, nurzat.totubaeva@manas.edu.kg

⁵ Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla, Ufa, Russia, n_suhanova@mail.ru

Abstract. The global expansion of agricultural land, increasing grazing pressure, and growing livestock populations have significantly accelerated soil degradation processes. The area of degraded land continues to expand, and in regions susceptible to water and wind erosion, the forage productivity of pasture ecosystems has declined. To address this problem, this study examines the use of seedball technology as an effective approach to restoring degraded pastures and increasing their resilience to climate change. This technology provides mechanical protection for seeds and

creates a favorable microenvironment for their germination. The seedballs included a hydrogel (HG), which can retain moisture for a long time and gradually release water into the soil; rice husk activated carbon (RHAC), which serves as an additional carbon source and helps improve soil structure; a complex of mineral fertilizers; and compost obtained from food waste. The results showed that the application of this technology ensured the successful germination of more than 30% of the seeds. The combined use of hydrogel and RHAC promoted accelerated root development in seedlings, with the number of lateral roots increasing by 50% compared to control plants. A significant increase in aboveground growth was also observed: stem length increased by 3.3 cm. While control plants developed only one shoot, plants treated with HG + RHAC developed two shoots, indicating enhanced vegetative growth. These results confirm the high potential of seedball technology for restoring degraded and arid lands, enabling its future effective use in agricultural production.

Key words: pasture degradation, nature-based solutions, hydrogel, climate change, seed-balls.

For citation: Abdikalilov N.N., Burkhanova E.U., Chubak U.S., Umarova S.T., Sukhanova N.V., Totubaeva N.E. Technology for creating natural seed balls using hydrogel for the restoration of degraded pastures under climatic stress // Bulletin of the Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla. Series: Natural Sciences. 2026. No. pp. 6-19.

Введение

Согласно прогнозам международных демографических исследований, к 2050 году численность населения мира может достигнуть 9,7 млрд человек [15]. Рост населения неизбежно приведёт к увеличению потребности в продовольствии, что требует более интенсивного использования земельных ресурсов и повышения эффективности сельскохозяйственного производства. Однако расширение сельскохозяйственных угодий сопровождается рядом экологических и ресурсных ограничений. Увеличение площади обрабатываемых земель часто приводит к усилению деградационных процессов, дефициту водных ресурсов, а также загрязнению почв и водных экосистем агрохимикатами – проблемам, которые наблюдаются во многих регионах мира [14, 8, 10]. В глобальном масштабе эрозия, вызванная водой, затрагивает 11 миллионов км², а эрозия, вызванная ветром – 5,49 миллионов км² [12].

По оценкам исследований, мировой аграрный сектор ежегодно потребляет около 7130 км³ пресной воды [3] и использует около 1,9 млн тонн пестицидов [13]. Такая интенсивность эксплуатации природных ресурсов оказывает значительное давление на

агроэкосистемы и требует поиска более устойчивых технологий землепользования.

Особую актуальность данные проблемы приобретают для стран с ограниченными земельными ресурсами. Например, территория Кыргызской Республики примерно на 94 % занята горными ландшафтами, что существенно ограничивает площадь земель, пригодных для сельскохозяйственного использования. В связи с этим важным направлением становится вовлечение в хозяйственный оборот деградированных и ранее неиспользуемых земель, а также разработка эффективных методов восстановления их продуктивности.

Одним из перспективных подходов к восстановлению и улучшению свойств почв является применение гидрогелей. Гидрогели представляют собой высокополимерные гидрофильные материалы, способные поглощать и удерживать значительные объёмы воды. В научных исследованиях гидрогели изучаются и применяются в биологических и сельскохозяйственных целях уже более 50 лет [11].

Благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам гидрогели могут выступать в качестве эффективной платформы для накопления и постепенного высвобождения влаги и питательных веществ в почве, что особенно важно для засушливых и полузасушливых регионов. Они способны длительное время удерживать воду и агрохимические вещества, постепенно высвобождая их в процессе роста растений и тем самым обеспечивая более стабильные условия для развития корневой системы (рис. 2) [4]. Применение гидрогелей также позволяет снижать потребление воды при орошении и повышать эффективность использования удобрений, что делает данную технологию экономически и экологически перспективной [7].

Кроме того, гидрогели могут использоваться в качестве носителей питательных элементов. Обогащённые нутриентами гидрогели рассматриваются как потенциальный инструмент для решения проблемы дефицита макроэлементов в почве, особенно фосфора, запасы которого в агроэкосистемах постепенно сокращаются [5]. Также они способны снижать миграцию загрязняющих веществ в почве и участвовать в процессах ремедиации, включая связывание тяжёлых металлов (например, Cu^{2+} и Hg^{2+}), тем самым способствуя повышению экологической устойчивости агроландшафтов [4].

Стабильность и эффективность гидрогелей в почвенной среде зависят от ряда факторов, включая температуру, pH среды, микробиологическую активность, освещённость и глубину залегания материала в почве [6]. Важную роль играет температурный режим: согласно правилу Вант-Гоффа, скорость химических и биохимических реакций увеличивается в 2-3 раза при повышении температуры на

каждые 10 °С. Экспериментальные исследования полимерных гидрогелей типа SSPH (Strongly Swelling Polymer Hydrogels) показали, что наиболее интенсивное их разложение наблюдается при температуре около +37°C, что связано с оптимальными условиями для микробиологической активности, участвующей в деградации полимеров [9]. Таким образом, микробиологические процессы и температурный режим являются ключевыми факторами, определяющими скорость разрушения гидрогелей в почве.

Также необходимо учитывать молекулярную массу полимеров и особенности агротехнической обработки почвы. Низкомолекулярные гидрогели, как правило, разлагаются быстрее и оказывают меньшее воздействие на окружающую среду, что повышает их экологическую безопасность [1]. При интенсивной механической обработке почвы скорость разрушения гидрогелей может увеличиваться, что также следует учитывать при практическом применении данной технологии.

Эффективность применения гидрогелей в сельском хозяйстве подтверждается экспериментальными исследованиями на различных культурах. В ряде экспериментов влияние гидрогелей на прорастание семян и развитие растений изучалось на таких культурах, как томат (Chiko III), мята (Mint), базилик (Basilik red) и чиа (Chia). Наблюдения проводились в течение 20 дней при средней температуре воздуха +24°C в лабораторных условиях. В данных экспериментах гидрогель вносился в количестве 0,5 % от общей массы почвы, что способствовало ускоренному прорастанию семян и улучшению начальных стадий роста растений.

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых применению гидрогелей, вопросы их использования для восстановления деградированных пастбищных земель, особенно в условиях засушливых горных регионов, остаются недостаточно изученными. В этой связи актуальной задачей является разработка эффективных технологий, направленных на повышение продуктивности деградированных почв и устойчивости пастбищных экосистем.

Целью настоящего исследования является оценка эффективности применения seed-ball технологий, модифицированных гидрогелем и углеродсодержащими добавками, для восстановления деградированных пастбищных земель и повышения устойчивости растительности в условиях климатического стресса.

Материалы и методы исследований

Для проведения эксперимента были отобраны образцы малопродуктивной почвы. Почвенные пробы высушивали в лабораторных условиях при температуре +24 °С до воздушно-сухого состояния. После высушивания почву измельчали и просеивали через

сито с диаметром ячеек 2 мм для получения однородной фракции и удаления крупных почвенных агрегатов и растительных остатков.

Подготовленную почву использовали в качестве основы для формирования seed-ball. В соответствии с экспериментальной схемой в почвенную смесь вносили гидрогель, компост, полученный из пищевых отходов, активированный уголь из рисовой шелухи (RHAC), а также комплекс жидких минеральных удобрений. Компоненты тщательно гомогенизировали до получения равномерной пластичной массы.

Гидрогель добавляли в количестве 0,5 % от общей массы почвенной смеси, используемой для формирования seed-ball. В центральную часть каждого seed-ball помещали по три семени красного райграса (*Lolium multiflorum*). Сформированные гранулы размещали на поверхности почвы, предварительно помещённой в пластиковые контейнеры (рис. 1).

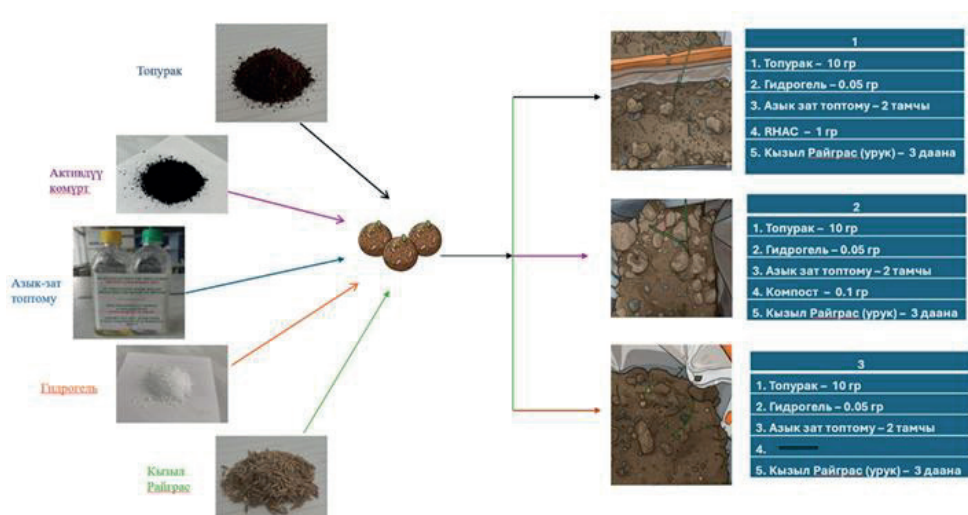


Рис. 1. – Схема подготовки seed-balls в эксперименте

Эксперимент проводили в трёхкратной повторности для каждого варианта. В течение 30 суток поддерживали контролируемый режим увлажнения: влажность почвы регулировали в диапазоне 15-50 % посредством регулярного полива.

Результаты исследования

Результаты исследования выявили статистически значимые различия морфофизиологических показателей растений в зависимости от экспериментального варианта. В варианте HG + RHAC общая биомасса растений превышала контроль в 1,15 раза, тогда как длина корневой системы увеличивалась в 1,5 раза. Полученные данные

свидетельствуют о синергетическом эффекте совместного применения гидрогеля и активированного угля из рисовой шелухи. Вероятно, данный эффект обусловлен способностью гидрогеля аккумулировать и постепенно высвобождать влагу, создавая стабильный водный режим в ризосфере, в сочетании с положительным влиянием RHAC на структурное состояние почвы, её аэрацию и доступность элементов питания.

В варианте HG+компост прирост биомассы составил 2,29 раза по сравнению с контролем, а длина надземной части увеличилась на 3,5 см. Усиление роста, вероятно, связано с высоким содержанием органического вещества в компосте, что способствует улучшению агрохимических свойств почвы, активизации микробиологических процессов и повышению доступности макро- и микроэлементов для растений.

В варианте с внесением только гидрогеля наблюдалось формирование двух проростков из одного seed-ball, однако средняя длина побегов оказалась на 3,1 см меньше по сравнению с контролем (рис. 2). Это указывает на то, что улучшение водоудерживающей способности субстрата само по себе не обеспечивает максимального роста при ограниченной обеспеченности элементами питания. Следовательно, гидрогель преимущественно регулирует водный режим, но не компенсирует дефицит питательных веществ.



Рис. 2. – Рост проростков на 25-сутки

Полученные результаты согласуются с данными ранее опубликованных исследований, демонстрирующих, что применение гидрогелей способствует ускоренному развитию корневой системы и повышению темпов роста растений за счёт стабилизации водного режима почвы [2].

В целом установлено, что вариант HG+RHAC создаёт наиболее благоприятные условия для формирования развитой корневой системы и накопления биомассы, что позволяет рассматривать его как оптимальный среди исследованных комбинаций. Совместное

использование гидрогеля и углеродсодержащих почвенных добавок представляет собой перспективный подход к ремедиации и восстановлению деградированных и засушливых пастбищных экосистем, обеспечивая повышение плодородия почвы и устойчивости кормовой продуктивности в условиях климатического стресса.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают эффективность применения гидрогель-модифицированных seed-ball технологий для улучшения начальных стадий роста растений в условиях ограниченной влагообеспеченности. Наиболее выраженный положительный эффект наблюдался в варианте HG+RHAC, где отмечалось увеличение длины корневой системы в 1,5 раза и рост общей биомассы растений в 1,15 раза по сравнению с контрольным вариантом. Вероятно, это связано с синергетическим действием гидрогеля и активированного угля из рисовой шелухи.

Гидрогели обладают высокой водоудерживающей способностью, что позволяет им аккумулировать значительные объёмы влаги и постепенно высвобождать её в почвенную среду. Это способствует стабилизации водного режима в зоне корнеобитаемого слоя почвы и снижению стрессового воздействия засухи на растения. Аналогичные результаты были получены в ряде исследований, где применение гидрогелей приводило к улучшению водного баланса почвы, повышению прорастания семян и ускоренному развитию корневой системы растений.

Дополнительный положительный эффект в варианте HG+RHAC может быть обусловлен улучшением физико-химических свойств почвы. Активированный уголь из растительного сырья обладает развитой пористой структурой и высокой сорбционной способностью, благодаря чему он способен улучшать аэрацию почвы, увеличивать её влагоёмкость и адсорбировать питательные элементы, делая их более доступными для растений. В результате формируется более благоприятная ризосферная среда для роста растений.

В варианте HG+компост наблюдалось значительное увеличение надземной биомассы растений. Компост является источником органического вещества и питательных элементов, что способствует активизации микробиологических процессов в почве и улучшению её агрохимических свойств. Это, в свою очередь, стимулирует рост растений и повышает их продуктивность.

Вместе с тем результаты показали, что применение только гидрогеля без дополнительных источников питательных веществ не обеспечивает максимального роста растений. Несмотря на улучшение водообеспеченности субстрата, длина побегов в данном варианте оказалась меньше по сравнению с контролем. Это свидетельствует о

том, что для полноценного развития растений необходимо комплексное улучшение как водного, так и питательного режима почвы.

Таким образом, сочетание гидрогеля с углеродсодержащими и органическими добавками позволяет создать оптимальные условия для роста растений на ранних стадиях развития. Полученные результаты согласуются с современными исследованиями, которые рассматривают гидрогели как перспективный инструмент повышения устойчивости агроэкосистем к засухе и деградации почв.

Особую значимость данная технология приобретает для регионов с засушливым климатом и ограниченными земельными ресурсами, к которым относится Кыргызская Республика. Применение гидрогель-модифицированных seed-ball технологий может способствовать восстановлению деградированных пастбищных земель, повышению продуктивности кормовой растительности и улучшению экологической устойчивости агроландшафтов.

Заключение

Проведённое исследование показало, что применение seed-ball технологий, модифицированных гидрогелем и органическими почвенными добавками, может существенно улучшать условия прорастания семян и раннего развития растений на деградированных почвах.

Наиболее эффективным оказался вариант HG+RHAC, в котором наблюдалось значительное улучшение морфологических показателей растений, включая увеличение длины корневой системы и общей биомассы. Синергетическое действие гидрогеля и активированного угля способствует стабилизации водного режима почвы, улучшению её структуры и повышению доступности питательных веществ для растений.

Результаты исследования также показали, что применение только гидрогеля без дополнительных источников органического вещества и питательных элементов ограничивает потенциал роста растений. Это подтверждает необходимость комплексного подхода к восстановлению деградированных почв, включающего сочетание водоудерживающих материалов и органических почвенных добавок.

Полученные данные свидетельствуют о высоком потенциале гидрогель-модифицированных seed-ball технологий для восстановления деградированных и засушливых пастбищных земель. Их использование может способствовать повышению устойчивости агроэкосистем к климатическому стрессу, улучшению продуктивности кормовой растительности и более эффективному использованию водных ресурсов.

Таким образом, разработанная технология представляет собой перспективный инструмент для устойчивого управления пастбищными экосистемами и восстановления деградированных земель в условиях аридных и полуаридных регионов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Adjuik, Toby A., et al. "Biodegradability of Bio-based and Synthetic Hydrogels as Sustainable Soil Amendments: A Review." *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 140, no. 12, Mar. 2023, <https://doi.org/10.1002/app.53655>.
2. Alsubaie, Faisal S., et al. "Development of Eco-Friendly Date Palm Biomass-Based Hydrogels for Enhanced Water Retention in Soil." *Gels*, vol. 11, no. 5, May 2025, p. 349, <https://doi.org/10.3390/gels11050349>.
3. de Fraiture, Charlotte, and Dennis Wichelns. "Satisfying Future Water Demands for Agriculture." *Agricultural Water Management*, vol. 97, no. 4, 2010, pp. 502–11, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.008>.
4. Dhiman, Ankita, et al. "Biodegradable Dual Stimuli Responsive Alginate Based Microgels for Controlled Agrochemicals Release and Soil Remediation." *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 228, 2023, pp. 323–32, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.225>.
5. George, Timothy S., et al. "Phosphorus in Soils and Plants – Facing Phosphorus Scarcity." *Plant and Soil*, vol. 401, nos. 1–2, Apr. 2016, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2846-9>.
6. Hosseinzadeh, B., and M. Ahmadi. "Degradable Hydrogels: Design Mechanisms and Versatile Applications." *Materials Today Sustainability*, vol. 23, Sep. 2023, p. 100468, <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100468>.
7. Piccoli, Ilaria, et al. "Hydrogels for Agronomical Application: From Soil Characteristics to Crop Growth: A Review." *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 44, no. 2, Apr. 2024, p. 22, <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00958-4>.
8. Rosa, Lorenzo, et al. "Global Agricultural Economic Water Scarcity." *Science Advances*, vol. 6, no. 18, May 2020, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz6031>.
9. Smagin, A. V., et al. "Biodestruction of Strongly Swelling Polymer Hydrogels and Its Effect on the Water Retention Capacity of Soils." *Eurasian Soil Science*, vol. 47, no. 6, Jun. 2014, pp. 591–97, <https://doi.org/10.1134/S1064229314060088>.

10. Walker, D. B., et al. "Surface Water Pollution." *Environmental and Pollution Science*, Elsevier, 2019, pp. 261–92, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00016-1>.
11. WICHTERLE, O., and D. LÍM. "Hydrophilic Gels for Biological Use." *Nature*, vol. 185, no. 4706, Jan. 1960, pp. 117–18, <https://doi.org/10.1038/185117a0>.
12. Zhang, Jiawang, et al. "Dynamic Changes in Soil Erosion and Challenges to Grain Productivity in the Black Soil Region of Northeast China." *Ecological Indicators*, vol. 171, 2025, p. 113145, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113145>.
13. FAOSTAT (2018) Pesticides Use. In: FAO. <https://www.fao.org/documents/card/en?details=cb3411en> (accessed 14/02/2024)
14. Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin M, Pennock D (2018) Soil pollution: a hidden reality. FAO, Rome. <https://www.fao.org/3/I9183EN/i9183en.pdf> (accessed 14/02/2024)
15. United Nations (2019) World Population Prospects 2019: Press Release. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_10KeyFindings.pdf (accessed 14/02/2024)

REFERENCES

1. Adjuik, Toby A., et al. "Biodegradability of Bio-based and Synthetic Hydrogels as Sustainable Soil Amendments: A Review." *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 140, no. 12, Mar. 2023, <https://doi.org/10.1002/app.53655>.
2. Alsubaie, Faisal S., et al. "Development of Eco-Friendly Date Palm Biomass-Based Hydrogels for Enhanced Water Retention in Soil." *Gels*, vol. 11, no. 5, May 2025, p. 349, <https://doi.org/10.3390/gels11050349>.
3. de Fraiture, Charlotte, and Dennis Wichelns. "Satisfying Future Water Demands for Agriculture." *Agricultural Water Management*, vol. 97, no. 4, 2010, pp. 502–11, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.008>.
4. Dhiman, Ankita, et al. "Biodegradable Dual Stimuli Responsive Alginate Based Microgels for Controlled Agrochemicals Release and Soil Remediation." *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 228, 2023, pp. 323–32, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.225>.
5. George, Timothy S., et al. "Phosphorus in Soils and Plants – Facing Phosphorus Scarcity." *Plant and Soil*, vol. 401, nos. 1–2, Apr. 2016, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2846-9>.
6. Hosseinzadeh, B., and M. Ahmadi. "Degradable Hydrogels: Design Mechanisms and Versatile Applications." *Materials Today*

Sustainability, vol. 23, Sep. 2023, p. 100468, <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100468>.

7. Piccoli, Ilaria, et al. "Hydrogels for Agronomical Application: From Soil Characteristics to Crop Growth: A Review." *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 44, no. 2, Apr. 2024, p. 22, <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00958-4>.

8. Rosa, Lorenzo, et al. "Global Agricultural Economic Water Scarcity." *Science Advances*, vol. 6, no. 18, May 2020, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz6031>.

9. Smagin, A. V., et al. "Biodestruction of Strongly Swelling Polymer Hydrogels and Its Effect on the Water Retention Capacity of Soils." *Eurasian Soil Science*, vol. 47, no. 6, Jun. 2014, pp. 591–97, <https://doi.org/10.1134/S1064229314060088>.

10. Walker, D. B., et al. "Surface Water Pollution." *Environmental and Pollution Science*, Elsevier, 2019, pp. 261–92, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00016-1>.

11. WICHTERLE, O., and D. LÍM. "Hydrophilic Gels for Biological Use." *Nature*, vol. 185, no. 4706, Jan. 1960, pp. 117–18, <https://doi.org/10.1038/185117a0>.

12. Zhang, Jiawang, et al. "Dynamic Changes in Soil Erosion and Challenges to Grain Productivity in the Black Soil Region of Northeast China." *Ecological Indicators*, vol. 171, 2025, p. 113145, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113145>.

13. FAOSTAT (2018) Pesticides Use. In: FAO. <https://www.fao.org/documents/card/en?detail=cb3411en> (accessed 14/02/2024)

14. Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin M, Pennock D (2018) Soil pollution: a hidden reality. FAO, Rome. <https://www.fao.org/3/I9183EN/i9183en.pdf> (accessed 14/02/2024)

15. United Nations (2019) World Population Prospects 2019: Press Release. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_10KeyFindings.pdf (accessed 14/02/2024)

Информация об авторах

У.С. Чубак – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет «Манас», Бишкек, Кыргызстан;

Э.У. Бурханова – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет «Манас», Бишкек, Кыргызстан;

Н.Н. Абдикалилов – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет «Манас», Бишкек, Кыргызстан;

С.Т. Умарова – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет «Манас», Бишкек, Кыргызстан;

Н.В. Суханова – доктор биологических наук, зав. каф. биоэкологии и биологического образования, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы;

Н.Э. Тотубаева – доктор биологических наук, доцент, Кыргызско-Турецкий университет «Манас», Бишкек, Кыргызстан.

Information about the authors

U.S. Chubak – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

E.U. Burkhanova – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

N.N. Abdikalilov – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

S.T. Umarova – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

N.V. Sukhanova – doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Bioecology and Biological Education, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla;

N.E. Totubaeva – doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan.

Вклад авторов

Н.Н. Абдикалилов – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи, анализ данных и визуализация;

Э.У. Бурханова – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

У. С. Чубак – сбор данных и эксперименты;

С.Т. Умарова – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

Н.В. Суханова – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

Н.Э. Тотубаева – концепция и проектирование исследования, сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author contributions

N.N. Abdikalilov – data collection and experiments, manuscript preparation, data analysis and visualization, manuscript preparation;

E.U. Burkhanova – data collection and experiments, manuscript preparation;

U.S. Chubak – data collection and experiments;

S.T. Umarova – data collection and experiments, manuscript preparation;

N.V. Sukhanova – data collection and experiments, manuscript preparation;

N.E. Totubaeva – study concept and design, data collection and experiments, manuscript preparation.

The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; принята к публикации 29.06.2026.

The article was submitted 12.05.2026; accepted for publication 29.06.2026.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 372.891

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-20-27

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ПРЕПОДАВАНИЯ БИОХИМИИ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ БИОЛОГИИ В ПОДГОТОВКЕ БУДУЩИХ УЧИТЕЛЕЙ БИОЛОГИИ

**Марал Акылбековна Абдрахманова¹, Бибигуль Кабылбековна
Жумабекова²**

^{1,2} Павлодарский педагогический университет имени Элкей
Марғұлан, Павлодар, Казахстан,
abdrakhmanova_202002@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается применение педагогического метода моделирования для повышения эффективности преподавания биохимии и молекулярной биологии при подготовке будущих учителей биологии. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения качества подготовки студентов в условиях практико-ориентированного обучения. Традиционные методы, несмотря на их распространённость, не всегда обеспечивают достаточный уровень вовлечённости студентов и формирования у них практических навыков. Современные требования к образованию предполагают не только передачу знаний, но и развитие у студентов аналитического мышления, способности к самостоятельному осмыслению материала и применению полученных знаний на практике. В работе выделены ключевые проблемы традиционного обучения, такие как преобладание теоретического материала над практическим, недостаточная наглядность при объяснении сложных биохимических и молекулярных процессов. Эти факторы снижают эффективность усвоения материала и усложняют формирование профессиональных компетенций. Для проверки эффективности моделирования в качестве педагогического метода был проведён педагогический эксперимент с участием студентов Павлодарского педагогического университета имени Элкей Марғұлан, обучающихся по образовательной программе «Биология». В исследовании приняли участие две группы: контрольная и экспериментальная. В контрольной группе занятия проводились в традиционном формате, а в экспериментальной группе использовались предметные (материальные), информационные (знаковые), игровые виды моделирования. В ходе эксперимента анализировались такие

показатели, как усвоение теоретического материала, развитие когнитивных навыков (аналитических и практических), а также мотивация и вовлечённость студентов в учебный процесс. Результаты показали, что применение моделирования способствует более глубокому пониманию сложных биохимических и молекулярных процессов, повышает интерес к изучаемому предмету и активизирует познавательную деятельность студентов. Экспериментальная группа продемонстрировала более высокий уровень самостоятельности, лучше выполняла практические задания и эффективнее применяла теоретические знания в учебной и профессиональной деятельности. Кроме того, моделирование позволяет оптимизировать учебное время, повысить наглядность материала и частично компенсировать недостатки лабораторных занятий. Таким образом, результаты исследования подтверждают, что моделирование является эффективным педагогическим инструментом, способствующим повышению качества подготовки будущих учителей биологии. Рекомендуется более широкое внедрение данного метода в образовательный процесс.

Ключевые слова: моделирование, биохимия и молекулярная биология, подготовка учителей, когнитивные навыки, практико-ориентированное обучение, учебный процесс, педагогическая методика

Для цитирования: Абдрахманова М.А., Жумабекова Б.К. Моделирование как инструмент решения проблем преподавания биохимии и молекулярной биологии в подготовке будущих учителей биологии // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №2. С. 20–27.

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

MODELING AS A TOOL FOR SOLVING THE PROBLEMS OF TEACHING BIOCHEMISTRY AND MOLECULAR BIOLOGY IN THE TRAINING OF FUTURE BIOLOGY TEACHERS

Maral Akylbekovna Abdrakhmanova¹, Bibigul Kabylbekovna Zhumabekova²

^{1,2}Pavlodar Pedagogical University Alkey Margulan, Pavlodar, Kazakhstan, abdrakhmanova_202002@mail.ru

Abstract. The article discusses the application of the pedagogical modeling method to improve the effectiveness of teaching biochemistry and

molecular biology in the training of future biology teachers. The relevance of the research is due to the need to improve the quality of student training in a practice-oriented learning environment. Traditional methods, despite their prevalence, do not always provide a sufficient level of student engagement and the formation of practical skills. Modern educational requirements imply not only the transfer of knowledge, but also the development of students' analytical thinking, the ability to independently comprehend the material and apply the acquired knowledge in practice. The paper highlights the key problems of traditional teaching, such as the predominance of theoretical material over practical, insufficient visibility in explaining complex biochemical and molecular processes. These factors reduce the effectiveness of learning the material and complicate the formation of professional competencies. To test the effectiveness of modeling as a pedagogical method, a pedagogical experiment was conducted with the participation of students of Pavlodar Pedagogical University studying under the educational program "Biology". The study involved two groups: a control group and an experimental group. In the control group, classes were conducted in a traditional format, while in the experimental group, subject (material), informational (symbolic), and game types of modeling were used. During the experiment, such indicators as the assimilation of theoretical material, the development of cognitive skills (analytical and practical), as well as the motivation and involvement of students in the educational process were analyzed. The results showed that the use of modeling contributes to a deeper understanding of complex biochemical and molecular processes, increases interest in the subject and activates the cognitive activity of students. The experimental group demonstrated a higher level of independence, performed practical tasks better, and applied theoretical knowledge more effectively in their academic and professional activities. In addition, modeling allows you to optimize study time, increase the visibility of the material and partially compensate for the disadvantages of laboratory classes. Thus, the results of the study confirm that modeling is an effective pedagogical tool that helps improve the quality of training for future biology teachers. A wider implementation of this method in the educational process is recommended.

Key words: modeling, biochemistry and molecular biology, teacher training, cognitive skills, practice-oriented learning, educational process, pedagogical methodology

For citation: Abdrakhmanova M.A., Zhumabekova B.K. Modeling as a tool for solving problems of teaching biochemistry and molecular biology in the training of future biology teachers // Bulletin of the Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla. Series: Natural Sciences. 2026. No2. pp. 20–27.

Современная подготовка будущих учителей биологии требует сочетания теоретических знаний и практических навыков, что особенно важно при изучении биохимии и молекулярной биологии [1]. Проблема в том, что традиционные методы обучения, основанные на лекциях и демонстрациях, не всегда обеспечивают наглядность, активное участие студентов и развитие их аналитических способностей [2]. Изучая работы по данной теме, можно сделать вывод, что применение моделирования в образовательном процессе позволяет визуализировать сложные биохимические реакции и молекулярные механизмы, повышает эффективность лабораторных занятий и способствует формированию познавательных навыков учащихся [3, 4]. В частности, моделирование стимулирует развитие критического и аналитического мышления, навыков интерпретации данных, установления причинно-следственных связей и практического применения теоретических знаний [5]. Обзор литературы показал, что в педагогической практике моделирование широко используется для решения проблемы нехватки времени на практические занятия, повышения мотивации учащихся и формирования навыков самостоятельной работы [6, 7]. Моделирование образования в педагогическом контексте также способствует преодолению разрыва между теорией и практикой путем создания интерактивной учебной среды [8]. В рамках данного исследования мы стремимся выяснить, насколько эффективно применение различных методов моделирования способствует усвоению дисциплины «Биохимия и молекулярная биология» студентами, будущими педагогами 4 курса. Помимо оценки результативности самого подхода, мы также планируем определить, какие именно профессиональные компетенции и познавательные способности будут формироваться и совершенствоваться у студентов в процессе такой работы. Для достижения цели последовательно выполнялись следующие задачи. Во-первых, для сравнительного анализа результатов обучения был проведен педагогический эксперимент с двумя группами студентов (экспериментальной и контрольной). Во-вторых, дана оценка уровня усвоения теоретического материала и развития навыков, которые способствуют решению проблем в сфере подготовки будущих специалистов. В-третьих, было проанализировано развитие аналитического и критического мышления, а затем проведено сравнение данных между группами. В-четвертых, изучалось влияние моделирования на учебную мотивацию студентов и эффективность использования учебного времени. Таким образом, решение этих задач позволило всесторонне оценить предложенную методику, ее влияние на качество подготовки студентов и практическую значимость для образовательного процесса.

Для достижения целей исследования был проведен семестровый эксперимент со студентами 4 курса Павлодарского педагогического университета имени Әлкей Марғұлан. Всего в исследовании приняли участие 50 студентов. Основной целью эксперимента была оценка эффективности использования метода моделирования в обучении биохимии и молекулярной биологии. В ходе урока были использованы различные виды моделирования. Среди них предметные (материальные) модели, позволяющие наглядно представить молекулы и процессы; информационные (символические) модели, включающие схемы, графики и компьютерное моделирование; а также игровые модели, привлекающие учащихся к исследовательским и проблемным ситуациям. Такой комплексный подход обеспечил развитие аналитического и критического мышления, формирование практических навыков работы в лаборатории, а также активное вовлечение студентов в учебный процесс. Для оценки результатов было использовано несколько методов: наблюдение за деятельностью учащихся во время практических занятий и лабораторных работ, тестирование для проверки усвоения теоретического материала, выполнение практических заданий, оценивающих лабораторные навыки, а также анкетирование, позволяющее определить мотивацию и уровень наглядности материала. Применение метода моделирования позволило не только глубже понять биохимические и молекулярные процессы, но и повысить вовлеченность учащихся в учебный процесс, развить познавательные навыки, улучшить практическую подготовку и рационально использовать учебное время.

Результаты показали, что использование моделирования значительно улучшает понимание сложных биохимических и молекулярных процессов. Студенты активно выполняли практические задания, показали уверенное владение лабораторным оборудованием и навыками проведения экспериментов. Анализ анкеты показал, что метод моделирования повысил мотивацию учащихся, сделал занятия более интересными и наглядными, а также способствовал рациональному использованию учебного времени (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение показателей усвоения учебного материала и развития когнитивных навыков у студентов

Показатели	До эксперимента	После эксперимента
Повышение понимания биохимических процессов (%)	62 %	85 %
Улучшение практических навыков (%)	58 %	25 %

Развитие аналитического мышления	Средний	Высокий
Развитие критического мышления	Средний	Высокий
Мотивация и вовлечённость	Средняя	Высокая
Восприятие наглядности материала	Низкая	Высокая

Результаты проведенного семестрового эксперимента подтвердили первоначальную гипотезу: использование метода моделирования повышает качество обучения биохимии и молекулярной биологии. Данные показали, что студенты, участвовавшие в занятиях с применением метода моделирования, лучше усваивали теоретический материал и проявляли более высокий уровень развития когнитивных навыков – аналитического и критического мышления, умения обобщать информацию и применять знания на практике. Эти результаты соответствуют современным исследованиям, где отмечается способность моделирования улучшению понимания сложных процессов и увеличению вовлеченности студентов [1, 2].

Метод моделирования также оказался эффективным инструментом для преодоления проблем традиционного обучения: ограниченного времени на практику, недостатка наглядности и перегруженности теоретическим материалом. Студенты отмечали, что использование визуальных моделей, интерактивных схем и игровых элементов повышало интерес к предмету и помогало лучше усваивать сложные концепции. Кроме того, применение различных видов моделирования предметного, информационного и игрового – позволило развивать не только профессиональные навыки, но и когнитивные умения, такие как способность к логическому анализу, синтезу информации и самостоятельному принятию решений в учебной деятельности. Эксперимент показал, что такие подходы создают условия для более глубокой и осознанной подготовки будущих учителей биологии, формируя у них готовность применять инновационные методики в собственной педагогической практике. Также было отмечено будущими учителями биологии, что в ходе производственной практики в стенах школы они активно применяют метод моделирования для объяснения тем.

В ходе исследования данной темы эксперимент показал, что моделирование является эффективным инструментом для развития когнитивных и профессиональных навыков студентов педагогических направлений. Метод позволяет решать ключевые проблемы традиционного обучения: недостаток практических занятий, низкую

наглядность и ограниченность времени. Применение таких подходов позволяет улучшить образовательный процесс, создать обучение визуальный и ориентированный на опыт, и студенты более мотивированными и готовы к профессиональной деятельности.

На основе полученных данных рекомендуется внедрять моделирование как регулярную методику в подготовку будущих учителей биологии, а также использовать разнообразные виды моделирования – предметные, информационные игровые – для повышения вовлечённости и развития аналитического мышления. В дальнейших исследованиях целесообразно рассмотреть влияние моделирования на групповую работу, дистанционное обучение и формирование междисциплинарных навыков. Применение таких подходов позволит улучшить образовательный процесс, сделать обучение более наглядным и практико-ориентированным, а студентов – более мотивированными и готовыми к профессиональной деятельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Левина М.А. Современные методы обучения биохимии. – М.: Педагогика, 2020. – 256 с.
2. Петров С.В., Коваленко Н.И. Интерактивные методы преподавания молекулярной биологии. – СПб.: Наука, 2019. – 178 с.
3. Johnson D.W., Johnson R.T. Cooperative Learning in Higher Education. – New York: Routledge, 2021. – 350 p.
4. Novak J.D., Cañas A.J. The Theory Underlying Concept Maps and How to Construct and Use Them. – Florida: IHMC, 2018. – 210 p.
5. Bruner J. The Process of Education. – Cambridge: Harvard University Press, 2016. – 192 p.
6. Shavelson R.J. Measuring College Student Learning in Science. – New York: Springer, 2019. – 280 p.
7. Alessi S.M., Trollip S.R. Multimedia for Learning: Methods and Development. – Boston: Pearson, 2017. – 300 p.
8. Mayer R.E. Multimedia Learning. – Cambridge: Cambridge University Press, 2020. – 320 p.

REFERENCES

1. Levina M.A. Sovremennyye metody obucheniya biohimii [Modern methods of teaching biochemistry]. – M.: Pedagogika, 2020. – 256s.
2. Petrov S.V., Kovalenko N.I. Interaktivnyye metody prepodavaniya molekulyarnoy biologii [Interactive methods of teaching molecular biology]. – SPb.: Nauka, 2019. – 178 s.

3. Johnson D.W., Johnson R.T. Cooperative Learning in Higher Education. – New York: Routledge, 2021. – 350 p.
4. Novak J.D., Cañas A.J. The Theory Underlying Concept Maps and How to Construct and Use Them. – Florida: IHMC, 2018. – 210 p.
5. Bruner J. The Process of Education. – Cambridge: Harvard University Press, 2016. – 192 p.
6. Shavelson R.J. Measuring College Student Learning in Science. – New York: Springer, 2019. – 280 p.
7. Alessi S.M., Trollip S.R. Multimedia for Learning: Methods and Development. – Boston: Pearson, 2017. – 300 p.
8. Mayer R.E. Multimedia Learning. – Cambridge: Cambridge University Press, 2020. – 320 p.

Информация об авторах

М.А. Абдрахманова – магистрант;

Б.К. Жумабекова – доктор биологических наук, профессор-исследователь.

Information about the authors

М.А. Abdrakhmanova – Master's Degree student;

В.К. Zhumabekova – Doctor of Science (Biology), research professor.

Вклад авторов

М.А. Абдрахманова – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

Б.К. Жумабекова – концепция и проектирование исследования, сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author contributions

М.А. Abdrakhmanova – data collection and experiments, manuscript preparation;

В.К. Zhumabekova – research concept and design, data collection and experiments, manuscript preparation.

The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 26.04.2026; принята к публикации 29.05.2026.

The article was submitted 26.04.2026; accepted for publication 29.05.2026.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 502.3/.7

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-28-42

СИСТЕМЫ SEED-BALL НА ОСНОВЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ И ВОДОРОСЛЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ПОЧВ: БАЛАНС МЕХАНИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ

Элизабет Усеновна Бурханова¹, Уулу Сыргак Чубак², Нурбол Нурланович Абдикалилов³, Севархон Тахировна Умарова⁴, Наталья Викторовна Суханова⁵, Нурзат Эрмековна Тотубаева⁶

^{1,2,3,4,6} Кыргызско-Турецкий университет «Манас», Бишкек, Кыргызстан nurzat.totubaeva@manas.edu.kg

⁵ Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Уфа, Россия, n_suhanova@mail.ru

Аннотация. Биологические почвенные корки (биокорки), образованные цианобактериями, микроводорослями, лишайниками и мхами, играют важную роль в функционировании засушливых и деградированных экосистем. Они способствуют стабилизации поверхности почвы, предотвращению эрозии, фиксации атмосферного азота, накоплению органического вещества и улучшению водного режима. В данном исследовании оценивалась возможность формирования искусственных биокорок с использованием агрегатов из seed-ball («семенных шариков»), инокулированных культурами *Chlorella* sp., *Oscillatoria* sp. и *Nostoc* sp. Агрегаты диаметром 2,5 см были сформированы из стерильной деградированной почвы с добавлением компоста и семян многолетних трав. Инкубация проводилась в лабораторных условиях при контролируемой влажности (15–20%) и динамическом фотопериоде в течение четырех недель. В ходе эксперимента более 90% агрегатов сохранили механическую стабильность, что указывает на высокую структурную прочность сформированной матрицы. Однако активной колонизации цианобактерий, выраженного образования биопленки или прорастания семян не наблюдалось. В контрольном варианте с поверхностным размещением семян всхожесть составила 20%, что указывает на ограниченную гидратацию и газообмен внутри структуры семенного шара. Результаты показывают, что высокая механическая стабильность системы не гарантирует ее биологическую функциональность и

успешное инициирование процессов восстановления почвы. Для повышения эффективности технологий «семенных шаров» при создании искусственных биопокровов рекомендуется оптимизировать водный режим, вводить гидрогели и биополимерные связующие, увеличивать период инкубации и использовать экологически адаптированные штаммы цианобактерий и водорослей. Таким образом, восстановление деградированных земель требует комплексной интеграции инженерных решений и биологических механизмов, обеспечивающих не только структурную стабильность, но и активность микробных сообществ.

Ключевые слова: биологическая почвенная корка, цианобактерии, микроводоросли, фиксация азота, Seed-Ball, «семенной шар», биогеохимические процессы

Для цитирования: Бурханова Э.У., Чубак У.С., Абдикалилов Н., Умарова С.Т., Суханова Н.В., Тотубаева Н.Э. Системы seed-ball на основе цианобактерий и водорослей для восстановления деградированных почв: баланс механической стабильности и биологической функциональности // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №2. С. 28-42.

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

SEED-BALL SYSTEMS BASED ON CYANOBACTERIA AND ALGAE FOR RESTORING DEGRADED SOILS: BALANCE OF MECHANICAL STABILITY AND BIOLOGICAL FUNCTIONALITY

Elizabeth Usenovna Burkhanova¹, Uulu Syrgak Chubak², Nurbol Nurlanovich Abdikalilov³, Sevarkhon Tahirovna Umarova⁴, Natalya Viktorovna Sukhanova⁵, Nurzat Ermekovna Totubaeva⁶

*^{1,2,3,4,6} Kyrgyz-Turkish Manas University, Bishkek, Kyrgyzstan
nurzat.totubaeva@manas.edu.kg*

⁵ Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla, Ufa, Russia, n_suhanova@mail.ru

Abstract. Biological soil crusts (biocrusts) formed by cyanobacteria, microalgae, lichens, and mosses play a vital role in the functioning of arid and degraded ecosystems. They help stabilize the soil surface, prevent erosion, fix atmospheric nitrogen, accumulate organic matter, and improve water management. This study assessed the feasibility of forming artificial biocrusts using seed-ball aggregates inoculated with *Chlorella* sp., *Oscillatoria* sp., and *Nostoc* sp. Aggregates 2.5 cm in diameter were formed

from sterile degraded soil supplemented with compost and perennial grass seeds. Incubation was carried out in laboratory conditions at controlled humidity (15–20%) and a dynamic photoperiod for four weeks. Over the course of the experiment, more than 90% of the aggregates retained mechanical stability, indicating the high structural strength of the resulting matrix. However, active cyanobacterial colonization, significant biofilm formation, or seed germination were not observed. In the control variant with surface-placed seeds, germination was 20%, indicating limited hydration and gas exchange within the seedball structure. The results indicate that the high mechanical stability of the system does not guarantee its biological functionality or successful initiation of soil restoration processes. To improve the effectiveness of "seedball" technologies when creating artificial biosurfaces, it is recommended to optimize the water regime, introduce hydrogels and biopolymer binders, increase the incubation period, and use environmentally adapted strains of cyanobacteria and algae. Thus, the restoration of degraded lands requires a comprehensive integration of engineering solutions and biological mechanisms that ensure not only structural stability but also the activity of microbial communities.

Key words: biological soil crust, cyanobacteria, microalgae, nitrogen fixation, Seed-Ball, "seedball", biogeochemical processes.

For citation: Burkhanova E.U., Chubak U.S., Abdikalilov N., Umarova S.T., Sukhanova N.V., Totubaeva N.E. Seed-ball systems based on cyanobacteria and algae for the restoration of degraded soils: the balance of mechanical stability and biological functionality // Bulletin of the Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla. Series: Natural Sciences. 2026. No.2. pp. 28-42.

Введение

В последние десятилетия деградация почв признана одной из ключевых глобальных экологических угроз, напрямую влияющих на продовольственную безопасность, устойчивость экосистем и функционирование углеродно-азотного цикла [9, 11]. По оценкам международных организаций более 30 % мировых земель испытывают различные формы деградации, включая эрозию, вторичное засоление, уплотнение и потерю органического вещества. Антропогенные факторы, в т.ч. интенсивное земледелие, вырубка лесов, чрезмерный выпас, промышленное загрязнение – все это приводит к разрушению почвенной структуры, снижению микробного разнообразия и нарушению биогеохимических процессов [2]. В результате снижается способность почвы к саморегуляции, удержанию влаги и питательных элементов, что усиливает её уязвимость к климатическим экстремумам.

Восстановление функциональности деградированных почв рассматривается как приоритетная задача современной экологической биотехнологии и природно-ориентированных решений (nature-based solutions). Среди перспективных подходов особое внимание привлекает использование цианобактерий и водорослей для формирования биологических почвенных корок (biocrusts) [4, 12]. Биокорки представляют собой сложные консорциумы фотосинтетических прокариот, микроводорослей, грибов, мхов и лишайников, формирующие тонкий, но функционально значимый поверхностный слой почвы в аридных и полупустынных экосистемах.

Цианобактерии играют ключевую роль в первичной колонизации минерального субстрата. Нитчатые формы (например, *Oscillatoria* spp.) обеспечивают механическую стабилизацию почвенных частиц за счёт секреции экзополисахаридов (EPS), способствующих агрегации и формированию микроструктуры [14]. Гетероцистные формы (*Nostoc* spp.) фиксируют атмосферный азот, обогащая субстрат биологически доступными формами азота и стимулируя последующую микробную и растительную сукцессию [5]. Фотоавтотрофные микроорганизмы, включая *Chlorella* spp., способствуют накоплению органического углерода и формированию первичной трофической базы, запускающей развитие более сложных микробных сообществ.

В естественных условиях биокорки существенно уменьшают ветровую и водную эрозию, повышают водоудерживающую способность почвы, влияют на инфильтрацию и регулируют газообмен между почвой и атмосферой [6]. Более того, они играют важную роль в глобальном азотном балансе засушливых регионов, обеспечивая значительную долю биологической фиксации азота [8]. Благодаря этим функциям биокорки рассматриваются как природный механизм стабилизации деградированных ландшафтов. Однако большинство существующих исследований сосредоточено либо на естественной динамике биокорок, либо на прямом нанесении суспензий цианобактерий на поверхность почвы [13, 17]. Несмотря на положительные результаты в полевых условиях, такие подходы часто характеризуются низкой выживаемостью инокулята, зависимостью от осадков и высокой вариабельностью результатов. Инженерные методы локализованного формирования искусственных биокорок остаются относительно мало разработанными.

Технология seed-ball применяется для восстановления растительного покрова в засушливых условиях, обеспечивая механическую защиту семян и постепенную гидратацию. Интеграция цианобактерий и водорослей в структуру seed-ball потенциально может объединить два процесса: механическую стабилизацию субстрата и

раннюю биологическую активацию почвы. Такая система способна создавать микросреду, благоприятную для одновременного прорастания растений и формирования первичной биокорки.

Тем не менее, остаётся открытым вопрос: способны ли искусственно сформированные агрегаты инициировать процессы, характерные для ранних стадий биокорковой сукцессии? Особую сложность представляет возможный конфликт между механической стабильностью агрегата и необходимостью обеспечения газообмена, гидратации и светодоступности, критически важных для фотосинтетической активности микрофототрофов. Кроме того, в условиях стерильной почвы и контролируемой инкубации исключается синергетическое действие местных микробных сообществ, что может существенно влиять на результаты.

В связи с этим целью настоящего исследования является оценка возможности формирования искусственной биологической почвенной корки в системе seed-ball с использованием культур *Chlorella* sp., *Oscillatoria* sp. и *Nostoc* sp., а также выявление структурных и биологических ограничений данного подхода. Особое внимание уделяется анализу баланса между механической стабильностью агрегатов и ранней биологической активацией, определяющего потенциал применения цианобактериальных seed-ball систем в восстановлении деградированных почв.

Материалы и методы исследований

Сбор и подготовка почвы. Почва, подверженная высокой антропогенной нагрузке, была отобрана на территории кампуса Кыргызско-Турецкого университета “Манас” (42.83123, 74.5784) (рис. 1).

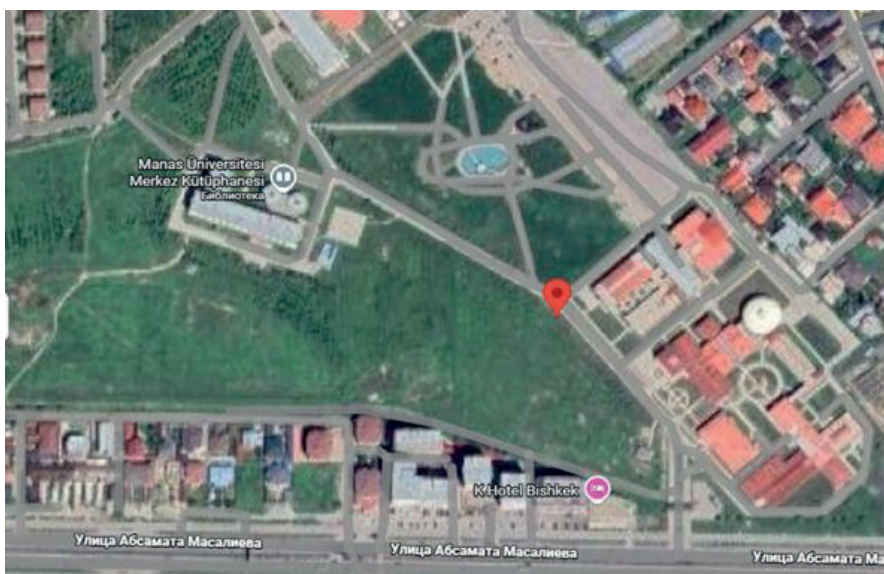


Рис.1. – Карта-схема местности отбора проб почвы

Почва характеризовалась низкой биологической активностью и высоким содержанием минерального субстрата, что делало её подходящей для моделирования деградированных условий. После сбора почва была высушена на воздухе в течение 48 ч (остаточная влажность <5 %) и стерилизована автоклавом при 120 °С, 1,5 атм в течение 1 ч. Стерильная почва позволила исключить влияние местных микробных сообществ и оценить независимую способность чистых культур цианобактерий и водорослей инициировать процессы формирования биокорки.

Выращивание цианобактерий и водорослей. Использовались чистые культуры: *Chlorella* sp., *Oscillatoria* sp., *Nostoc* sp. Культуры выращивались в стерильной среде Бристоль с составом на 1 л дистиллированной воды: NaNO_3 – 2,5 г, K_2HPO_4 – 0,175 г, KH_2PO_4 – 0,75 г, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,075 г, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,036 г, NaCl – 0,025 г, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,0132 г. Питательная среда была стерилизована автоклавом при 121 °С и 1,1 атм в течение 20 мин и остужена до комнатной температуры. Культуры инкубировались при комнатной температуре и динамическом фотопериоде (табл. 1).

Таблица 1

Условия инкубирования культур цианобактерий и водорослей

Показатель	Параметр
Температура	22-25 °С
Влажность	15-20 %
Световой режим	Динамический, дневной цикл: – Утро: 2-3 ч, $100\text{-}150 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – Полдень: 4-6 ч, $300\text{-}500 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – Вечер: 2-3 ч, $100\text{-}150 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – Ночь: 8-10 ч, 0
Продолжительность	4 недели

Формирование seed-ball агрегатов. Почва увлажнялась до 20 % водного содержания для достижения пластичности. Создавались три экспериментальные группы и контроль (табл. 2, рис. 2).

Таблица 2

Варианты / состав seed-ball агрегатов

1.	Цианобактерии + водоросли + компост	Стерильная почва + цианобактерии + водоросли (10 мл) + компост + семена <i>Lolium perenne</i> L.
2.	Только компост	Стерильная почва + компост + семена
3.	Только цианобактерии +	Стерильная почва +

	водоросли	цианобактерии + водоросли (10 мл) + семена
4.	Контроль	Семена на поверхности стерильной почвы

Каждый агрегат имел диаметр 2,5 см и массу 15-20 г, количество повторностей ≥ 5 . Агрегаты размещались на поверхности стерильного субстрата и инкубировались в лабораторных условиях с контролем влажности и температуры.

Контроль влажности и стрессовые циклы. Влажность поддерживалась на уровне 15-20 % с контролируемым орошением. Ежедневно проводились частичные дегидратационные циклы: снижение влажности до 10-12 % на 2-4 ч. в период максимальной световой нагрузки для стимуляции стресс-метаболизма цианобактерий и водорослей.

Мониторинг и оценка результатов. Параметры контроля включали:

- Структурная стабильность: ручное сжатие, Δ масса и деформация агрегатов (< 5 % массы, < 10 % деформация);
- Биологическая активность: наблюдение за колонизацией цианобактерий и водорослей (цвет, слизь, микроскопический осмотр);
- Всхожесть семян (%) по сравнению с контролем;
- Гидратация и газообмен: визуальные признаки трещин, налёта, слизи;
- Фотодокументация: каждые 2-3 дня для отслеживания изменений.

Результаты и обсуждение

Влияние структуры seed-ball на раннюю биологическую активацию. Полученные результаты демонстрируют выраженный структурно-функциональный дисбаланс: плотная матрица seed-ball обеспечивала высокую механическую устойчивость (> 90 % агрегатов сохраняли форму; Δ массы < 5 %), однако полностью подавляла раннюю биологическую активность. В течение четырех недель инкубации не наблюдалось ни визуальных признаков колонизации цианобактерий и водорослей (отсутствие слизистых налётов и пигментации), ни прорастания семян внутри агрегатов (рис. 2).

Данный эффект может быть объяснён сочетанием трёх факторов:

- ограниченная инфильтрация влаги в центральные слои агрегата;
- сниженная диффузия кислорода и CO_2 ;
- недостаточная светопроницаемость внутренней матрицы.

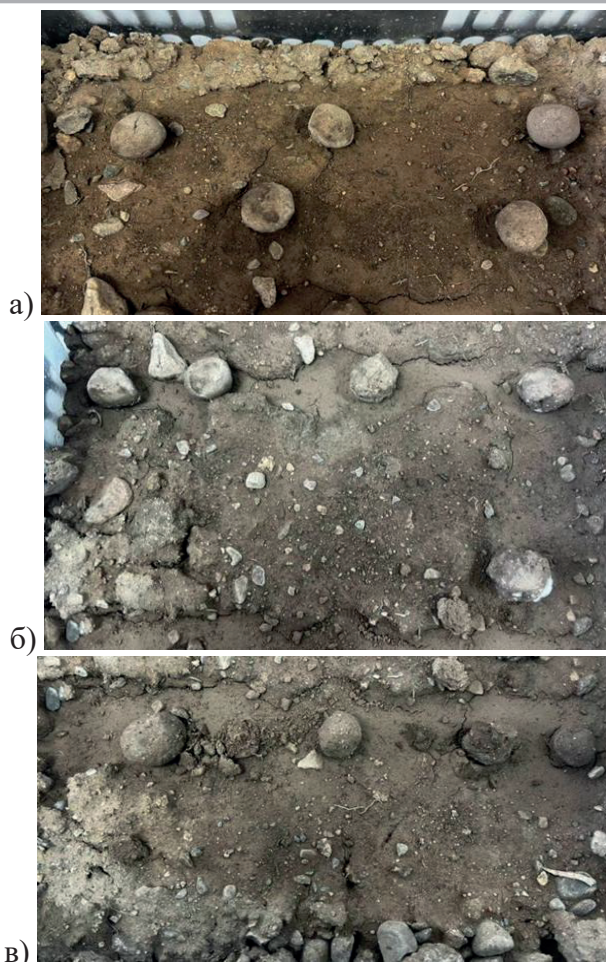


Рис.2. – Seed-ball агрегаты через 4 недели: а) 1 вариант
б) 2 вариант в) 3 вариант

Известно, что фотосинтетическая активность цианобактерий и синтез экзополисахаридов (EPS) напрямую зависят от циклической гидратации и эффективного газообмена [1, 7]. В естественных биокорках капиллярная структура поверхностного слоя обеспечивает быстрое увлажнение и столь же быстрое высыхание, что запускает метаболические циклы «активация–покой». В нашем эксперименте чрезмерная плотность агрегата, вероятно, блокировала формирование такого режима.

Интересно отметить, что высокая механическая стабильность сама по себе не коррелировала с функциональностью. Напротив, она, по-видимому, стала фактором ограничения. Это указывает на наличие инженерного компромисса: увеличение структурной целостности агрегата приводит к снижению его биологической проницаемости.

В полевых условиях подобные ограничения могут частично нивелироваться:

интенсивными дождевыми импульсами;
температурными колебаниями, вызывающими микротрещины;
действием аборигенных микробных консорциумов.

Однако в стерильной лабораторной системе данные компенсаторные механизмы отсутствовали, что позволило изолированно выявить влияние физической конфигурации агрегата.

Функциональная роль цианобактерий и ограничение EPS-продукции. Цианобактерии в природных биокорках выполняют не только фотосинтетическую, но и структурообразующую функцию. Нитчатые формы стабилизируют почвенные частицы за счёт выделения EPS, создавая сетчатую микроструктуру, тогда как гетероцистные формы обеспечивают биологическую фиксацию азота [5, 12].

В исследуемой системе присутствие *Chlorella* sp., *Oscillatoria* sp. и *Nostoc* sp. не привело к формированию визуально различимой биоплёнки или агрегатной модификации поверхности. Это свидетельствует о том, что:

начальная гидратация была недостаточной для активации фотосинтетического аппарата;

внутренняя световая интенсивность агрегата была ниже пороговой для устойчивой фотосинтетической продукции;

стрессовые сигналы (UV, циклы высыхания), стимулирующие EPS-секрецию, были ограничены.

Важно подчеркнуть, что биологическая функциональность seed-ball не определяется лишь присутствием инокулята. Необходима оптимальная комбинация:

пористости,
влагоудерживающей способности,
светового режима,
времени инкубации,
микробных взаимодействий.

Таким образом, проблема носит не биологический, а биофизический характер: матрица не обеспечила условия для перехода цианобактерий и водоросли из латентного состояния к активной фазе роста [3, 10].

Всхожесть семян и микросреда агрегата. Всхожесть семян внутри seed-ball агрегатов составила 0 %, тогда как в контрольном варианте (поверхностное размещение) достигла 20 %. Этот контраст подчёркивает роль физического барьера, создаваемого плотной матрицей. Таким образом, прорастание семян требует:

достаточного водопоглощения (imbibition),

доступа кислорода,
механического пространства для развития проростка.

Плотная структура агрегата, вероятно, ограничивала как водный поток, так и аэрацию. При этом вариант с компостом без цианобактерий и водорослей демонстрировал частичную деструкцию поверхности (20-30 %), что указывает на более рыхлую структуру и повышенную биodeградацию органической фракции. Это косвенно подтверждает, что органический компонент повышает динамичность матрицы, но не компенсирует избыточную плотность.

В природных биокорках ситуация иная. EPS создаёт микропоры и капиллярные каналы, которые одновременно:

стабилизируют частицы,
обеспечивают водопроводящие пути,
поддерживают газообмен.

В нашей системе EPS-фаза не сформировалась, следовательно, поровая сеть не была создана. Это подчёркивает принципиальное различие между естественной биокоркой и механически сформированным агрегатом.

Стерильность системы и отсутствие микробной синергии. Использование стерилизованной почвы позволило исключить влияние аборигенной микробиоты, однако одновременно устранило возможные синергетические взаимодействия:

стимуляцию роста через сигнальные молекулы,
кооперативное формирование биоплёнок,
ферментативную модификацию матрицы.

В естественных условиях ранние стадии биокорковой сукцессии включают взаимодействие бактерий, грибов и фотосинтетических микроорганизмов, формирующих комплексную микроструктуру. Отсутствие такого взаимодействия в лабораторной модели могло замедлить переход системы к активному состоянию.

Таким образом, выявленные ограничения отражают не столько неэффективность цианобактериально-водорослевого инокулята, сколько редуccionистский характер экспериментальной модели, изолирующей физический фактор плотности.

Концептуальная модель «структурно-функционального компромисса». Полученные данные позволяют предложить теоретическую модель:

Биологическая активация (B) как функция пористости (ϕ):

$$B = f(\phi, Deff, I(z), \theta)$$

где: ϕ – общая пористость, $Deff$ – эффективная диффузия, $I(z)$ – внутренняя световая интенсивность, θ – влажность.

При избыточной плотности агрегата:

$$\phi \downarrow$$

$D_{eff} \downarrow$

$I(z) \downarrow$

$\rightarrow B \rightarrow 0$

Таким образом, механическая стабильность (S) и биологическая активация (B) находятся в нелинейной зависимости:

при низкой S – разрушение агрегата;

при высокой S – подавление B;

оптимум лежит в промежуточной зоне.

Эта модель подтверждает, что задача разработки цианобактериально-водорослевых seed-ball систем носит характер инженерной оптимизации параметров пористости и динамической структуры, а не просто подбора биологического инокулята.

Заключение

Настоящее исследование показало, что интеграция цианобактерий и водорослей в структуру seed-ball агрегатов представляет собой перспективный, но инженерно сложный подход к формированию искусственных биологических почвенных корок для восстановления деградированных почв. Эксперимент продемонстрировал выраженный структурно-функциональный компромисс: высокая механическая стабильность агрегатов обеспечивала их целостность и устойчивость к разрушению, однако одновременно ограничивала раннюю биологическую активацию. Плотная матрица снижала диффузию газов, ограничивала гидратацию и уменьшала светопроницаемость, что препятствовало колонизации микрофототрофов и прорастанию семян. Полученные данные указывают на то, что биологическая функциональность seed-ball систем определяется не только наличием инокулята, но прежде всего физико-структурными параметрами агрегата – пористостью, связностью порового пространства, динамикой увлажнения и световой доступностью. Следовательно, успешное проектирование искусственных биокрустов требует перехода от статически плотных структур к динамическим матрицам с контролируемой микропористостью и адаптивным водным режимом. Несмотря на отсутствие ранней биологической активации в условиях стерильной лабораторной модели, исследование выявило ключевые механизмы ограничения и обозначило направления технологической оптимизации: регулирование плотности агрегатов, применение гидрофильных и биоразлагаемых добавок, использование адаптированных штаммов цианобактерий и водорослей и имитацию полевых циклов высыхания–увлажнение.

Таким образом, работа вносит вклад в развитие инженерных подходов к созданию искусственных биокорок и формирует концептуальную основу для дальнейших исследований, направленных

на балансирование механической устойчивости и биологической функциональности в системах биоремедиации деградированных почв.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Banda, L., Delgado-Baquerizo, M., Wang, J. T., Singh, B. K., & Maestre, F. T. Biocrusts as ecosystem engineers in drylands: Their role in soil stability and nutrient cycling. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022;165:108514.
2. Bardgett, R.D., & van der Putten, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*. 2014;515(7528):505–511.
3. Belnap J. The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2003;1(4):181–189.
4. Belnap, J., & Lange, O. L. (Eds.). *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Berlin: Springer. 2003.
5. Beraldi-Campesi, H. Early life on land and the first terrestrial ecosystems. *Ecological Processes*, 2, 1. 2013.
6. Bowker, M. A., Maestre, F. T., & Escolar, C. Biological soil crusts as a model system for examining the biodiversity–ecosystem function relationship in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2018;117:103–109.
7. Butters, S. M., St. Clair, L. L., Johansen, J. R., et al. Pelletized cyanobacterial soil amendments: Laboratory testing for survival, escapability, and nitrogen fixation. *Arid Land Research and Management*. 2009;23(3):201–213.
8. Elbert, W., Weber, B., Burrows, S., et al. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen. *Nature Geoscience*. 2012;5:459–462.
9. FAO. *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2017.
10. Hillel D. *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press. 1998: 771.
11. Lal, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*. 2015;7(5): 5875–5895.
12. Maier, S., Tamm, A., Wu, D., Caesar, J., Grube, M., & Weber, B. Photoautotrophic organisms control microbial abundance, diversity, and physiology in different types of biological soil crusts. *ISME Journal*. 2018;12:1032–1046.
13. Muñoz-Rojas, M., Román, J. R., Roncero-Ramos, B., & Cantón, Y. Cyanobacteria inoculation enhances carbon sequestration in soil substrates used in dryland restoration. *Land Degradation & Development*. 2018;29:1893–1903.
14. Rossi, F., & De Philippis, R. Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats. *Life*. 2015;5(2):1218–1238.

15. Rossi, F., Li, H., Liu, Y., & De Philippis, R. Cyanobacterial inoculation (cyano-inoculation): Perspectives for soil fertilization and desertification reversal. *Plant and Soil*. 2017;429:1–18.

REFERENCES

1. Banda, L., Delgado-Baquerizo, M., Wang, J. T., Singh, B. K., & Maestre, F. T. Biocrusts as ecosystem engineers in drylands: Their role in soil stability and nutrient cycling. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022;165:108514.
2. Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*. 2014;515(7528):505–511.
3. Belnap J. The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2003;1(4):181–189.
4. Belnap, J., & Lange, O. L. (Eds.). *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Berlin: Springer.2003.
5. Beraldi-Campesi, H. Early life on land and the first terrestrial ecosystems. *Ecological Processes*, 2, 1. 2013.
6. Bowker, M. A., Maestre, F. T., & Escolar, C. Biological soil crusts as a model system for examining the biodiversity–ecosystem function relationship in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2018;117:103–109.
7. Buttars, S. M., St. Clair, L. L., Johansen, J. R., et al. Pelletized cyanobacterial soil amendments: Laboratory testing for survival, escapability, and nitrogen fixation. *Arid Land Research and Management*. 2009;23(3):201–213.
8. Elbert, W., Weber, B., Burrows, S., et al. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen. *Nature Geoscience*. 2012;5:459–462.
9. FAO. *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2017.
10. Hillel D. *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press. 1998: 771.
11. Lal, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*. 2015;7(5):5875–5895.
12. Maier, S., Tamm, A., Wu, D., Caesar, J., Grube, M., & Weber, B. Photoautotrophic organisms control microbial abundance, diversity, and physiology in different types of biological soil crusts. *ISME Journal*. 2018;12:1032–1046.
13. Muñoz-Rojas, M., Román, J. R., Roncero-Ramos, B., & Cantón, Y. Cyanobacteria inoculation enhances carbon sequestration in soil substrates used in dryland restoration. *Land Degradation & Development*. 2018;29:1893–1903.

14. Rossi, F., & De Philippis, R. Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats. *Life*. 2015;5(2):1218–1238.

15. Rossi, F., Li, H., Liu, Y., & De Philippis, R. Cyanobacterial inoculation (cyano-inoculation): Perspectives for soil fertilization and desertification reversal. *Plant and Soil*. 2017;429:1–18.

Информация об авторах

Э.У. Бурханова – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Бишкек, Кыргызстан;

С. Чубак уулу – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Бишкек, Кыргызстан;

Н.Н. Абдикалилов – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Бишкек, Кыргызстан;

С.Т. Умарова – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Бишкек, Кыргызстан;

Н.В. Суханова – доктор биологических наук, зав.каф. биоэкологии и биологического образования, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы;

Н.Э. Тотубаева – доктор биологических наук, доцент, Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Бишкек, Кыргызстан

Information about the authors

E.U. Burkhanova – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

S. Chubak uulu – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

N.N. Abdikalilov – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

S.T. Umarova – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

N.V. Sukhanova – doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Bioecology and Biological Education, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla;

N.E. Totubaeva – doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan.

Вклад авторов

Э.У. Бурханова – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи, анализ данных и визуализация;

С. Чубак уулу – сбор данных и эксперименты;

Н.Н. Абдикалилов – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

С.Т. Умарова – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

Н.В. Суханова – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

Н.Э. Тотубаева – концепция и проектирование исследования, сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author contributions

E.U. Burkhanova – data collection and experiments, manuscript preparation, data analysis and visualization;

S. Chubak uulu – data collection and experiments;

N.N. Abdikalilov – data collection and experiments, manuscript preparation;

S.T. Umarova – data collection and experiments, manuscript preparation;

N.V. Sukhanova – data collection and experiments, preparation of the manuscript;

N.E. Totubayeva – research concept and design, data collection and experiments, manuscript preparation.

The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 26.04.2026; принята к публикации 30.05.2026.

The article was submitted 26.04.2026; accepted for publication 30.05.2026.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК: 631.8.022.3

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-43-51

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И ЦИАНОБАКТЕРИЙ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ТОМАТОВ В УСЛОВИЯХ ЗИМНЕГО ОГОРОДА

**Яна Андреевна Захарова¹, Ангелина Альфретовна
Исмагилова², Кристина Борисовна Ухаткина³, Наталья
Викторовна Суханова⁴**

^{1,2,3,4} Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы, Уфа, Россия, n_suhanova@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования влияния суспензий микроскопических водорослей *Chlorella vulgaris*, *Nannochloris eucaryotum*, *Bracteacoccus minor* и цианобактерии *Bulbonema sp.* на рост томатов сорта «Пиноккио» в условиях зимнего огорода. Эксперименты проводились с использованием стандартных методик проращивания семян, выращивания растений в грунте и статистической обработки данных. Было выяснено, что обработка семян и полив суспензиями микроводорослей и цианобактериями способствуют увеличению всхожести, длины побегов и корней, а также общей биомассы растений. Наибольший стимулирующий эффект отмечен при использовании суспензий микроводорослей и цианобактерий, а точнее выделяемых ими биологически активных веществ. Результаты подтверждают перспективность использования микроводорослей и цианобактерий в качестве экологически безопасных стимуляторов роста для сельскохозяйственных культур в условиях домашнего огорода.

Ключевые слова: микроводоросли, цианобактерии, сельскохозяйственные культуры, стимуляторы роста, всхожесть, биоудобрения, помидоры Черри

Для цитирования: Захарова Я.А., Исмагилова А.А., Ухаткина К.Б., Суханова Н.В. Сравнительный анализ содержания внеклеточных и внутриклеточных метаболитов у различных видов микроскопических водорослей и цианобактерий // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №. С. 43-51.

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

**BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF MICROALGAE
AND CYANOBACTERIA FOR TOMATO GROWING IN WINTER
GARDEN CONDITIONS**

*Yana Andreevna Zakharova¹, Angelina Alfretovna Ismagilova²,
Kristina Borisovna Ukhatkina³, Natalya Viktorovna Sukhanova⁴*
*^{1,2,3,4} Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla,
Ufa, Russia, n_suhanova@mail.ru*

Abstract. This article presents the results of a study on the effect of suspensions of microalgae *Chlorella vulgaris*, *Nannochloris eycaryotum*, *Bracteacoccus minor*, and the cyanobacterium *Bulbonema sp.* on the growth of Pinocchio tomatoes in winter garden conditions. Experiments were conducted using standard methods for seed germination, plant growth in soil, and statistical data processing. It was found that seed treatment and irrigation with microalgae and cyanobacteria suspensions increased germination, shoot and root length, and overall plant biomass. The greatest stimulating effect was observed with microalgae and cyanobacteria suspensions, or more specifically, the biologically active substances they secrete. The results confirm the potential of using microalgae and cyanobacteria as environmentally friendly growth promoters for agricultural crops in home gardens.

Keywords: microalgae, cyanobacteria, agricultural crops, growth promoters, germination, biofertilizers, cherry tomatoes.

For citation: Zakharova Ya.A., Ismagilova A.A., Ukhatkina K.B., Sukhanova N.V. Comparative analysis of the content of extracellular and intracellular metabolites in various species of microscopic algae and cyanobacteria // Bulletin of the Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla. Series: Natural Sciences. 2026. No2 pp. 43-51.

Создание зимнего огорода в условиях жилых помещений и теплиц становится всё более актуальным направлением, обеспечивающим население свежей зеленью и овощами в межсезонье. Однако ограниченный объём грунта и недостаток естественной биоты требуют поиска эффективных и безопасных способов стимуляции роста растений. Химические удобрения не всегда применимы в комнатных условиях и могут накапливаться в овощах. В этой связи перспективной альтернативой выступают микроводоросли и цианобактерии, синтезирующие фитогормоны, витамины,

антибиотические вещества, фиксирующие атмосферный азот и улучшающие структуру почвы [2-4].

Сельскохозяйственные растения занимают особое место в продовольственной безопасности и экономическом развитии стран во всем мире. Их успешная посадка, уход, сбор урожая в комнатных условиях требуют особого подхода. Также немаловажным является успешно выбрать сорт растения, методы обработки почвы и органические удобрения. В связи с этим поиск эффективных и экологичных ростостимуляторов является актуальной задачей. Цель данного исследования: изучить влияние суспензий зеленых микроводорослей (*Chlorella vulgaris*, *Nannochloris eucaryotum*, *Bracteacoccus minor*) и цианобактерии (*Bulbonema sp.*) на рост и развитие сельскохозяйственных культур (томаты сорт «Пиноккио») в лабораторных условиях и в условиях зимнего огорода.

Материалы и методы

Для данной работы были использованы три штамма зеленых микроводорослей и один штамм цианобактерии: *Chlorella vulgaris* (класс Trebouxiophyceae), *Nannochloris eucaryotum* (класс Trebouxiophyceae), *Bracteacoccus minor* (класс Chlorophyceae), *Bulbonema sp.* (класс Cyanophyceae). Штаммы данных культур были взяты из коллекции ВСАС кафедры биоэкологии и биологического образования БГПУ им. М. Акмуллы. Культивирование проводилось на жидкой питательной среде Болда с соблюдением правил стерильности [1]. Пересевы культур осуществлялись в ламинарном боксе с использованием бактериологических петель.

Эксперимент включал два этапа.

Первый этап (лабораторный, 7 суток) – проращивание семян томата сорта «Пиноккио» в чашках Петри. Семена помещали на фильтровальную бумагу, увлажнённую дистиллированной водой (контроль) или суспензиями микроводорослей (*Nannochloris eucaryotum*, *Bracteacoccus minor*, *Chlorella vulgaris*) и цианобактерии (*Bulbonema sp.*) – опытные варианты. На 3-й день определяли энергию прорастания, на 7-й – всхожесть, длину побега и корня, биомассу проростков. Опыт проводили в трёхкратной повторности. Этот этап позволил оценить влияние суспензий на начальные этапы роста в стандартизированных условиях [1].

Второй этап (91 день) – выращивание томатов в грунте в условиях зимнего огорода. Контрольные растения поливали отстоянной водой, опытные – водой с добавлением 20 мл суспензии микроорганизмов на 2 л воды. В процессе работы фиксировали появление всходов, листьев, бутонизацию, цветение, плодоношение. На 91-й день измеряли высоту растений, подсчитывали количество соцветий и плодов, оценивали визуальное состояние растений. Этот

этап показал долгосрочное влияние биосуспензий на развитие и продуктивность томатов в условиях, приближённых к реальному домашнему выращиванию.

Результаты исследования

В ходе эксперимента установлено, что применение суспензий микроводорослей (*Nannochloris eucaryotum*, *Bracteacoccus minor*, *Chlorella vulgaris*) и цианобактерии (*Bulbonema* sp.) оказывает разнонаправленное, но в целом положительное влияние на рост, развитие и продуктивность томатов сорта «Пиноккио».

Как видно из таблицы 1, все исследуемые суспензии по-разному влияли на стартовые параметры развития томатов. По всхожести лидировали семена, обработанные *Bulbonema* sp. (68,3 %) и *Chlorella vulgaris* (66,6 %), тогда как в контроле этот показатель составил 63,3 %. Наибольшую длину побега у проростков (18,5 мм) обеспечила суспензия *N. eucaryotum*, что на 8,8 % выше контроля. Максимальную длину корня (37,2 мм) показал вариант с *B. minor*, превысив контроль на 8,1 %. Наиболее существенное увеличение биомассы проростков зафиксировано для *B. minor* – 2,110 г против 1,372 г в контроле (прирост 53,8 %).

Таблица 1

Влияние суспензий микрофототрофов на проращивание семян и начальный рост проростков томата

	Контроль	<i>Nannochloris eucaryotum</i>	<i>Bracteacoccus minor</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Bulbonema</i> sp.
Ср. длина побега, мм	17	18,5	14,5	15,8	13,7
Ср. длина корня, мм	34,4	36,9	37,2	32,2	27,6
Энергия проращивания, %	21,6	13,3	20	18,3	15
Всхожесть, %	63,3	60	56,6	66,6	68,3
Ср. значение массы проростков, г	1,372	1,219	2,110	1,764	1,551

На 91-й день наблюдений (таблица 2) наиболее выраженный положительный эффект отмечен для *Bracteacoccus minor* и *Bulbonema*

sp. Растения, поливаемые суспензией *B. minor*, достигли высоты 322 мм – более чем в два раза выше контроля (150 мм). Они сформировали 9 соцветий и 3 плода. При воздействии суспензией *Bulbonema sp.* высота томатов составила 310 мм, отмечено 7 соцветий и 1 плод. Контрольные растения не цвели и не плодоносили. Варианты с *N. eucaryotum* и *Chlorella vulgaris* также превысили контроль по высоте и количеству соцветий, однако плодоношения к концу эксперимента не наблюдалось.

Опытные растения отличались более насыщенной тёмно-зелёной окраской листьев, утолщённым стеблем и выраженным томатным запахом, что свидетельствует об улучшенном минеральном питании и фотосинтетической активности.

Все исследуемые штаммы микроводорослей проявили ростостимулирующие свойства. Наиболее перспективными для создания зимнего огорода признаны:

Bracteacoccus minor – максимальная продуктивность (плодоношение на 91-й день, наибольшая высота и масса проростков);

Bulbonema sp. – высокая всхожесть (68,3 %) и интенсивный рост побегов ($t=18,53$);

Chlorella vulgaris – стабильное повышение всхожести и длины корня.

Варианты с *N. eucaryotum* и *Chlorella vulgaris* ускорили бутонизацию и цветение, однако для достижения плодоношения может потребоваться более длительное культивирование или увеличение концентрации суспензий.

Таблица 2

Влияние суспензий микрорототрофов на вегетативное и репродуктивное развитие томатов

	Высота растения, мм	Кол-во соцветий, шт.	Кол-во плодов, шт.	Характеристика
Контроль	150	0	0	Листья гладкие, яйцевидные, супротивные, сильно рассеченные, желто-зеленого цвета
<i>Nannochloris eucaryotum</i>	250	6	0	Листья гладкие, яйцевидные, супротивные, сильно

				рассеченные, темно-зеленого цвета
<i>Bracteacoccus minor</i>	322	9	3	Листья гладкие, яйцевидные, супротивные, сильно рассеченные, сильно выражен запах томата, темно-зеленого цвета, толстый стебель, наличие 3 плодов.
<i>Chlorella vulgaris</i>	220	5	0	Листья гладкие, яйцевидные, супротивные, сильно рассеченные, сильно выражен запах томата, темно-зеленого цвета, толстый стебель, бутоны цветков
<i>Bulbonema sp.</i>	310	7	1	Листья гладкие, яйцевидные, супротивные, сильно рассеченные, темно-зеленого цвета, появились первые плоды

Заключение

Проведённые исследования показали, что суспензии зелёных микроводорослей *Nannochloris eucaryotum*, *Bracteacoccus minor*, *Chlorella vulgaris* и цианобактерии *Bulbonema sp.* обладают выраженным ростостимулирующим действием на томаты сорта «Пиноккио». Положительный эффект проявляется в повышении всхожести семян, увеличении длины корней и накоплении биомассы проростков.

В грунте в условиях зимнего огорода использование суспензий микроводорослей и цианобактерий ускорило развитие растений по сравнению с контрольной группой. Наиболее выраженный эффект отмечен для *Bracteacoccus minor*: растения достигли высоты 322 мм (контроль – 150 мм), сформировали 9 соцветий и 3 плода. *Bulbonema* sp. также показала высокий результат – высота 310 мм, 7 соцветий и 1 плод. Контрольные растения не цвели и не плодоносили.

На протяжении эксперимента растения, которые поливались суспензиями микроводорослей и цианобактерий, отличались более тёмно-зелёной окраской листьев, утолщённым стеблем и выраженным томатным запахом, что свидетельствует об улучшенном минеральном питании и повышенной фотосинтетической активности. Также было замечено, что грунт при поливе суспензиями оставался влажным дольше, чем при поливе водой. Это объясняется тем, что микроводоросли и цианобактерии выделяют вещества, образующие на поверхности почвы влагоудерживающую плёнку и улучшающие её структуру, что приводит к замедлению испарения воды и повышению влагоёмкости грунта. Таким образом, стабильный показатель по росту растений наблюдался у всех опытных групп, особенно у вариантов с *Bracteacoccus minor* и *Bulbonema* sp.

Полученные результаты подтверждают биотехнологический потенциал микроскопических зелёных водорослей и цианобактерий, как эффективных и экологически безопасных стимуляторов роста для сельскохозяйственных культур в условиях зимнего огорода. Наиболее перспективными для практического использования признаны *Bracteacoccus minor* (максимальная продуктивность) и *Bulbonema* sp. (высокая всхожесть и интенсивный рост побегов).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гайсина Л.А. Современные методы выделения и культивирования водорослей: учебное пособие [Текст] / Л.А. Гайсина, А.И. Фазлутдинова, Р.Р. Кабиров. // Уфа: БГПУ имени М. Акмуллы, 2008. – 152с.
2. Голлербах М.М., Штина Э.А. Почвенные водоросли [Текст] / – Л.: Наука, 1969. – 228 с.
3. Музафаров А.М., Таубаев Т.Т., Джуманиязов И.Д. Альголизация орошаемых земель протококковыми водорослями и ее влияние на повышение плодородия почв и урожайность хлопчатника [Текст] / Материалы республиканского совещания «Культивирование и применение микроводорослей в народном хозяйстве». – Ташкент, 1977. – 136 с.
4. Новичкова-Иванова Л.Н. О роли почвенных водорослей в биогеоценозах [Текст] // Развитие и значение водорослей в почвах

Нечерноземной зоны: Материалы межвуз. конф. – Пермь, 2007. – С.62-65.

REFERENCES

1. Gaysina, L.A. Modern Methods of Isolation and Cultivation of Algae: A Textbook [Text] / L. A. Gaysina, A. I. Fazlutdinova, R. R. Kabirov. // Ufa: M. Akmulla Belarusian State Pedagogical University, 2008. – 152 p.
2. Gollerbakh M.M., Shtina E.A. Soil Algae [Text] / – L.: Nauka, 1969. – 228 p.
3. Muzafarov A.M., Taubaev T.T., Dzhumaniyazov I.D. Algolization of irrigated lands with protococcal algae and its impact on increasing soil fertility and cotton yield [Text] / Proceedings of the Republican conference "Cultivation and application of microalgae in the national economy". - Tashkent, 1977. - 136 p.
4. Novichkova-Ivanova L.N. On the role of soil algae in biogeocenoses [Text] // Development and significance of algae in soils of the Non-Chernozem zone: Proceedings of the interuniversity conf. - Perm, 2007. - P. 62-65.

Информация об авторах

Я.А. Захарова – студент 1 курса, 06.04.01 Биология, направленность (профиль) «Биотехнология», естественно-географический факультет БГПУ им М. Акмуллы;

А.А. Исмаилова – студент 1 курса, 06.04.01 Биология, направленность (профиль) «Биотехнология», естественно-географический факультет БГПУ им М. Акмуллы;

К.Б. Ухаткина – студент 1 курса, 06.04.01 Биология, направленность (профиль) «Биотехнология», естественно-географический факультет БГПУ им М. Акмуллы;

Н.В. Суханова – заведующий кафедрой биоэкологии и биологического образования, естественно-географический факультет БГПУ им М. Акмуллы.

Information about the author

Ya.A. Zakharova – first-year student, majoring in Biotechnology, Faculty of Natural Sciences and Geography, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla;

A.A. Ismagilova – first-year student, majoring in Biotechnology, Faculty of Natural Sciences and Geography, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla;

K.B. Ukhatkina – first-year student, majoring in Biotechnology, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla;

N.V. Sukhanova – Head of the Department of Bioecology and Biological Education, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla.

Вклад авторов

Я.А.Захарова – проведение исследования, визуализация;
А.А. Исмагилова – сбор материала, научное редактирование текста;

К.Б. Ухаткина – сбор материала, обработка материала;

Н.В. Суханова – концептуализация, методология;

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Ya.A. Zakharova – research, visualization.

A.A. Ismagilova – data collection, scientific editing.

K.B. Ukhatkina – data collection, data processing.

N.V. Sukhanova – conceptualization, methodology.

The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 12.05.2026; accepted for publication 09.06.2026.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 631.8.022.3

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-52-59

**ВЛИЯНИЕ СУСПЕНЗИИ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ
ЗЕЛЁНЫХ ВОДОРОСЛЕЙ НА РОСТ ПРЯНЫХ КУЛЬТУР
В УСЛОВИЯХ ЗИМНЕГО САДА**

*Ангелина Альфретовна Исмагилова¹, Кристина Борисовна
Ухаткина², Яна Андреевна Захарова³, Наталья Викторовна
Суханова⁴*

*^{1,2,3,4} Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы, Уфа, Россия, n_suhanova@mail.ru*

Аннотация. В статье представлены результаты исследования влияния суспензий микроскопических зелёных водорослей *Pseudococcomyxa simplex* и *Scotiellopsis rubescens* на рост и развитие пряных культур – базилика (*Ocimum basilicum* L.), рукколы (*Eruca sativa* L.) и мелиссы (*Melissa officinalis* L.) в условиях зимнего сада. Эксперименты проводились с использованием стандартных методик проращивания семян, выращивания растений в грунте и статистической обработки данных. Было выяснено, что обработка семян и полив суспензией водорослей способствуют увеличению всхожести, длины побегов и корней, а также общей биомассы растений. Наибольший стимулирующий эффект отмечен при использовании суспензий водорослей, а точнее за счет выделяемых ими биологически активных веществ. Результаты подтверждают перспективность использования микроскопических зелёных водорослей в качестве экологически безопасных стимуляторов роста для пряных культур.

Ключевые слова: зеленые микроводоросли, *Pseudococcomyxa simplex*, *Scotiellopsis rubescens*, пряные культуры, стимуляторы роста, всхожесть, биоудобрения

Для цитирования: Исмагилова А.А., Ухаткина К.Б., Захарова Я.А., Суханова Н.В. Влияние суспензии микроскопических зеленых водорослей на рост пряных культур в условиях зимнего сада // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №2. С. 52-59.

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

EFFECT OF MICROSCOPIC GREEN ALGAE SUSPENSION ON THE GROWTH OF SPICE CROPS IN A WINTER GARDEN

*Angelina Alfretovna Ismagilova¹, Kristina Borisovna Ukhatkina²,
Yana Andreevna Zakharova³, Natalya Viktorovna Sukhanova⁴*

*^{1,2,3,4} Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla,
Ufa, Russia, n_suhanova@mail.ru*

Abstract. This article presents the results of a study examining the effects of suspensions of microscopic green algae *Pseudococcomyxa simplex* and *Scotiellopsis rubescens* on the growth and development of spice crops – basil (*Ocimum basilicum* L.), arugula (*Eruca sativa* L.), and lemon balm (*Melissa officinalis* L.) in a winter garden. The experiments were conducted using standard methods of seed germination, plant cultivation in soil, and statistical data processing. It was found that seed treatment and irrigation with algae suspensions increased germination, shoot and root length, and overall plant biomass. The greatest stimulating effect was observed with the use of algae suspensions, specifically due to the biologically active substances they secrete. The results confirm the potential of using microscopic green algae as environmentally friendly growth promoters for spice crops.

Key words: green microalgae, *Pseudococcomyxa simplex*, *Scotiellopsis rubescens*, spice crops, growth stimulants, germination, biofertilizers

For citation: Ismagilova A.A., Ukhatkina K.B., Zakharova Ya.A., Sukhanova N.V. "The Effect of a Suspension of Microscopic Green Algae on the Growth of Spice Crops in a Winter Garden" // Bulletin of the Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla. Series: Natural Sciences. 2026. No2. pp. 52-59.

Введение

В современном сельском хозяйстве остро стоит задача снижения химической нагрузки на агроэкосистемы, при этом повышая урожайность и качество продукции. Одним из перспективных направлений является использование микроскопических зеленых водорослей, которые продуцируют биологически активные вещества (аминокислоты, витамины, фитогормоны, полисахариды), способные улучшать питание растений, стимулировать их рост и повышать устойчивость к стрессам [1, 2].

Пряные культуры занимают важное место в питании человека, однако их выращивание часто сталкивается с такими проблемами, как недостатком питательных веществ в почве и неблагоприятными условиями среды. В связи с этим поиск эффективных и экологичных ростостимуляторов является актуальной задачей [3].

Цель исследования – изучить влияние суспензий двух видов зеленых микроводорослей (*Pseudococcomyxa simplex* и *Scotiellopsis rubescens*) на рост и развитие пряных культур (базилик, руккола, мелисса) в лабораторных условиях и в условиях зимнего сада.

Материалы и методы

В работе использовали два штамма зеленых микроводорослей: *Pseudococcomyxa simplex* (класс Trebouxiophyceae) и *Scotiellopsis rubescens* (класс Chlorophyceae). Штаммы взяты из коллекции ВСАС, базирующейся на кафедре биоэкологии и биологического образования БГПУ им. М. Акмуллы. Культивирование штаммов проводилось на жидкой питательной среде Болда (BBM) с соблюдением правил стерильности. Пересев культур осуществлялся в ламинарном боксе с использованием бактериологических петель [4].

Эксперимент включал два этапа. Первый этап заключался в проращивании семян пряных культур в чашках Петри на фильтровальную бумагу, увлажненной дистиллированной водой (контроль) или суспензиями водорослей (опыт). На этом этапе мы определяли всхожесть, длину побегов и корней на 7-й день выращивания. Каждый вариант эксперимента включал 3 повторности по 30 семян [5].

Вторым этапом было выращивание растений в контейнерах с универсальным грунтом в условиях зимнего сада. Полив проводили по мере высыхания почвы [6]. Контроль поливали отстоянной водой, для остальных опытных контейнеров с растениями полив осуществлялся разбавлением 20 мл суспензии водорослей на 2 л воды. Продолжительность опыта – 60 дней. Учитывали высоту растений, длину и ширину листьев, количество листьев, визуальное состояние.

Результаты исследования

Обработка семян в чашках Петри суспензиями водорослей повышала всхожесть по сравнению с контролем у всех трех культур (табл. 1). Максимальная всхожесть семян рукколы 91,1 % отмечена при использовании *P. simplex*, что на 7,8 % выше, чем в контроле. Наибольшая длина корня 46,5 мм и побега 35,6 мм зафиксирована под действием суспензии *S. rubescens*.

Совместное применение двух суспензий (*P. Simplex* + *S. rubescens*) дало наибольшую всхожесть базилика 73,3 % и максимальную длину побега 17,8 мм. Однако длина корня в контроле

30,1 мм была выше, чем в опыте; это показывает, что суспензии стимулируют рост растения в пользу надземной части.

Таблица 1

Влияние суспензий водорослей на всхожесть и длину проростков

Культура	Вариант	Всхожесть, %	Длина побега, мм	Длина корня, мм
Руккола	Контроль	83,3	23,5	12,5
	<i>P. simplex</i>	91,1	24,6	25,6
	<i>S. rubescens</i>	86,7	35,6	46,5
	<i>P. simplex</i> + <i>S. rubescens</i>	82,2	24,2	14,2
Базилик	Контроль	72,2	15,4	30,1
	<i>P. simplex</i>	71,1	16,8	15,3
	<i>S. rubescens</i>	70,0	17,4	13,6
	<i>P. simplex</i> + <i>S. rubescens</i>	73,3	17,8	20,3
Мелисса	Контроль	52,2	5,9	19,9
	<i>P. simplex</i>	57,8	11,3	18,6
	<i>S. rubescens</i>	51,1	8,5	16,1
	<i>P. simplex</i> + <i>S. rubescens</i>	57,8	12,6	14,4

Наилучшие результаты по всхожести мелиссы 57,8 % показало совместное применение суспензий, такой же показатель наблюдается при использовании *Pseudococcomyxa simplex*. По длине побега наилучший результат также наблюдается при использовании двух видов одновременно 12,6 мм.

При выращивании растений в грунте, поливаемые суспензиями водорослей, отличались более быстрым развитием, большей высотой, количеством и размером листьев. Наибольшая высота растений рукколы 145 мм была отмечена при поливе *P. simplex*, что вдвое выше контроля. Длина листа максимальна в варианте с *P. simplex* + *S. rubescens* и равна 85 мм, ширина листьев в данном случае была 27 мм. Растения в опытных вариантах имели более насыщенную зеленую окраску и лучше развитую листовую пластинку.

Лучшее развитие базилика по высоте – 106 мм и длине листовой пластинки – 32 мм показал вариант с использованием суспензии *P. simplex*. Однако наибольшее количество листьев и характерный бордовый оттенок стебля наблюдались при обработке *S. rubescens*, что может свидетельствовать о накоплении антоцианов и повышении адаптивного потенциала (табл. 2).

Таблица 2

Влияние суспензий микроводорослей на рост пряных культур в грунте

Культура	Вариант	Высота растения, мм	Длина листа, мм	Ширина листа, мм	Количество листьев, шт.
Руккола	Контроль	72	40	13	6
	<i>P. simplex</i>	145	80	27	7
	<i>S. rubescens</i>	103	65	19	7
	<i>P. simplex</i> + <i>S. rubescens</i>	131	85	23	6
Базилик	Контроль	85	23	17	8
	<i>P. simplex</i>	106	32	20	8
	<i>S. rubescens</i>	92	25	27	10
	<i>P. simplex</i> + <i>S. rubescens</i>	91	21	13	6
Мелисса	Контроль	45	20	15	8
	<i>P. simplex</i>	56	24	21	10
	<i>S. rubescens</i>	58	20	18	6
	<i>P. simplex</i> + <i>S. rubescens</i>	74	28	27	10

Совместное применение суспензий для мелиссы (*P. Simplex* + *S. rubescens*) обеспечило максимальные показатели: высота 74 мм (контроль – 45 мм), длина листа 28 мм (контроль – 20 мм), ширина 27 мм (контроль – 15 мм). Растения отличались сильным опушением и сердцевидной формой листьев.

Скорее всего, наблюдаемый стимулирующий эффект объясняется выделением водорослями в среду фитогормонов (ауксинов, цитокининов), витаминов группы В, аминокислот и микроэлементов, которые улучшают усвоение питательных веществ растениями и активируют их метаболизм [7].

Заключение

Проведенные исследования показали, что суспензии зеленых микроводорослей *Pseudococcomyxa simplex* и *Scotiellopsis rubescens* обладают выраженным ростостимулирующим действием на пряные культуры. Положительный эффект проявляется в повышении всхожести семян, ускорении роста проростков. В грунте в условиях

зимнего сада комбинированное использование суспензий *Pseudococcomyxa simplex* и *Scotiellopsis rubescens*, а также их отдельное использование, ускорило развитие растений по сравнению с контрольной группой.

На протяжении эксперимента растения, которые поливались суспензией водорослей, были более устойчивы к нестабильному температурному режиму и низкой влажности воздуха в комнатных условиях. Также было замечено, что грунт оставался влажным дольше, чем при поливе водой; это объясняется тем, что они выделяют вещества, которые образуют на поверхности почвы влагоудерживающую плёнку и улучшают её структуру, что приводит к замедлению испарения воды и повышает влагоёмкость грунта [8]. Поэтому стабильный показатель по росту растений наблюдался у пряных культур, которые поливались суспензией *Pseudococcomyxa simplex*. Полученные результаты подтверждают потенциал микроскопических зеленых водорослей как биоудобрений, являющихся стимуляторами роста для растений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лукьянов В.А., Стифеев А.И. Прикладные аспекты применения микроводорослей в агроценозе. – Курск: Изд-во Курской ГСХА, 2014. – 181 с.
2. Волкова П.А. Разработка биологического удобрения на основе зеленых водорослей рода *Scenedesmus*. – 2022.
3. Доронина Н. Ароматы загородной жизни. Пряно-вкусовые травы для вашего сада и огорода. – Издательские решения, 2021. – 114 с.
4. Гайсина Л.А., Фазлутдинова А.И., Кабиров Р.Р. Современные методы выделения и культивирования водорослей. – Уфа: БГПУ, 2008. – 152 с.
5. Семена сельскохозяйственных культур, методы определения всхожести [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294838/4294838875.pdf?ysclid=m96su4cg yz54121544> – 07.02.2026 г.
6. Сервантеса Х. Домашнее растениеводство. Выращивание в почве и на гидропонике [Текст] / Хорхе Сервантеса (Джордж Ф. Ван Паттен) // 2008.
7. Pröschold T., Leliaert F. Systematics of the green algae: conflict of classic and modern approaches // In: Unravelling the algae: the past, present and future of algal systematics. – 2007. – P. 123–153.
8. Влияние водорослей на физические свойства почвы [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.activestudy.info/vliyaie-vodoroslej-na-fizicheskie-svoystva-pochvy/> - 08.02.2026.

REFERENCES

1. Lukyanov V.A., Stifeev A.I. Applied Aspects of Microalgae Application in Agroecosystem. Kursk: Kursk State Agricultural Academy Publishing House, 2014. 181 p.
2. Volkova P.A. Development of Biological Fertilizer Based on Green Algae of the Genus *Scenedesmus*. 2022.
3. Doronina N. Scents of Country Life. Spicy Herbs for Your Garden and Vegetable Garden. Publishing Solutions, 2021. 114 p.
4. Gaysina L.A., Fazlutdinova A.I., Kabirov R.R. Modern Methods of Algae Isolation and Cultivation. Ufa: BSPU, 2008. 152 p.
5. Agricultural crop seeds, methods for determining germination [Electronic resource] - Access mode: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294838/4294838875.pdf?ysclid=m96su4cgyz54121544-> 07.02.2026.
6. Cervantes H. Home gardening. Growing in soil and hydroponics [Text] / Jorge Cervantes (George F. Van Patten) // 2008.
7. Pröschold T., Leliaert F. Systematics of the green algae: conflict of classic and modern approaches // In: Unravelling the algae: the past, present and future of algal systematics. - 2007. - P. 123-153.
8. The influence of algae on the physical properties of soil [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.activestudy.info/vliyaie-vodoroslej-na-fizicheskie-svoystva-pochvy/> - 08.02.2026.

Информация об авторах

А.А. Исмагилова – магистрант БГПУ им. М.Акмиллы;

К.Б. Ухаткина – магистрант БГПУ им. М.Акмиллы;

Я.А. Захарова – магистрант БГПУ им. М.Акмиллы;

Н.В. Суханова – доктор биологических наук, профессор БГПУ им. М.Акмиллы.

Information about the authors

A.A. Ismagilova – master's student of BSPU named after M.Akmulla;

K.B. Ukhatkina – master's student of BSPU named after M.Akmulla;

Y.A. Zakharova – master's student of BSPU named after M.Akmulla;

N.V. Sukhanova – Doctor of Biological Sciences, Professor of BSPU named after M.Akmulla.

Вклад авторов

А.А. Исмагилова – проведение исследования, визуализация.

К.Б. Ухаткина – сбор материала, научное редактирование текста.

Я.А. Захарова – сбор материала, обработка материала.

Н.В. Суханова – концептуализация, методология.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author contributions

A.A. Ismagilova – research, visualization.

K.B. Ukhatkina – data collection, scientific editing.

Ya.A. Zakharova – data collection, data processing.

N.V. Sukhanova – conceptualization, methodology.

The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; принята к публикации 19.06.2026.

The article was submitted 12.05.2026; accepted for publication 19.06.2026.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК: 58.071; 58.01/.07; 574.583

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-60-71

ВОЗДЕЙСТВИЕ БИОГЕННЫХ АМИНОВ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ ЗЕЛЁНЫХ ОДНОКЛЕТОЧНЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ

Алмаз Ринатович Махмутов¹, Лира Альбертовна Гайсина²

*¹Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия.
almaz_makhmutov@list.ru*

*²Башкирский государственный педагогический университет
имени М. Акмуллы, Уфа, Россия*

Аннотация. Биогенные амины – это низкомолекулярные азотсодержащие соединения, выполняющие сигнальные функции в различных биологических системах. В последние годы было показано, что нейромедиаторы могут воздействовать и на микроорганизмы, включая микроводоросли. Цель данной работы – литературный анализ влияния биогенных аминов (дофамина, серотонина, гистамина, ацетилхолина и норэпинефрина) на рост, метаболизм и фотосинтетическую активность зелёных одноклеточных водорослей. Рассматриваются данные экспериментальных исследований, посвящённых видам *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus quadricauda* и *Naematococcus lacustris*. Показано, что низкие концентрации биогенных аминов способны стимулировать рост водорослей, накопление биомассы и синтез фотосинтетических пигментов. Наиболее выраженный стимулирующий эффект часто наблюдается для гистамина и ацетилхолина, тогда как высокие концентрации могут оказывать ингибирующее действие.

Ключевые слова: нейромедиаторы, зелёные водоросли, дофамин, серотонин, ацетилхолин, гистамин, норадреналин, биотехнология, микробиология

Для цитирования: Махмутов А.Р., Гайсина Л.А. Воздействие биогенных аминов на рост и развитие зелёных одноклеточных водорослей // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №2. С. 60-71.

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

IMPACT OF BIOGENIC AMINES ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF GREEN SINGLE-CELLULAR ALGAE

Almaz R. Makhmutov¹, Lira A. Gaisina²

*¹Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
almaz_makhmutov@list.ru*

²Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla, Ufa, Russia

Abstract. Biogenic amines are low-molecular-weight nitrogen-containing compounds that perform signaling functions in various biological systems. In recent years, it has been demonstrated that neurotransmitters can also affect microorganisms, including microalgae. The aim of this paper is to review the literature on the effects of biogenic amines (dopamine, serotonin, histamine, acetylcholine, and norepinephrine) on the growth, metabolism, and photosynthetic activity of green unicellular algae. Data from experimental studies on the species *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus quadricauda*, and *Haematococcus lacustris* are reviewed. Low concentrations of biogenic amines have been shown to stimulate algal growth, biomass accumulation, and the synthesis of photosynthetic pigments. The most pronounced stimulating effect is often observed for histamine and acetylcholine, while high concentrations can have an inhibitory effect.

Keywords: neurotransmitters, green algae, dopamine, serotonin, acetylcholine, histamine, norepinephrine, biotechnology, microbiology

For citation: Makhmutov A.R., Gaysina L.A. Effect of biogenic amines on the growth and development of green unicellular algae // Bulletin of the M. Akmulla Bashkir State of Pedagogical University. Series: Natural Sciences. №2. pp. 60-71.

Обоснованием актуальности темы является то, что изучение влияния нейромедиаторов на произрастание микроводорослей, а также их свойств, оказывающих действие на генерацию первичных и вторичных метаболитов является, несомненно, важным фактором для создания благоприятных условий проращивания, сохранения и инициирования синтеза требуемых веществ (жирных кислот, каротиноидов).

Биогенные амины (серотонин, дофамин, норэпинефрин, гистамин и др.) широко известны как нейромедиаторы животных

организмов. Однако накопленные данные свидетельствуют, что эти соединения выполняют более универсальные сигнальные функции в биологических системах и могут участвовать во взаимодействиях между организмами различных таксономических групп. В водных экосистемах биогенные амины выделяются различными организмами, включая зоопланктон, рыб и микроорганизмы. Эти вещества могут влиять на рост микроводорослей и, таким образом, участвовать в межвидовой химической коммуникации. Зелёные одноклеточные водоросли рода *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Haematococcus* играют важную роль в первичной продукции водных экосистем и активно используются в биотехнологии (производство биотоплива, пищевых добавок и биологически активных веществ). Цель данной работы рассмотреть потенциально возможные эффекты биогенных аминов, оказываемые на произрастание культур водорослей.

В ходе анализа литературы была синтезирована методика нейромедиаторного воздействия биогенными аминами на произрастание зелёных микроводорослей, включающая в себя состав и молярные дозы каждого нейромедиатора, что позволит использовать её в биотехнологических методах проращивания культур, а также сохранения и поддержания жизнеспособности проб.

Исследования экологического сообщества микроорганизмов, сообщающихся путём нейромедиаторного взаимодействия, проводились ещё в начале 20-го века: в 1937 году было открыто биологическое явление, при котором отмечалось ингибирующее действие организма на другие организмы с помощью выделения в среду специфических соединений, получившее название аллелопатия. Этот термин происходит от греческих слов *allelo* – взаимный и *pathos* – вред. В основе этого процесса лежит принцип двух организмов: тот, на которого вещества нацелены, является таргетным, а тот, который выделяет вещества, воздействующие на другие организмы, – донорным.

Аллелопатия изначально была изучена в качестве ингибирования конкурентных организмов, произрастающих на той же территории, что и донорные, данный эффект хорошо выражен у цианобактерий (например: *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena Dolichospermum*, *Aphanizomenon*), хорошо выдерживающих конкуренцию среди прочих отделов водорослей, выделяя в среду ядовитые вещества (микроцистины, сакситоксины, анатоксины), поражающие соседние организмы, но при этом не оказывающие действия на особей своего вида. Помимо этого, у водорослей, культивируемых в биотехнологических условиях, присутствует процесс самоингибирования, проявляющегося как в ходе обильного поглощения питательных веществ и их дальнейшей редукции развития

или гибели, так и из-за выделения собственных метаболитов (одна из причин трудности культивирования диатомовых водорослей).

Вещества с аллелопатической активностью способны вызывать разнообразные негативные эффекты, от слабого подавления роста до гибели целевого организма. Но, помимо этого, водоросли обладают способностью вступать в мутуалистические отношения, а также стимулировать рост друг друга путём выделения нейромедиаторов в среду. Отличным примером данного процесса в природных популяциях служат колонии диатомовых водорослей *Pseudonitzschia fraudulenta*, которые объединяются с колониями-цепочками *Chaetoceros socialis* для лучшей защиты от поедающих их животных [5]. Соответственно, в современном смысле если воспринимать слово аллелопатия как взаимодействие организмов, то в качестве более точного описания может быть предложен термин аллелоэргия (от греческого слова *érgon* – действие), или же использование уже существующих: симбиоз, сосуществование, ассоциирование или взаимодействие. Что заведомо будет подразумевать в себе взаимодействие двух и более организмов, как ингибирующее, так и стимулирующее.

Биогенные амины могут выступать как регуляторы роста микроводорослей. Многие нейромедиаторы способны влиять на процессы клеточного деления, метаболизма и фотосинтеза у микроорганизмов. У некоторых одноклеточных эукариот обнаружены рецепторы к биогенным аминам и системы вторичных мессенджеров, что свидетельствует об их сигнальной функции даже на ранних этапах эволюции. В культурах микроводорослей умеренное добавление биогенных аминов (1-10 мкМ) часто приводит к увеличению биомассы и изменению содержания пигментов [2].

Ацетилхолин, дофамин, серотонин, гистамин, норадреналин, а также таурин встречаются в морских и пресноводных водорослях [6] стимулируют (в различной степени) рост зеленых микроводорослей рода *Chlorella*. Показано стимулирующее действие серотонина, дофамина, норадреналина, гистамина, ацетилхолина на рост микроводоросли *Scenedesmus quadricauda*. Многие виды водорослей (представители *Chlorophyta*, *Charophyta*, *Ochromyces*, *Rhodophyta*) синтезируют значительные количества дофамина, серотонина, гистамина, тирамина, ацетилхолина и других нейромедиаторов. Гистамин накапливается, например, в клетках разных водорослей. Наибольшее его содержание на данный момент зафиксировано в клетках красных водорослей до концентраций 60-500 мг/г биомассы [3].

Дофамин является катехоламином, способным воздействовать на рост микроводорослей. Эксперименты с культурой *Chlorella vulgaris*

показали, что добавление дофамина в концентрациях 1-10 мкМ стимулирует увеличение числа клеток на ранних стадиях культивирования [2]. Однако при повышении концентрации (например, до 100 мкМ) стимулирующий эффект исчезает. Среди полиненасыщенных жирных кислот, дофамин уменьшает процентное содержание α -линоленовой и увеличивает концентрацию линоленовой кислоты; те же концентрации дофамина существенно увеличивают процентное содержание моновенасыщенных и особенно насыщенных жирных кислот, например, содержание стеариновой и пальмитиновой кислот увеличивается на 81 и 54% при 10 мкМ дофамина, по сравнению с контролем, в следствие чего, может наблюдаться ингибирование роста [2].

Также, дофамин образуется макроводорослями *Ulvaria obscura*, которые используют его для предотвращения поедания этих водорослей морскими ежами, брюхоногими, а также членистоногими [4]. Поэтому данная макроводоросль должна стимулировать рост микроводорослей при условии, что не превышен концентрационный порог, за которым прекращается стимулирующее рост действие дофамина [7].

Имеются данные о действии добавленного серотонина на рост зеленых микроводорослей. Серотонин не вызывал статистически достоверной стимуляции роста *Chlorella vulgaris* при самой низкой тестируемой концентрации 1 мкМ. Однако более высокая концентрация серотонина 10 мкМ, приводила к заметному рост-стимулирующему действию. Дальнейшее повышение концентрации ослабляло это действие и самая высокая тестированная концентрация серотонина (100 мкМ) вовсе не стимулировала рост *C. vulgaris*. При этой максимальной концентрации серотонина наблюдали выпадение в осадок значительной части биомассы водоросли, что указывало на токсическое действие серотонина [7].

Серотонин в концентрациях 10 и 100 мкМ снижает (на 16 и 12%, соответственно) общее содержание жирных кислот в клетках. Данная концентрация незначительно снижает процентное содержание линолевой и α -линоленовой кислот при таком же незначительном увеличении процентного содержания моновенасыщенных жирных кислот [2]. Также серотонин в концентрации 1-10 мкМ заметно увеличивает процентное содержание насыщенных жирных кислот. Например, содержание миристиновой и стеариновой кислот повышается на 52% и 86%, соответственно, при концентрации серотонина 1 мкМ [2].

Кроме того, производный серотонина – мелатонин в некоторых видах микроводорослей может изменять содержание фотосинтетических пигментов, влияя на фотосинтетическую

активность и изменение светового дня и формирование покоящихся форм водоросли – цист [7].

Гистамин является одним из наиболее эффективных стимуляторов роста микроводорослей. В исследованиях на *Scenedesmus quadricauda* было показано, что гистамин способен увеличивать накопление биомассы примерно на 65 % по сравнению с контролем при оптимальных концентрациях. Однако, как и с другими биогенными аминами, при высоких концентрациях наблюдается противоположный эффект – ингибирование роста культуры. Кроме того, гистамин может стимулировать синтез каротиноидов и других фотосинтетических пигментов в некоторых микроводорослях.

Гистамин в концентрациях 1 и 10 мкМ незначительно (максимум на 13% при 1 мкМ) увеличивает суммарное содержание полиненасыщенных жирных кислот в клетках (16:2, 16:3, 16:4 и α -линоленовой кислоты), однако при этом гистамин уменьшает процентное содержание всех мононенасыщенных и особенно насыщенных кислот; например, процентное содержание стеариновой и миристиновой кислот снижается на 45 и 42%, соответственно, при концентрации гистамина 1 мкМ [2].

Действие гистамина на рост микроводорослей аналогично таковому у серотонина и дофамина, но отличается большей амплитудой рост-стимулирующего действия. У *C. vulgaris* гистамин в концентрациях 1 и 10 мкМ вызывал, соответственно, 65%-ную и 100%-ную стимуляцию роста культуры этой микроводоросли. Повышение концентрации гистамина до 100 мкМ оказывало ингибирующее влияние: количество клеток *C. vulgaris* оказывалось существенно меньше, чем в контрольной культуре (без добавки гистамина) [1]. У *S. quadricauda* действие гистамина было несколько менее выраженными и соответствовало 37,5%-ной и 65%-ной стимуляции роста при добавлении 1 и 10 мкМ гистамина. При 100 мкМ гистамина, в отличие от *C. vulgaris*, в культуре *S. quadricauda* наблюдали не ингибирование роста, а лишь ослабление стимулирующего влияния на ее рост [1].

Подобно серотонину, в отношении гистамина можно предположить наличие двух механизмов действия: 1) специфического (возможно, зависящего от рецепторов) при низких концентрациях; по аналогии с опухолевыми клетками (у которых гистамин стимулирует пролиферацию) и 2) неспецифического, предположительно связанного с разобщающим действием на биомембраны, при более высоких концентрациях [1].

Ранее было установлено, что, по сравнению с дофамином, норадреналин оказывает значительно более слабое стимулирующее действие на рост *S. quadricauda* [1], а также *C. vulgaris* [1, 6]. Норадреналин не вызывает существенных изменений в общем

содержании жирных кислот; – среди полиненасыщенных жирных кислот, норадреналин при концентрации 10 мкМ увеличивает процентное содержание наиболее ненасыщенной жирной кислоты (16:4), а при концентрации 1 мкМ он повышает содержание α -линоленовой кислоты и снижает содержание некоторых насыщенных жирных кислот (миристиновой и стеариновой кислот); – низкие (1 мкМ) концентрации норадреналина увеличивают, а более высокие (10 и 100 мкМ) снижают процентное содержание насыщенных жирных кислот [2].

Эксперименты показали, что добавление норэпинефрина может слегка стимулировать рост *C. vulgaris* и *S. quadricauda*, хотя его эффект обычно менее выражен, чем у гистамина. Кроме того, норэпинефрин может повышать содержание хлорофилла и каротиноидов у данных микроводорослей [1].

Ацетилхолин в концентрациях 10 и 100 мкМ увеличивает содержание жирных кислот в клетках на 65 и 58%, соответственно, что согласовывалось с данными литературы о других микроводорослях, относящихся к роду *Chlorella* [3, 4]. Ацетилхолин увеличивает процентное содержание таких полиненасыщенных жирных кислот, как линолевая и α -линоленовая кислоты на 56 и 27%, соответственно. Ацетилхолин уменьшает процентное содержание всех насыщенных (миристиновой, стеариновой и пальмитиновой кислот) и некоторых мононенасыщенных (миристолеиновой и пальмитолеиновой) жирных кислот [2].

Ацетилхолин стимулирует рост зеленых микроводорослей рода *Chlorella* в концентрациях от 0,1 мкМ до 10-100 мкМ [8], способствует накоплению в их клетках липидов, в том числе ненасыщенных, в особенности – содержащих биотехнологически ценную 1 α -линоленовую кислоту [3].

Ацетилхолин также способствует накоплению липидов, особенно ненасыщенных [2], и повышает концентрацию хлорофиллов. Экспериментальные исследования показали, что ацетилхолин может стимулировать синтез каротиноидов и хлорофиллов у *Haematococcus lacustris*. Это указывает на возможность участия ацетилхолина в регуляции фотосинтетического аппарата и перехода клеток между различными физиологическими состояниями. Ацетилхолин был обнаружен в одном виде каждого из харофитов, охрофитов и родофитов с использованием хроматографии или ЯМР-спектроскопии.

Заключение

Из исследованной выше литературы можно предположить следующие несколько функций нейромедиаторов в клетках одноклеточных зелёных водорослей:

Биогенные амины могут выделяться животными организмами и воздействовать на фитопланктон как сигнальные молекулы, что обуславливает их химическую коммуникацию в экосистемах.

Биогенные амины могут регулировать клеточное деление, гипотетически активируя внутриклеточные сигнальные каскады, влияющие на цикл клеточного деления.

Нейромедиаторы способны влиять на эффективность фотосинтеза, изменяя содержание хлорофиллов и каротиноидов.

Некоторые биогенные амины могут запускать защитные механизмы и усиливать синтез каротиноидов и первичных метаболитов, индуцируя стрессовый ответ.

Данные свойства нейромедиаторов не стоит недооценивать, так как количественная стимуляция роста и накопления веществ в микроводорослях может быть искусственно индуцирована человеком внутри биореакторов, чашек Петри и проб отбора. Исследование влияния биогенных аминов на микроводоросли имеет важное прикладное значение в качестве увеличения выхода биомассы, к примеру, для производства биотоплива или регулирования синтеза каротиноидов и других ценных метаболитов, переводя эти эффекты на «язык микроорганизмов», человечество сможет добиться прорыва в биотехнологической отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Браун В.Л.-младший, Эйснер Т., Уиттакер Р.Х. Алломоны и кайромоны: трансспецифические химические мессенджеры // Бионаука. 1970. Том 20. № 1. С. 21–22
2. Влияние биогенных аминов на накопление биомассы, содержание фотосинтетических пигментов и жирных кислот у цианобактерии *limnospira platensis ippas b-256* / Б. Цао, Т. А. Федоренко, О. Б. Чивкунова и др. // Микробиология. – 2026. – Т. 95, № 1. – С. 68–84.
3. Черпак Р., Байгуз А., Джевец П., Мушинска Гарстка М. Влияние ацетилхолина и таурина на содержание некоторых метаболитов в водоросли *Chlorella vulgaris*. Экогидрол. Гидробиол. 2003;3(2):223–229.
4. Исса С., Гамелон М., Цисельски Т.М., Вике-Джонс К., Асимакопулос А.Г., Ясперс В.Л.Б., Эйнуи С. Дофамин опосредует реакции жизненного цикла дафний на обилие пищи // Proc. Royal Soc. B. 2020. Vol. 287. N 1930: 20201069.
5. Дж.Б. Райнс, П.Л. Донахей, М.М. Декшениекс, Дж.М. Салливан, М.С. Твардовский. (2002). Тонкие слои и камуфляж: скрытые виды *Pseudo-nitzschia*. (Bacillariophyceae) во фьорде на

островах Сан-Хуан, Вашингтон, США. Мар Экол. Прог. Сер. 225, 123-137;

6. Олескин А.В., Постнов А.Л., Боян С. Влияние биогенных аминов на рост культуры *Chlorella vulgaris* // Журнал фармакологии и питания. 2021. Том 11.

7. Олескин Александр Владимирович, Боян Цао Взаимодействие нейротрансмиттеров с микроводорослями: концептуальные и практические аспекты // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. 2023. №3.

8. Парсайемехр А., Сунь Ч., Доу Х., Чен Ю.Ф. Одновременное улучшение производства биодизеля из микроводорослей и высокоценной альфа-линоленовой кислоты с помощью одного регулятора – ацетилхолина. Биотехнология. Биотопливо. 2015;8(1):11.

9. Рамакришна А., Мурхерджи С. Новые данные о механизмах передачи сигналов нейротрансмиттерами в растениях // Plant Signal. 2020. Том 15. № 6: 1737450.

10. Ван Астлайн К.Л., Харви И.Л., Каталдо М. Влияние дофамина, соединения, выделяемого макроводорослью *Ulvaria obscura* (Chlorophyta), вызывающей «зеленый прилив», на личинки и молодь морских водорослей и беспозвоночных. // Фикология. 2014. Том 53. № 2. С. 195–202.

11. Ван Алстайн К.Л., Риджуэй Р.Л., Нельсон А. Нейротрансмиттеры в морских и пресноводных водорослях // Нейротрансмиттеры в растениях: перспективы и области применения / Под ред. А. Рамакришны и В.В. Рощины. Бока-Ратон: CRC Press, 2018. С. 27–36.

12. Ву К., Дзанг К.С., Ванг Х.Д., Дзанг К., Ю К., Ли В., Дзоу М.Л., Ванг К.Л. Астаксантин активизирует путь ядерного фактора эритроидного фактора 2 и антиоксидантного ответного элемента (Nrf2-ARE) в головном мозге после субарахноидального кровоизлияния у крыс и ослабляет раннее повреждение головного мозга. Mar. Drugs. 2014;12(12):6125–6141

13. Йен Х.-В., Ху И.-Ч., Чен Ч.-Ю., Хо С.-Х., Ли Д.-Дж., Чанг Дж.-С. Биопереработка на основе микроводорослей – от биотоплива к природным продуктам // Технология биоресурсов. 2013. Т. 135. С. 166–174.

14. Чжан Ч., Хо С.-Х., Ли А., Фу Л., Чжоу Д. Совместное культивирование *Chlorella* и *Scenedesmus* может повысить общее производство липидов в условиях стресса, вызванного молекулами, участвующими в механизме кворумного зондирования бактерий // Журнал водоочистной техники. 2021. Т. 39. С. 101739.

15. Чжан С., Хо Х., Мэн Ф. Культивирование системы частичной нитрификации водорослево-бактериальных гранул: эффективность, производство липидов и биологическое сообщество // Загрязнение воды, воздуха и почвы. 2020. Т. 231. № 5. С. 236.

16. Чжао С., Го М., Ван И., Цзинь М., Хоу Н., У Х. Токсическое воздействие нанопластиков на биологическое удаление азота в искусственных водно-болотных угодьях: данные об использовании и метаболизме железа // Исследования воды. 2024. Т. 256. С. 121577.

REFERENCES

1. Brown W.L.Jr., Eisner T., Whittaker R.H. Allomones and kairomones: transpecific chemical messengers // Bio-science. 1970. Vol. 20. N 1. P. 21–22

2. Study of biogenic amines on biomass accumulation, content of photosynthetic pigments and fatty acids in cyanobacteria *limnospira Platensis* ippas b-256 / B. Cao, T. A. Fedorenko, O. B. Chivkunova et al. // Microbiology. - 2026. - Vol. 95, No. 1. - P. 68–84. Czerpak R., Bajguz A., Jewiec P., Muszynska Garstka M. The influence of acetylcholine and taurine on the content of some metabolites in the alga *Chlorella vulgaris*. Ecohydrol. Hydrobiol. 2003;3(2):223–229.

3. Czerpak R., Bajguz A., Drzewiec P., Muszynska Garstka M. Test acetylcholine and taurine for the content of some metabolites in *Chlorella vulgaris* water. Ecohydrol. Hydrobiol. 2003;3(2):223–229.

4. Issa S., Gamelon M., Cisielski T.M., Vike-Jones K., Asimakopoulos A.G., Jaspers V.L.B., Einum S. Dopamine mediates life-history responses to food abundance in *Daphnia* // Proc. Royal Soc. B. 2020. Vol. 287. N 1930: 20201069.

5. JEB Rines, PL Donaghay, MM Dekshenieks, JM Sullivan, MS Twardowski. (2002). Thin layers and camouflage: hidden *Pseudonitzschia* spp. (Bacillariophyceae) populations in a fjord in the San Juan Islands, Washington, USA. Mar. Ecol. Prog. Ser.. 225, 123-137;

6. Oleskin A.V., Postnov A.L., Boyang C. Impact of biogenic amines on the growth of a *Chlorella vulgaris* culture // J. Pharm. Nutr. Sci. 2021. Vol. 11.

7. Oleskin Alexander Vladimirovich, Boyan Cao Interaction of neurotransmitters with microalgae: conceptual and practical aspects // Bulletin of Moscow University. Series 16. Biology. 2023. No. 3.

8. Parsaiemehr A., Sun Z., Dou X., Chen Y.F. Simultaneous improvement in production of microalgal biodiesel and high-value alpha-linolenic acid by a single regulator acetylcholine. Biotechnol. Biofuels. 2015;8(1):11.

9. Ramakrishna A., Murherjee S. New insights on neurotransmitter signaling mechanisms in plants // *Plant Signal*. 2020. Vol.15. N 6: 1737450.
10. Van Alstyne K.L., Harvey E.L., Cataldo M. Effects of dopamine, a compound released by the green-tide macroalga *Ulvaria obscura* (Chlorophyta), on marine algae and invertebrate larvae and juveniles // *Phycologia*. 2014 Vol. 53. N 2.P. 195–202.
11. Van Alstyne K.L., Ridgway R.L., Nelson A. Neurotransmitters in marine and freshwater algae // *Neurotransmitters in plants: Perspectives and applications* / Eds. A. Ramakrishna and V.V. Roshchina. Boca Raton: CRC Press, 2018. P. 27–36.
12. Wu Q., Zhang X.S., Wang H.D., Zhang X., Yu Q., Li W., Zhou M.L., Wang X.L. Astaxanthin activates nuclear factor erythroid-related factor 2 and the antioxidant responsive element (Nrf2-ARE) pathway in the brain after subarachnoid hemorrhage in rats and attenuates early brain injury. *Mar. Drugs*. 2014;12(12):6125–6141
13. Yen H.-W., Hu I.-C., Chen C.-Y., Ho S.-H., Lee D.-J., Chang J.-S. Microalgae-based biorefinery – From biofuels to natural products // *Bioresource Technology*. 2013. V. 135. P. 166–174.
14. Zhang C., Ho S.-H., Li A., Fu L., Zhou D. Co-culture of *Chlorella* and *Scenedesmus* could enhance total lipid production under bacteria quorum sensing molecule stress // *Journal of Water Process Engineering*. 2021. V. 39. P. 101739.
15. Zhang S., Huo H., Meng F. Partial Nitrification Algal-Bacterial Granule System Cultivation: Performance, Lipid Production and Biological Community // *Water Air Soil Pollut*. 2020. V. 231. № 5. P. 236.
16. Zhao X., Guo M., Wang Y., Jin M., Hou N., Wu H. Toxic effects of nanoplastics on biological nitrogen removal in constructed wetlands: Evidence from iron utilization and metabolism // *Water Research*. 2024. V. 256. P. 121577.

Информация об авторах

А.Р. Махматов – студент 3 курса института природы и человека ФБГОУ УУНиТ;

Л.А. Гайсина – профессор, доктор биологических наук ФГБОУ «БГПУ им. М.Акмеллы».

Information about the author

A.R. Makhmutov – 3rd year student at the Institute of Nature and Humanity, FBGOU UUNiT;

L.A. Gaisina – Professor, Doctor of Biological Sciences, BSPU named after M.Akmulla".

Вклад авторов

А.Р. Махматов – сбор, обработка проб, написание текста;

Л.А. Гайсина – коррективировка текста, поиск литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

A.R. Makhmutov – collecting, processing samples, writing text;

L.A. Gaisina – text correction, literature search.

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 26.04.2026; принята к публикации 03.06.2026.

The article was submitted 26.04.2026; accepted for publication 03.06.2026.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 581.5

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-72-80

ЛИСТОЯДНЫЕ ВРЕДИТЕЛИ ЛИПЫ МЕЛКОЛИСТНОЙ В УСЛОВИЯХ УФЫ (ЛИПОВЫЕ НАСАЖДЕНИЯ ОКОЛО БГПУ ИМ. М. АКМУЛЛЫ)

**Амина Раисовна Рахматуллина¹, Венер Нуруллович
Саттаров²**

^{1,2}*Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы, Уфа, Россия, wener5791@yandex.ru*

¹*Оренбургский государственный педагогический университет,
Оренбург, Россия, rakhmatullina.a.r@bspu.ru*

Аннотация. Современные урбанизированные территории представляют собой экологическую нишу, характеризующуюся наличием специфических стрессовых факторов, оказывающих существенное влияние на рост и развитие растительных сообществ. Как известно, ключевыми лимитирующими факторами, ограничивающими жизнеспособность растений в условиях города, являются абиотические нагрузки и эдафические проблемы. Состояние регулярной угнетенности городских насаждений закономерно приводит к снижению их иммунологической устойчивости, что делает их гораздо более уязвимыми к поражению фитопатогенами (бактериальными и грибковыми заболеваниями) и массовому размножению вредителей. Дальнейшие исследования в области урбанистической экологии и фитопатологии необходимы для разработки научно обоснованных стратегий озеленения, направленных на повышение устойчивости и долговечности городских зеленых насаждений. Цель работы – оценка листоядных вредителей (членистоногих-филлофагов) липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) около ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы». Исследования проводили в течение вегетации на липе мелколистной, сбор осуществляли обтряхиванием ветвей внутри энтомологического сачка и на расстеленный под кроной дерева полог. Имаго усыпляли и этикетировали. Личинок выкармливали в лаборатории до окукливания. Поврежденные листовые пластинки собирали и готовили гербарные материалы. При идентификации использовали монографию «Вредители сельскохозяйственных культур и лесных насаждений». Исследования позволили идентифицировать на *Tilia cordata* Mill. представителей

следующих отрядов: Hemiptera и Trombidiformes (по три вида, или по 23,08%), Coleoptera, Hymenoptera, Diptera по одному виду или по 7,69%, Lepidoptera – 4 вида (30,77% от общего числа видов). При этом, большая часть членистоногих являются полифагами, только 4 вида являются специализированные монофагами.

Ключевые слова: липа мелколистная, вредители, членистоногие, Уфа, Республики Башкортостан

Для цитирования: Рахматуллина А.Р., Саттаров В.Н. Листоядные вредители липы мелколистной в условиях Уфы (липовые насаждения около БГПУ им. М. Акмуллы) // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №2. С. 72-80.

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

DECIDUOUS PESTS OF SMALL-LEAVED LINDEN IN UFA CONDITIONS (LIME TREES NEAR THE Akmulla Bashkir State Pedagogical University)

Amina R. Rakhmatullina¹, Vener N. Sattarov²

^{1,2}*Akmulla Bashkir State Pedagogical University, Ufa, Russia,
wener5791@yandex.ru*

¹*Orenburg State Pedagogical University, Orenburg, Russia,
rakhmatullina.a.r@bspu.ru*

Abstract. Modern urbanized territories represent an ecological niche characterized by the presence of specific stress factors that have a significant impact on the growth and development of plant communities. As is known, the key limiting factors limiting the viability of plants in urban conditions are abiotic loads and edaphic problems. The state of regular oppression of urban plantings naturally leads to a decrease in their immunological resistance, which makes them much more vulnerable to damage by phytopathogens (bacterial and fungal diseases) and mass reproduction of pests. Further research in the field of urban ecology and phytopathology is needed to develop evidence-based landscaping strategies aimed at increasing the sustainability and longevity of urban green spaces. The purpose of the work is to evaluate the deciduous pests (arthropods-phylophages) of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) near Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla. The research was carried out during the growing season on small-leaved linden, the collection was carried out by shaking the branches inside the entomological net and on the canopy spread under the crown of the tree. Imago was euthanized and

labeled. The larvae were fed in the laboratory before pupation. Damaged leaf blades were collected and herbarium materials were prepared. The monograph "Pests of agricultural crops and forest plantations" was used for identification. Studies have made it possible to identify representatives of the following orders on *Tilia cordata* Mill.: Hemiptera and Trombidiformes (three species each, or 23.08%), Coleoptera, Hymenoptera, Diptera by one species or 7.69%, Lepidoptera – 4 species (30.77% of the total number of species). At the same time, most arthropods are polyphages, only 4 species are specialized monophages.

Keywords: small-leaved linden, pests, arthropods, Ufa, Republic of Bashkortostan

For citation: Rakhmatullina A.R., Sattarov V.N. Leaf-eating pests of small-leaved linden in Ufa (linden plantations near the M. Akmulla Bashkir State Pedagogical University) // Bulletin of the Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla. Series: Natural Sciences. 2026. No.2. pp. 72-80.

Введение

Современные урбанизированные территории представляют собой экологическую нишу, характеризующуюся наличием специфических стрессовых факторов, оказывающих существенное влияние на рост и развитие растительных сообществ. Как известно, ключевыми лимитирующими факторами, ограничивающими жизнеспособность растений в условиях города, являются абиотические нагрузки и эдафические проблемы. Среди абиотических факторов эксперты выделяют высокую степень загазованности и запыленности атмосферного воздуха, нарушающая газообмен и фотосинтетическую активность, а также нарушение теплового баланса, обусловленное эффектом «теплового острова» города, приводящее к изменению температурных режимов приземного слоя атмосферы. Дополнительным стрессовым фактором являются колебания температурного режима почвы, спровоцированные наличием подземных коммуникаций и интенсивной застройкой. Эдафические (почвенные) проблемы включают уплотнение городских почв, снижающее пористость и аэрацию корневых систем, а также присутствие в почве токсичных соединений, таких как тяжелые металлы и антиобледенительные реагенты, оказывающие негативное влияние на метаболизм растений. Совокупность этих факторов существенно затрудняет метаболические процессы, замедляет ростовые фазы (вегетационный период, цветение, плодоношение) и сокращает биологическую долговечность древесных культур.

В этой связи, как отмечают специалисты [1, 2, 3, 4], древесные насаждения в урбанизированной среде функционируют в условиях

постоянного стресса, обусловленного комплексным воздействием неблагоприятных факторов биотического и антропогенного характера. Состояние регулярной угнетенности городской флоры закономерно приводит к снижению их иммунологической устойчивости, что делает их гораздо более уязвимыми к поражению фитопатогенами (бактериальными и грибковыми заболеваниями) и массовому размножению вредителей. Дальнейшие исследования в области урбанистической экологии и фитопатологии необходимы для разработки научно обоснованных стратегий озеленения, направленных на повышение устойчивости и долговечности городских зеленых насаждений.

Цель работы – оценка листовых вредителей (членистоногих-филлофагов) липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) около ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы» ($54^{\circ}43'27''$ с. ш. $55^{\circ}56'56''$ в. д.).

Материал и методы исследования

Исследования листовых вредителей проводили в течение вегетации на липе мелколистной около БГПУ им. М. Акмуллы (рис. 1).



Рис. 1 – Территория исследования

Сбор осуществляли обтряхиванием ветвей липы мелколистной (рис. 2) внутри энтомологического сачка и на расстеленный под кроной дерева полог. Имаго усыпляли и этикетировали. Личинок

выкармливали в лаборатории до окукливания. Поврежденные листовые пластинки собирали и готовили гербарные материалы. При идентификации использовали монографию «Вредители сельскохозяйственных культур и лесных насаждений» (1987) [5].



Рис. 2 – Липа мелколистная

Результаты и их обсуждение

Из отряда Hemiptera выявлены три вида: *Eucallipterus tiliae* L., 1758 (синонимы: *Callipterus tiliae* L., 1758, *Myzocallis tiliae* L., 1758, *Philyriptus tiliae* L., 1758, *Pterocallis tiliae* L., 1758, *Therioaphis tiliae* L., 1758), семейство Aphididae; *Lygocoris viridis* (Fallen, 1807) (синонимы: *Cimex fuscomaculatus* Goeze, 1778; *Cimex obfuscatus* Gmelin, 1790; *Cimex viridescens* Geoffroy, 1785; *Lygaeus viridis* Fallen, 1807; *Lygocoris commutatus* (Fieber, 1858); *Lygocoris fuscomaculatus* (Goeze, 1778); *Lygocoris obfuscatus* (Gmelin, 1790); *Lygocoris viridescens* (Geoffroy, 1785); *Lygocoris viridis* Carvalho, 1959; *Lygus commutatus* Fieber, 1858; *Lygus viridis* Wagner, 1961.); *Palomena prasina* (Linnaeus, 1761) (рис. 3).

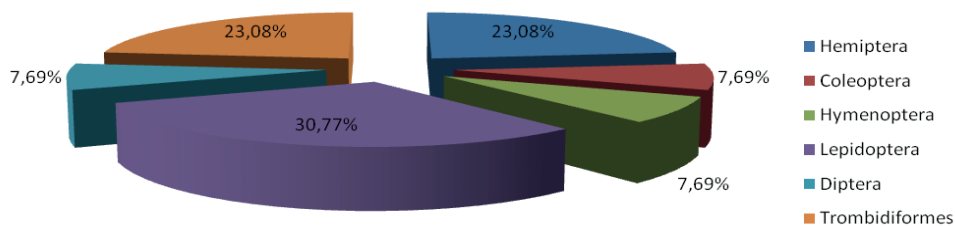


Рис. 3 – Доля встречаемости представителей идентифицированных отрядов (%)

По одному виду представлены отряда Coleoptera - *Phyllobius argentatus* (Linnaeus, 1758) и Hymenoptera - *Parna tenella* (Klug, 1814) (синонимы: *Blennocampa tiliae* Kaltenbach, 1874; *Tenthredo tenella* Klug, 1816).

Четыре вида идентифицированы из отряда Lepidoptera: *Stigmella tiliae* (Frey, 1856) (синоним: *Neptacula tiliae* Frey, 1856.), *Archips crataegana* (Hübner, [1796–1799]), *Ptycholoma lecheana* (Linnaeus, 1758) (синонимы: *Ptycholoma magnificana* H.-S.; *Ptycholoma lecheana circumclusana* Chr.; *Cacoecia circumclusana* Chr.), *Plagodis dolabraria* (Linnaeus, 1767) (синонимы: *Ennomos dolabraria*, *Eurymene dolabraria*, *Phalaena dolabraria*, *Phalaena dolabraria* Borkhausen, 1794, *Phalaena ustulataria* Hufnagel, 1767, *Plagodis aestiva* Diószeghy, 1935, *Plagodis atrox* Zerny, 1908).

Отряд Diptera представлен только одним видом: *Didymomyia tiliacea* (Bremi, 1847) (синоним: *Didymomyia reaumuriana* (Löw, 1878).

В отряде Trombidiformes выявлено три вида: *Eriophyes tiliae* var. *rudis* Nalepa, 1918, *Eriophyes tiliae* var. *nervalis* Nalepa 1918 (синонимы: *Eriophyes nervalis*, *Eriophyes tiliaceus* Nalepa), *Eriophyes tetratrichus stenoporus* Nalepa, 1918 (рис. 3).

Фитофаги, как неотъемлемый компонент биоценозов, оказывают многогранное воздействие на древесные породы, приводя к морфологическим изменениям, снижению продуктивности и ослаблению растений. Питание вида *Eucallipterus tiliae* осуществляется путем высасывания соков из листьев, что приводит к их значительной деформации, уменьшению размеров листовой пластинки и преждевременному опаданию. Также тли выделяют большое количество сладкой жидкости – медвяной пади, которая привлекает других насекомых и является питательной средой для развития сапрофитных микроскопических грибов на листьях

Lygocoris viridis проявляют трофическую специфичность, питаются соками репродуктивных органов растений, что может негативно сказываться на процессе цветения и плодоношения.

Palomena prasina характеризуется особенностями высасыванием соков, что наносит ущерб листьям и плодам. Примечательно, что на молодых листочках и побегах остаются характерные бурые пятнышки, которые нарушают нормальное развитие и дальнейший рост пораженных частей растения.

Взрослые особи и личинки *Phyllobius argentatus* причиняют вред, прогрызая листья и цветки. Характер их питания приводит к образованию многочисленных сквозных отверстий, что снижает фотосинтетическую активность растений.

Личинки *Parna tenella* образуют мины на листьях липы. Мины представляют собой вздутые пятна, начинающиеся с краю листа, и могут приводить к его дальнейшему сворачиванию внутрь, что частично скрывает галерею. Данный тип питания является типичным для большинства минирующих насекомых.

Личинки *Stigmella tiliae* также специализируются на питании листьями липы. Их развитие характеризуется формированием галерей - постепенно расширяющихся коридоров, начинающихся как тонкие линии на эпидермисе листа и проникающих в его толщу. Личинки развиваются в межклеточном пространстве между верхней и нижней кожей листа, что обеспечивает им защиту от неблагоприятных внешних условий.

Гусеницы *Archips crataegana* являются полифагами, т.е. способны питаться на широком спектре древесных пород, демонстрируя высокую адаптивность. Гусеницы *Ptycholoma lecheana* повреждают листву и другие вегетативные органы различных деревьев. Взрослые особи *Plagodis dolabraria* питаются нектаром, медвяной росой и древесным соком, в то время как их личинки являются фитофагами, питающимися листвой деревьев.

Didymomyia tiliacea вызывает образование галл на листьях липы. Галлы достигают до 6 мм в диаметре, первоначально зеленые, а по мере созревания приобретают красноватую или коричневую окраску. Их форма варьирует от полусферической до конической, причем на верхней стороне листа они часто имеют более выраженный конусообразный профиль, а на нижней - проявляются как менее заметные вздутия.

Eriophyes tiliae var. *rudis*, *Eriophyes tiliae* var. *nervalis*, *Eriophyes tetratrichus stenoporus* представляют высокоспециализированную группу фитопаразитов. Массовое размножение этих клещей приводит к истощению растений, снижению их жизнеспособности, деформации и преждевременному опаданию листьев. Это, в свою очередь, ведет к

снижению продуктивности древесных пород. Кроме того, они вызывают выраженные деформации тканей растений, а также способны выступать в роли переносчиков вирусных заболеваний. Изучение биоэкологии этих клещей имеет существенное научно-практическое и теоретическое значение для понимания коэволюционных процессов между миниатюризованными фитопаразитами и их растениями-хозяевами. Исследование их взаимодействия позволяет глубже понять сложные механизмы ассоциативных связей между организмами в экосистемах.

Заключение

Таким образом, проведенные локальные исследования позволили идентифицировать на *Tilia cordata* Mill. представителей следующих отрядов: Hemiptera и Trombidiformes (по три вида, или по 23,08%), Coleoptera, Hymenoptera, Diptera по одному виду или по 7,69%, Lepidoptera – 4 вида (30,77% от общего числа видов). При этом, большая часть членистоногих являются полифагами, только 4 вида являются специализированные монофагами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гизатуллина Г.И. Лесоводственно-экологическая характеристика насаждения общего пользования в г. Уфе: 06.03.02 – лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация / автореферат. канд. с.-х. наук – Уфа, 2018. - 23 с.
2. Балдина Е.А. Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне / Е.А. Балдина, П. Константинов, М. Грищенко, М. Варенцов // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. – 2015. – № S. – С. 38-42. – EDN UIQLYF.
3. Балдина, Е.А. Исследование «теплового острова» Москвы по разносезонным снимкам LANDSAT-7/ETM+ / Е.А. Балдина, М.Ю. Грищенко // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 61-69. – EDN OESZWL.
4. Шкляев В.А. Исследование микроклимата города с целью оценки биометеорологических показателей селитебной территории / В.А. Шкляев, Л.Н. Ермакова, Л.С. Шкляева // Географический вестник. – 2010. – № 3(14). – С. 52-59. – EDN NCSIAD.
5. Антонюк С.И. и др. Вредители сельскохозяйственных культур и лесных насаждений: в 3-х т. / К.: Урожай, 1987. - 440с.

REFERENCES

1. Gizatullina G.I. Forestry and ecological characteristics of a public plantation in Ufa: 03/06/02 – forestry, forestry, forest management and

forest taxation / abstract. Candidate of Agricultural Sciences - Ufa, 2018. – 23 p.

2. Baldina, E.A. Investigation of urban heat islands using remote sensing data in the infrared thermal range / E.A. Baldina, P. Konstantinov, M. Grishchenko, M. Varentsov // Earth from space: the most effective solutions. – 2015. – No. S. – pp. 38-42. – EDN UIQLYF.

3. Baldina, E.A. Investigation of the "thermal island" of Moscow based on multi-season LANDSAT-7/ETM+ images / E.A. Baldina, M.Y. Grishchenko // Geoinformatics. - 2011. – No. 3. – pp. 61-69. – EDN OESZWL.

4. Shklyayev V.A., Ermakova L.N., Shklyayeva L.S. Investigation of the microclimate of the city in order to assess biometeorological indicators of residential territory // Geographical Bulletin. – 2010. – № 3(14). – Pp. 52-59. – EDN NCSIAD.

5. Antonyuk S.I. and others. Pests of agricultural crops and forest plantations: in 3 volumes / K.: Harvest, 1987. - 440s.

Информация об авторах

А.Р. Рахматуллина – аспирант, и.о. декана естественно-географического факультета;

В.Н. Самтаров – доктор биологических наук, профессор, зав. кафедрой экологии, географии и природопользования.

Information about the authors

A.R. Rakhmatullina – postgraduate student, acting dean of the Faculty of Natural Sciences and Geography;

V.N. Sattarov – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head. Department of Ecology, Geography and Environmental Management.

Вклад авторов

А.Р. Рахматуллина – сбор, обработка проб, написание текста;

В.Н. Самтаров – коррективировка текста, поиск литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

A.R. Rakhmatullina – collection, processing of samples, writing the text;

V.N. Sattarov – proofreading of the text, literature search;

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 18.05.2026; принята к публикации 18.06.2026.

The article was submitted 18.05.2026; accepted for publication 18.06.2026.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК: 58.071; 58.01/.07; 574.583

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-81-87

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ВНЕКЛЕТОЧНЫХ И ВНУТРИКЛЕТОЧНЫХ МЕТАБОЛИТОВ У РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ВОДОРΟΣЛЕЙ И ЦИАНОБАКТЕРИЙ

**Кристина Борисовна Ухаткина¹, Ангелина Альфретовна
Исмагилова², Яна Андреевна Захарова³, Наталья Викторовна
Суханова⁴**

^{1,2,3,4}Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы, Уфа, Россия, n_suhanova@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты сравнительного спектрофотометрического анализа содержания внеклеточных метаболитов (полисахариды, фенольные соединения, аминокислоты), внутриклеточных запасных веществ (белки, жиры, углеводы) и фотосинтетических пигментов (хлорофиллы *a* и *b*, каротиноиды) у семи штаммов микроскопических водорослей и цианобактерий. Установлено, что максимальным содержанием внутриклеточного белка (409 мг/л) и жиров (91 мг/л) характеризуется штамм *Bracteacoccus cf. giganteus*. Штамм цианобактерии *Bulbonema sp.* демонстрирует наивысшие показатели по содержанию фотосинтетических пигментов – хлорофилла а (134 мг/л) и каротиноидов (207 мг/л), а также внеклеточных полисахаридов (88 мг/л). Профиль внеклеточных аминокислот у всех исследованных видов находится на стабильно высоком уровне (92,9-94,2 мг/л). Полученные данные позволяют рассматривать *Bracteacoccus cf. giganteus* и *Bulbonema sp.* как перспективные объекты для биотехнологического использования.

Ключевые слова: микроводоросли, цианобактерии, вторичные метаболиты, внутриклеточные, пигменты, спектрофотометрия

Для цитирования: Ухаткина К.Б., Исмагилова А.А., Захарова Я.А., Суханова Н.В. Сравнительный анализ содержания внеклеточных и внутриклеточных метаболитов у различных видов микроскопических водорослей и цианобактерий // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №. С. 81-87.

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

**COMPARATIVE ANALYSIS OF EXTRACELLULAR AND
INTRACELLULAR METABOLITE CONTENTS IN VARIOUS
TYPES OF MICROSCOPIC ALGAE AND CYANOBACTERIA**

***Kristina Borisovna Ukhatkina¹, Angelina Alfretozna Ismagilova²,
Yana Andreevna Zakharova³, Natalia Viktorovna Sukhanova⁴***

*^{1,2,3,4}Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla,
Ufa, Russia, n_sukhanova@mail.ru*

Abstract. The article presents the results of a comparative spectrophotometric analysis of the content of extracellular metabolites (polysaccharides, phenolic compounds, amino acids), intracellular storage substances (proteins, fats, carbohydrates) and photosynthetic pigments (chlorophylls *a* and *b*, carotenoids) in seven strains of microscopic algae and cyanobacteria. It was found that the strain *Bracteacoccus cf. giganteus* was characterized by the highest content of intracellular protein (409 mg/l) and fats (91 mg/l). The cyanobacterial strain *Bulbonema sp.* demonstrated the highest content of photosynthetic pigments – chlorophyll a (134 mg/l) and carotenoids (207 mg/l), as well as extracellular polysaccharides (88 mg/l). The profile of extracellular amino acids in all studied species was at a consistently high level (92.9-94.2 mg/l). The obtained data allow us to consider *Bracteacoccus cf. giganteus* and *Bulbonema sp.* as promising objects for biotechnological use.

Key words: microalgae, cyanobacteria, secondary metabolites, intracellular, pigments, spectrophotometry.

For citation: Ukhatkina K.B., Ismagilova A.A., Zakharova Ya.A., Sukhanova N.V. Comparative analysis of the content of extracellular and intracellular metabolites in various species of microscopic algae and cyanobacteria // Bulletin of the Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla. Series: Natural Sciences. 2026. No2. pp. 81-87.

Введение

Микроскопические водоросли и цианобактерии являются продуцентами широкого спектра биологически активных соединений, находящихся применение в фармацевтической, пищевой и косметической промышленности. Метаболическая активность этих организмов позволяет им изменять качественный и количественный состав синтезируемых веществ в зависимости от условий культивирования [4]. В связи с растущим спросом на природные источники белка, полиненасыщенных жирных кислот и

антиоксидантов, актуальным является изучение коллекционных штаммов с целью выявления наиболее продуктивных видов [6]. Целью данной работы является сравнительный анализ содержания первичных и вторичных метаболитов у семи различных видов водорослей и цианобактерий для оценки их биотехнологического потенциала.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования служили семь штаммов из Коллекции водорослей и цианобактерий Башкортостана (BCAC) при БГПУ им. М. Акмуллы: *Bracteacoccus cf. giganteus*, *Scotiellopsis rubescens*, *Nannochloris eucaryotum*, *Chlorella vulgaris*, *Pseudococcomyxa simplex*, *Nostoc sp.*, *Bulbonema sp.*

Культивирование зеленых водорослей осуществляли на среде Болда (BBM), цианобактерий – на среде Z8 при температуре 20-25 °С и фотопериоде 12/12 часов [3].

Для изучения внеклеточных метаболитов культуральную жидкость водорослей и цианобактерий отделяли от клеток фильтрованием. Для экстракции внешних метаболитов к супернатанту добавляли 80% этанол в соотношении 1:5 и выдерживали несколько часов при комнатной температуре. Все количественные измерения выполняли на двухлучевом сканирующем спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (спектральный диапазон 190–1100 нм). Расчет концентраций веществ проводили на основании закона Бугера-Ламберта-Бера [5]. Полисахариды определяли фенол-сернокислым методом (метод Дюбуа) с измерением оптической плотности при длине волны 480-490 нм. Фенольные соединения оценивали при 320 нм. Аминокислоты регистрировали в УФ-диапазоне при 280 нм.

Пигменты (хлорофилл *a*, *b* и каротиноиды) определяли в экстракте 80% этанола. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре при следующих длинах волн: 665 нм (хлорофилл *a*), 645 нм (хлорофилл *b*) и 450 нм (каротиноиды) [2].

Для высвобождения внутриклеточных метаболитов микроводорослей и цианобактерий применяли метод замораживания-оттаивания. Биомассу, оставшуюся на фильтре после отделения среды, замораживали при -20 °С в течение нескольких суток, затем размораживали, гомогенизировали в ступке и экстрагировали дистиллированной водой. Белки определяли спектрофотометрически при 280 и 260 нм по уравнению Варбурга-Христиан [1]. Углеводы измеряли при 480-490 нм. Липиды оценивали в диапазоне 500-600 нм.

Результаты исследования

Анализ внеклеточных метаболитов показал, что содержание аминокислот у всех исследованных штаммов находилось в узком диапазоне высоких значений – от 92,9 до 94,2 мкг/л (табл. 1).

Максимальное накопление полисахаридов (88 мкг/л) и фенольных соединений (530 мкг/л) отмечено у цианобактерии *Bulbonema sp.*

Таблица 1

Содержание внеклеточных метаболитов в водорослях и
цианобактериях

№	Виды водорослей и цианобактерий	Полисахариды, мкг/л	Фенольные соединения, мкг/л	Аминокислоты, мкг/л
1	<i>Bracteacoccus cf. giganteus</i>	72	515	93,7
2	<i>Scotiellopsis rubescens</i>	40	489	93,4
3	<i>Nannochloris eucaryotum</i>	58	503	92,9
4	<i>Chlorella vulgaris</i>	45	495	93,7
5	<i>Pseudococcomyxa simplex</i>	46	494	93,0
6	<i>Nostoc sp.</i>	46	497	93,7
7	<i>Bulbonema sp.</i>	88	530	94,2

Анализ пигментного состава выявил значительное превосходство *Bulbonema sp.* по содержанию хлорофилла *a* (134 мкг/л) и каротиноидов (207 мкг/л). Среди зеленых водорослей лидером по сумме фотосинтетических пигментов оказался *Bracteacoccus cf. giganteus*. Отсутствие хлорофилла *b* у *Nostoc sp.* и *Bulbonema sp.* соответствует их таксономической принадлежности к цианобактериям. Данные содержания пигментов в водорослях представлены в таблице 2.

Таблица 2

Содержание пигментов в водорослях и цианобактериях

№	Виды водорослей и цианобактерий	Хлорофилл a, мкг/л	Хлорофилл b, мкг/л	Каротиноиды, мкг/л
1	<i>Bracteacoccus cf. giganteus</i>	108	119	175
2	<i>Scotiellopsis rubescens</i>	68	75	105
3	<i>Nannochloris eucaryotum</i>	95	101	142
4	<i>Chlorella vulgaris</i>	83	87	126
5	<i>Pseudococcomyxa simplex</i>	76	83	119

6	<i>Nostoc sp.</i>	79	-	119
7	<i>Bulbonema sp.</i>	134	-	207

Наибольший практический интерес представляют данные по внутриклеточным запасным веществам. *Bracteacoccus cf. giganteus* продемонстрировал максимальную питательную ценность, накопив 409 мкг/л белка и 91 мкг/л липидов. Это подтверждает литературные сведения о способности представителей рода *Bracteacoccus* к накоплению масла [4]. *Chlorella vulgaris*, традиционно используемая в биотехнологии, показала средние значения по белку (322 мкг/л), уступив *Scotiellopsis rubescens* (336 мкг/л) (табл. 3).

Таблица 3

Состав внутриклеточных метаболитов водорослей и
цианобактерий

№	Виды водорослей и цианобактерий	Белки, мкг/л	Углеводы, мкг/л	Жиры, мкг/л
1	<i>Bracteacoccus cf. giganteus</i>	409	64	91
2	<i>Scotiellopsis rubescens</i>	336	20	25
3	<i>Nannochloris eucaryotum</i>	312	40	56
4	<i>Chlorella vulgaris</i>	322	45	63
5	<i>Pseudococcomyxa simplex</i>	271	22	26
6	<i>Nostoc sp.</i>	345	23	28
7	<i>Bulbonema sp.</i>	378	39	52

Выводы

В результате спектрофотометрического анализа установлены количественные характеристики первичных и вторичных метаболитов для семи штаммов микроводорослей. Штамм *Bulbonema sp.* является лидером по накоплению внеклеточных полисахаридов, фенольных соединений, хлорофилла *а* и каротиноидов, что делает его перспективным источником природных антиоксидантов и пигментов. Штамм *Bracteacoccus cf. giganteus* характеризуется максимальным содержанием внутриклеточного белка и липидов, что свидетельствует о его высоком потенциале для использования в биотехнологии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Barbarino E, Lourenço SO. An evaluation of methods for extraction and quantification of protein from marine macro- and microalgae. 2005. J Appl Phycol 17:447-460.

2. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 // *Biochem Physiol Pfl.* – 2015. – Vol. 167. – P. 191–194.

3. Гайсина Л.А., Фазлутдинова А.И., Кабиров Р.Р. Современные методы выделения и культивирования водорослей: учебное пособие. – Уфа: БГПУ, 2008. – 152 с.

4. Дворецкий Д.С., Темнов М.С., Устинская Я.В., Еськова М.А. Перспективные биотехнологии микроводорослей. – Тамбов: ТГТУ, 2022. – 128 с.

5. Спектрофотометрия в биохимических исследованиях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lab-test.ru/spektrofotometriya-v-biokhimicheskikh-issledovaniyakh/>. – 09.02.2026.

6. Чубчикова И.Н. Влияние состава среды на содержание вторичных каротиноидов у микроводоросли *Scotiellopsis rubescens* // *Морской экологический журнал.* – 2012. – № 4. – С. 95-101.

REFERENCES

1. Barbarino E, Lourenço SO. An evaluation of methods for extraction and quantification of protein from marine macro- and microalgae. 2005. *J Appl Phycol* 17:447–460.

2. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1, and c2 // *Biochem Physiol Pfl.* 2015; vol. 167; pp. 191–194.

3. Gaysina L.A., Fazlutdinova A.I., Kabirov R.R. Modern methods for isolating and cultivating algae: a tutorial. Ufa: BSPU, 2008. 152 p.

4. Dvoretzky D.S., Temnov M.S., Ustinskaya Ya.V., Eskova M.A. Promising biotechnologies of microalgae. – Tambov: TSTU, 2022. – 128 p.

5. Spectrophotometry in biochemical research [Electronic resource]. – Access mode: <https://lab-test.ru/spektrofotometriya-v-biokhimicheskikh-issledovaniyakh/>. – 09.02.2026.

6. Chubchikova I.N. Effect of medium composition on the content of secondary carotenoids in the microalga *Scotiellopsis rubescens* // *Marine Ecological Journal.* – 2012. – No. 4. – pp. 95-101.

Информация об авторах

К.Б. Ухаткина – студент 1 курса, 06.04.01 Биология, направленность (профиль) «Биотехнология», естественно-географический факультет БГПУ им М. Акмуллы;

А.А. Исмагилова – студент 1 курса, 06.04.01 Биология, направленность (профиль) «Биотехнология», естественно-географический факультет БГПУ им М. Акмуллы;

Я.А. Захарова – студент 1 курса, 06.04.01 Биология, направленность (профиль) «Биотехнология», естественно-географический факультет БГПУ им М. Акмуллы;

Н.В. Суханова – заведующий кафедрой биоэкологии и биологического образования, естественно-географический факультет БГПУ им М. Акмуллы.

Information about the author

K.B. Ukhatkina – first-year student, majoring in Biotechnology, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla;

A.A. Ismagilova – first-year student, majoring in Biotechnology, Faculty of Natural Sciences and Geography, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla;

Ya.A. Zakharova – first-year student, majoring in Biotechnology, Faculty of Natural Sciences and Geography, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla;

N.V. Sukhanova – Head of the Department of Bioecology and Biological Education, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla.

Вклад авторов:

К.Б. Ухаткина – проведение исследования, визуализация;

А.А. Исмагилова – сбор материала, научное редактирование текста;

Я.А. Захарова – сбор материала, обработка материала;

Н.В. Суханова – концептуализация, методология;

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

K.B. Ukhatkina – research, visualization;

A.A. Ismagilova – data collection, scientific editing;

Ya.A. Zakharova – data collection, data processing;

N.V. Sukhanova – conceptualization, methodology.

The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; принята к публикации 16.06.2026.

The article was submitted 12.05.2026; accepted for publication 16.06.2026.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 502.521

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-88-96

**ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ ПОЧВЫ ГОРОДА УФЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ТЕСТ-
СИСТЕМЫ**

**Владислав Максимович Чернов¹, Анжелика Ильдаровна
Максютова², Алсу Ришатовна Якупова³, Наталья
Викторовна Суханова⁴**

^{1,2,3,4}Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы, Уфа, Россия
vladcernov936@mail.ru

Аннотация. Почвы городских территорий аккумулируют загрязняющие вещества, что обуславливает необходимость регулярного мониторинга их состояния. Цель работы – оценка токсичности почвы г. Уфа с использованием многокомпонентной тест-системы, включающей организмы разных систематических групп (семена цветковых растений *Lepidium sativum* L., цианобактерию *Nostoc sp.*, зеленую водоросль *Chlorella vulgaris* Beij., эустигматовую водоросль *Vischeria magna* (J.B.Petersen) Kryvenda, Rybalka, Wolf & Friedl). Критериями токсичности служили морфометрические показатели, диаметр колоний и оптическая плотность суспензий. Установлено, что почвенная вытяжка не оказывала угнетающего действия на всхожесть семян и развитие проростков кресс-салата. Наибольшую чувствительность проявила водоросль *Vischeria magna* (снижение оптической плотности в 2,19 раза), тогда как *Chlorella vulgaris* была более толерантна. Результаты свидетельствуют о сильном уровне загрязнения и подтверждают целесообразность применения комплекса тест-объектов.

Ключевые слова: биотестирование, городские почвы, тест-объект, токсичность, цианобактерии, микроскопические водоросли, кресс-салат

Для цитирования: Чернов В.М., Максютова А.И., Якупова А.Р., Суханова Н.В. Оценка токсичности почвы города Уфы с использованием многокомпонентной тест-системы // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №2. С. 88-96.

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

ASSESSMENT OF SOIL TOXICITY IN UFA USING A MULTI-COMPONENT TEST SYSTEM

*Vladislav M. Chernov¹, Anzhelika I. Maksyutova²,
Alsu R. Yakupova³, Natalya V. Sukhanova⁴*

*^{1,2,3,4}M. Akmulla Bashkir State Pedagogical University, Ufa, Russia
vladcernov936@mail.ru*

Abstract. Urban soils accumulate pollutants, necessitating regular monitoring. The objective of this study was to assess the toxicity of Ufa soil using a multicomponent test system comprising organisms from various taxonomic groups (seeds of the flowering plant *Lepidium sativum* L., the cyanobacterium *Nostoc sp.*, the green alga *Chlorella vulgaris* Beij., and the eustigmatic alga *Vischeria magna* (J.B. Petersen) Kryvenda, Rybalka, Wolf & Friedl). Morphometric parameters, colony diameter, and optical density of suspensions served as toxicity criteria. The soil extract was found to have no inhibitory effect on seed germination or the development of garden cress seedlings. *Vischeria magna* showed the greatest sensitivity (a 2.19-fold decrease in optical density), while *Chlorella vulgaris* was more tolerant. The results indicate a high level of contamination and confirm the feasibility of using a complex of test objects.

Key words: biotesting, urban soils, test object, toxicity, cyanobacteria, microscopic algae, watercress.

For citation: Chernov V.M., Maksyutova A.I., Yakubova A.R., Sukhanova N.V. "Assessment of Ufa Soil Toxicity Using a Multicomponent Test System" // Bulletin of the M. Akmulla Bashkir State Pedagogical University. Series: Natural Sciences. Natural Sciences. 2026. No.2. pp. 88-96.

Введение

Почва является депонирующей средой, способной накапливать высокие концентрации элементов. Наиболее подверженными загрязнению оказываются городские почвы с нарушенными естественными процессами самоочищения. В связи с этим необходим мониторинг состояния почвенного покрова урбанизированных территорий и выявление источников их загрязнения [8]. Одним из эффективных подходов к оценке состояния окружающей среды является биотестирование с использованием организмов, чувствительных к различным поллютантам. Традиционно в качестве

тест-объекта используется кресс-салат, обладающий высокой чувствительностью к загрязнению почвы тяжёлыми металлами [6]. В последние десятилетия большое внимание обращено к водным тест-объектам: зеленым водорослям рода *Chlorella* [5], цианобактериям рода *Nostoc* [1], желто-зеленым и эустигматовым водорослям, которые демонстрируют высокую чувствительность к загрязнителям [9].

Целью работы являлась оценка токсичности почвы г. Уфы с использованием тест-организмов различных систематических групп.

Материалы и методы

Исследование проводили в апреле 2025 г. на территории г. Уфы. В качестве опытного участка была выбрана территория сквера Маяковского, которая испытывает интенсивную антропогенную нагрузку, обусловленную выбросами автотранспорта, высоким уровнем рекреационной нагрузки и использованием в зимний период противогололедных реагентов. Аналитическим контролем в опытах с кресс-салатом служила водопроводная вода, в опытах с цианобактериями и водорослями – минеральная питательная среда Z8. В качестве фонового контроля была выбрана территория Черкалинского оврага, характеризующаяся низким уровнем антропогенного воздействия, значительным проективным покрытием и наличием древостоя из хвойных растений. С каждого участка отобрали пробы в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 [2]. Почвенные вытяжки были приготовлены общепринятыми методиками [11]. Для оценки токсичности почвы использовали индекс токсичности фактора (ИТФ) [3,4]: $ИТФ = ТФ_о / ТФ_к$, где ИТФ – индекс токсичности оцениваемого фактора; $ТФ_о$ – значение регистрируемой тест-функции в опыте; $ТФ_к$ – значение регистрируемой тест-функции в контроле.

В качестве тест-объектов использовали:

1. Семена кресс-салата. Оценку токсичности проводили по всхожести семян (%) и изменениям морфологических показателей проростков: длина корня (мм), длина побега (мм) [6].

2. Цианобактерию *Nostoc* sp. Критерием определения токсичности служил диаметр колонии (мм).

3. Микроскопические водоросли *Chlorella vulgaris* (зеленая водоросль) и *Vischeria magna* (эустигматовая водоросль). Определяли оптическую плотность суспензий с использованием спектрофотометрического метода [7].

Опыт выполняли в трёхкратной повторности. Статистическую обработку проводили с использованием пакета Microsoft Office Excel [10].

Результаты и их обсуждение

Биотестирование почвенных вытяжек с использованием семян кресс-салата не выявило существенного влияния на всхожесть семян и развитие проростков данного растения (табл. 1).

Таблица 1

Влияние почвенных вытяжек на семена кресс-салата

Исследуемый участок	Длина корня проростка (мм) / ИТФ		Длина побега проростка (мм) / ИТФ		Всхожесть (%) / ИТФ	
Фоновый контроль	3,51± 1,75	1,25	12,52± 3,56	1,57	78,30± 7,07	1,23
Опытный участок	3,08± 0,83	1,21	10,05 ± 1,06	1,26	81,60 ± 2,33	1,29
Аналитический контроль	0,77± 0,60	-	7,97± 0,46	-	63,30± 4,74	-

Анализ всхожести семян показал, что все участки характеризуются слабым уровнем загрязнения – всхожесть семян составляла 60-90 %, морфометрические параметры проростков, также не выявили выраженного угнетения.

В соответствии со шкалой токсичности фактора [3, 4], было выявлено к какому классу относятся пробы изученных почв по отношению к семенам кресс-салата. ИТФ длины побега, корня и всхожести кресс-салата для фонового контроля и опытных проб показал, что пробы почв относятся к VI классу («стимуляция»), т.е. фактор оказывает стимулирующее влияние на развитие тест-объекта, величина тест-функции превышает уровень контроля.

Динамику роста колоний *Nostoc sp.* анализировали спустя 7 дней после посадки. В опытных пробах замечено снижение диаметра колоний цианобактерии в 1,23 раза (табл. 2), что может свидетельствовать о слабом угнетении роста колонии в данных почвенных вытяжках. В фоновом контроле рост снизился в 1,18 раза относительно аналитической пробы. Значение ИТФ для опытных проб, составил 0,85 (IV класс, «низкая токсичность»), т.е. происходит незначительное снижение величины тест-функции в опыте по сравнению с контролем. Для фонового участка ИТФ равен 1,0 (V класс, «норма»).

Таблица 2

Влияние почвенных вытяжек на рост колонии *Nostoc sp.*

Исследуемый участок	Диаметр колонии, мм	ИТФ
Фоновый контроль	2,60 ± 0,85	1,00
Опытный участок	2,20 ± 0,57	0,85
Аналитический контроль	2,70 ± 0,14	-

Установлено, что оптическая плотность культуры *Vischeria magna* в опытных пробах снизилась относительно аналитического контроля в 2,19 раза (табл.3).

Таблица 3

Оптическая плотность и ИТФ суспензий *Eustigmatos* и *Chlorella*

Суспензия	Исследуемый участок	Оптическая плотность	ИТФ
<i>Vischeria magna</i>	Опытный участок	0,047±0,03	0,45
	Фоновый контроль	0,06±0,05	0,58
	Аналитический контроль	0,103±0,01	-
<i>Chlorella vulgaris</i>	Опытный участок	0,23±0,02	0,58
	Фоновый контроль	0,3±0,04	0,76
	Аналитический контроль	0,39±0,08	-

В то время, как для *Chlorella vulgaris* в опытных пробах влияние было менее выраженным и оптическая плотность уменьшилась в 1,70 раз. Это может указывать на высокую жизнеспособность хлореллы и ее устойчивость к факторам, присутствующим в почвенных вытяжках.

Согласно шкале токсичности, для *Chlorella vulgaris* опытные пробы характеризуются IV классом («низкая токсичность»), тогда как для *Vischeria magna* зафиксирован II класс («высокая токсичность»).

Заключение

Проведенные исследования показали, что комплексное биотестирование с использованием организмов разных систематических групп позволяет точно оценить экологическое состояние городских почв.

1. Биотестирование с использованием семян кресс-салата не выявило значимых различий исследуемых участков. Показатели всхожести и индекса токсичности фактора соответствуют VI классу («стимуляция»), т.е. фактор оказывает стимулирующее влияние на развитие тест-объекта, величина тест-функции превышает уровень контроля. Это свидетельствует о том, что почвенная вытяжка из сквера Маяковского не содержит токсических соединений, которые могли бы угнетать рост и развитие семян кресс-салата.

2. Реакция цианобактерии *Nostoc sp.* оказалась более чувствительной. В опытной участке зафиксировано снижение диаметра колонии в 1,23 раза по сравнению с аналитическим контролем. ИТФ равен 0,85, что указывает на слабое угнетение роста колонии цианобактерии.

3. При использовании суспензий микроводорослей, были получены следующие данные: культура *Chlorella vulgaris* проявила устойчивость к условиям опытной вытяжки, снижение оптической

плотности в 1,7 раза; культура *Vischeria magna* оказалась наиболее уязвимой: снижение оптической плотности в 2,19 раза.

Таким образом, почвенные вытяжки из проб с территории сквера Маяковского не оказывают сильного токсического действия на семена высших растений, однако содержат факторы, подавляющие развитие и рост цианобактерий и микроводорослей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Devi K. M., Mehta S. K. Antimicrobial Activities of Freshwater Cyanobacterium, Nostoc Sp. From Tamdil Wetland of Mizoram, India: An Identification of Bioactive Compounds by GC-MS // International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. – 2016. – Vol. 7, № 3. – P. 1179-1191.
2. ГОСТ 17.4.3.01– 83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 4 с.
3. Кабиров, Р. Р. Разработка и использование многокомпонентной тест-системы для оценки токсичности почвенного покрова городской территории / Р. Р. Кабиров, А. Р. Сагитова, Н. В. Суханова // Экология. – 1997. – № 6. – С. 408-411. – EDN YWNGQY.
4. Кабиров, Р. Р. Оценка качества окружающей среды: учебно-методическое пособие / Р. Р. Кабиров, Е. В. Сугачкова, А. И. Фазлутдинова. – Уфа: Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, 2019. – 160 с. – EDN IJSLQS.
5. Кошелева И. С. и др. Перспективы гигиенического мониторинга поверхностных водоисточников с применением микроводорослей рода *Chlorella* как биотест-объектов // Фундаментальные и прикладные аспекты анализа риска здоровью населения: Материалы всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора с международным участием, Пермь, 11-15 октября 2021 года. – 2021. – С. 51.
6. Лузянин, С. Л. Биоиндикация и биотестирование состояния окружающей среды: практикум / С. Л. Лузянин, О. А. Неверова; Кемеровский государственный университет. – Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2020. – 135 с. – ISBN 978-5-8353-2659-4. – EDN RRZMJU.
7. Маркина, Ж. В. Применение спектрофотометрического метода для определения численности клеток микроводорослей рода *Tetraselmis* (Chlorophyta): калибровочные кривые и уравнения для подсчета / Ж. В. Маркина, С. И. Масленников, Л. А. Бочун // Биология моря, 2022. – Т. 48, № 6. – С. 426–429.
8. Минигазимов, Н. С. Оценка уровня загрязнения почв города Уфы / Н. С. Минигазимов, Э. Т. Хайдаршина, А. А. Куантаева //

Российский электронный научный журнал. – 2019. – № 1(31). – С. 56-72. – DOI 10.31563/2308-9644-2019-31-1-56-72. – EDN HZVYUU.

9. Сафиуллина, Л. М. Толерантность почвенных водорослей *Eustigmatos magnus* (B.Petersen) Hibberd (Eustigmatophyta) и *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow in cleve et Grunow (Bacillariophyta) к воздействию тяжелых металлов / Л. М. Сафиуллина, А. И. Фазлутдинова, Г. Р. Бакиева // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 6(100). – С. 609-610. – EDN MNKVNP.

10. Статистическая обработка данных при научном исследовании : учебное пособие / С. В. Позябин, В. В. Степанишин, Г. В. Кондратов, А. М. Жариков. – Москва : МГАВМиБ им. К.И. Скрябина, 2023. – 61 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/392867> (дата обращения: 20.01.2026). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

11. Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка, Пермь, 20–21 апреля 2023 года / Под редакцией С.А. Бузмакова. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. – 691 с. – ISBN 978-5-7944-3970-0. – EDN BFEGMD.

REFERENCES

1. Devi K. M., Mehta S. K. Antimicrobial Activities of Freshwater Cyanobacterium, *Nostoc* Sp. From Tamdil Wetland of Mizoram, India: An Identification of Bioactive Compounds by GC-MS // International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. – 2016. – Vol. 7, № 3. – P. 1179-1191.

2. GOST 17.4.3.01– 83. Nature Protection. Soils. General requirements for sampling. – Moscow : Standartinform, 2008. – 4 p. (In Russian)

3. Kabirov, R. R. Development and use of a multicomponent test system for assessing the toxicity of the soil cover in an urban area / R. R. Kabirov, A. R. Sagitova, N. V. Sukhanova // *Ekologiya*. – 1997. – № 6. – P. 408-411. – EDN YWNGQY. (In Russian)

4. Kabirov, R. R. Assessment of environmental quality: a teaching aid / R. R. Kabirov, E. V. Sugachkova, A. I. Fazlutdinova. – Ufa: Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla, 2019. – 160 p. – EDN IJSLQS. (In Russian)

5. Kosheleva I. S. et al. Prospects for hygienic monitoring of surface water sources using microalgae of the genus *Chlorella* as biotest objects // Fundamental and applied aspects of public health risk analysis:

Proceedings of the All-Russian scientific and practical online conference of young scientists and specialists of Rospotrebnadzor with international participation, Perm, October 11-15, 2021. – 2021. – P. 51. (In Russian)

6. Luzyanin, S. L. Bioindication and biotesting of the state of the environment: a practical work / S. L. Luzyanin, O. A. Neverova ; Kemerovo State University. – Kemerovo : Kemerovo State University, 2020. – 135 p. – ISBN 978-5-8353-2659-4. – EDN RRZMJU. (In Russian)

7. Markina, Zh. V. Application of the spectrophotometric method for determining the cell number of microalgae of the genus *Tetraselmis* (Chlorophyta): calibration curves and equations for counting / Zh. V. Markina, S. I. Maslennikov, L. A. Botsun // Russian Journal of Marine Biology, 2022. – Vol. 48, № 6. – P. 426–429. (In Russian) [Note: The journal "Biologiya Morya" is published in English as "Russian Journal of Marine Biology"]

8. Minigazimov, N. S. Assessment of soil pollution levels in the city of Ufa / N. S. Minigazimov, E. T. Khaidarshina, A. A. Kuantaeva // Russian Electronic Scientific Journal. – 2019. – № 1(31). – P. 56-72. – DOI 10.31563/2308-9644-2019-31-1-56-72. – EDN HZVYUU. (In Russian)

9. Safiullina, L. M. Tolerance of soil algae *Eustigmatos magnus* (B.Petersen) Hibberd (*Eustigmatophyta*) and *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow in Cleve et Grunow (*Bacillariophyta*) to the impact of heavy metals / L. M. Safiullina, A. I. Fazlutdinova, G. R. Bakieva // Bulletin of the Orenburg State University. – 2009. – № 6(100). – P. 609-610. – EDN MNKVNP. (In Russian)

10. Statistical data processing in scientific research: a textbook / S. V. Pozyabin, V. V. Stepanishin, G. V. Kondratov, A. M. Zharikov. – Moscow : MGAVMiB im. K.I. Skryabina, 2023. – 61 p. – Text : electronic // Lan: electronic library system. – URL: <https://e.lanbook.com/book/392867> (date of access: 20.01.2026). – Access mode: for authorized users. (In Russian)

11. Environmental safety in conditions of anthropogenic transformation of the natural environment: Proceedings of the All-Russian scientific conference of young scientists dedicated to the memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark, Perm, April 20–21, 2023 / Edited by S.A. Buzmakov. – Perm: Perm State National Research University, 2023. – 691 p. – ISBN 978-5-7944-3970-0. – EDN BFEGMD. (In Russian)

Информация об авторах

В.М. Чернов – студент;

А.И. Максютова – студент;

А.Р. Якупова – студент;

Н.В. Суханова – доктор биологических наук, профессор.

Information about the authors

V.M. Chernov – student;

A.I. Maksyutova – student;

A.R. Yakupova – student;

N.V. Sukhanova – Doctor of Biological Sciences, Professor.

Вклад авторов

В.М. Чернов – сбор материала, обработка материала;

А.И. Максютова – сбор материала, обработка материала;

А.Р. Якупова – проведение исследования, визуализация;

Н.В. Суханова – концептуализация, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

V.M. Chernov – material collection, material processing;

A.I. Maksyutova – material collection, material processing;

A.R. Yakupova – conducting research, visualization;

N.V. Sukhanova – conceptualization, scientific text editing.

The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 26.04.2026; принята к публикации 22.05.2026.

The article was submitted 26.04.2026; accepted for publication 22.05.2026.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 631.48:579.26

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-97-112

ЦИАНОБАКТЕРИАЛЬНО-ВОДОРОСЛЕВАЯ ЭКОСИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ КАК МЕХАНИЗМ УСКОРЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПОЧВЕННЫХ КОРОК И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ПОЧВ

*Уулу Сыргак Чубак¹, Элизабет Усеновна Бурханова², Нурбол
Нурланович Абдикалилов³, Севархон Тахировна Умарова⁴,
Наталья Викторовна Суханова⁵, Нурзат Эрмековна
Тотубаева⁶*

*^{1,2,3,4}Кыргызско-Турецкий университет «Манас», Бишкек,
Кыргызстан, nurzat.totubaeva@manas.edu.kg*

*⁵Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы, Уфа, Россия, n_suhanova@mail.ru*

Аннотация. Деградация почв, усиливающаяся в результате изменения климата и нерационального землепользования, представляет собой серьезную глобальную экологическую проблему, особенно в засушливых и полузасушливых регионах, где естественное восстановление почв происходит крайне медленно. Биологические почвенные корки (БПК) выполняют важные экологические функции, включая стабилизацию поверхности почвы, регулирование гидрологических процессов и участие в круговороте углерода и азота. Однако спонтанное образование БПК на нарушенных субстратах может занять десятилетия. Целью данного исследования была количественная оценка эффективности экосистемной инженерии с использованием цианобактерий и водорослей для ускорения образования биологических почвенных корок и инициирования ранних стадий структурного и функционального восстановления деградированных почв в контролируемых лабораторных условиях. Образцы деградированных почв были инокулированы культурами *Chlorella sp.*, *Oscillatoria sp.* и *Nostoc sp.* В течение 35-дневного экспериментального периода контролировались содержание хлорофилла-а, органического углерода в почве, доступность питательных веществ и стабильность агрегатов. Инокуляция цианобактериями и водорослями значительно ускорила образование корок: площадь покрытия поверхности достигла $62 \pm 5\%$ к 28 дню по

сравнению с $19 \pm 3\%$ в контрольной группе. Стабильность агрегатов увеличилась с $18,6 \pm 2,4\%$ до $34,9 \pm 3,1\%$, что указывает на существенное улучшение структуры. Динамика хлорофилла-а подтвердила развитие фотосинтетически активной биомассы и повышение первичной продуктивности. Результаты показывают, что цианобактерии и водоросли выступают в качестве микробных инженеров экосистемы за счет производства внеклеточных полимерных веществ (ВПВ) и потенциальной фиксации азота, одновременно укрепляя физическую структуру почвы и активизируя биогеохимические процессы. Биоинженерия биологических почвенных корок на основе цианобактерий и водорослей представляет собой масштабируемое природоориентированное решение для восстановления деградированных земель и поддерживает глобальные стратегии нейтрализации деградации земель.

Ключевые слова: биологические почвенные корки, цианобактерии, водоросли, экосистемная инженерия, восстановление почв, внеклеточные полимерные вещества, нейтрализация деградации земель

Для цитирования: Чубак У.С., Бурханова Э.У., Абдикалилов Н., Умарова С.Т., Суханова Н.В., Тотубаева Н.Э. Цианобактериально-водорослевая экосистемная инженерия как механизм ускоренного формирования биологических почвенных корок и функционального восстановления деградированных почв // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №2. С. 97-112.

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

CYANOBACTERIAL-ALGAE ECOSYSTEM ENGINEERING AS A MECHANISM FOR ACCELERATED FORMATION OF BIOLOGICAL SOIL CRUSTS AND FUNCTIONAL RESTORATION OF DEGRADED SOILS

Uulu Syrgak Chubak¹, Elizabet Usenovna Burkhanova², Nurbol Nurlanovich Abdikalilov³, Sevarkhon Takhirovna Umarova⁴, Natalya Viktorovna Sukhanova⁵, Nurzat Ermekovna Totubaeva⁶
^{1,2,3,4}Kyrgyz-Turkish «Manas» University, Bishkek, Kyrgyzstan,
nurzat.totubaeva@manas.edu.kg

⁵Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla, Ufa, Russia, *n_suhanova@mail.ru*

Abstract. Soil degradation, accelerated by climate change and unsustainable land use, is a serious global environmental problem, particularly in arid and semi-arid regions, where natural soil restoration is extremely slow. Biological soil crusts (BSCs) perform important ecological functions, including stabilizing the soil surface, regulating hydrological processes, and participating in carbon and nitrogen cycling. However, spontaneous BOC formation on disturbed substrates can take decades. The aim of this study was to quantify the effectiveness of ecosystem engineering using cyanobacteria and algae to accelerate the formation of biological soil crusts and initiate the early stages of structural and functional restoration of degraded soils under controlled laboratory conditions. Degraded soil samples were inoculated with cultures of *Chlorella sp.*, *Oscillatoria sp.*, and *Nostoc sp.* Over a 35-day experimental period, chlorophyll-a content, soil organic carbon, nutrient availability, and aggregate stability were monitored. Inoculation with cyanobacteria and algae significantly accelerated crust formation: surface coverage reached $62 \pm 5\%$ by day 28, compared to $19 \pm 3\%$ in the control group. Aggregate stability increased from $18.6 \pm 2.4\%$ to $34.9 \pm 3.1\%$, indicating a significant improvement in structure. Chlorophyll-a dynamics confirmed the development of photosynthetically active biomass and increased primary productivity. The results demonstrate that cyanobacteria and algae act as microbial ecosystem engineers through the production of extracellular polymeric substances (EPS) and potential nitrogen fixation, while simultaneously strengthening the physical structure of the soil and activating biogeochemical processes. Bioengineering of biological soil crusts based on cyanobacteria and algae represents a scalable, nature-based solution for the restoration of degraded lands and supports global land degradation neutrality strategies.

Key words: biological soil crusts, cyanobacteria, algae, ecosystem engineering, soil restoration, extracellular polymeric substances, land degradation neutrality.

For citation: Chubak U.S., Burkhanova E.U., Abdikalilov N., Umarova S.T., Sukhanova N.V., Totubaeva N.E. Cyanobacterial-algal ecosystem engineering as a mechanism for accelerated formation of biological soil crusts and functional restoration of degraded soils // Bulletin of the Bashkir

State Pedagogical University named after M. Akmulla. Series: Natural Sciences. 2026. No2. pp. 97-112

Введение

В настоящее время значительная часть сельскохозяйственных земель мира подверглась деградации, а по ряду оценок доля деградированных территорий достигает 38% от общей площади используемых земель [1–3]. Деградация почв представляет собой комплексный процесс, обусловленный воздействием как природных,

так и антропогенных факторов, включая водную и ветровую эрозию, засоление, закисление, уплотнение и утрату органического вещества [1, 2]. Эти процессы приводят к разрушению почвенной структуры, снижению биологической активности и продуктивности агроэкосистем. Усиление климатических изменений, рост частоты экстремальных погодных явлений и применение неустойчивых агротехнологий дополнительно ускоряют деградационные процессы, что ставит под угрозу продовольственную безопасность и устойчивость экосистем [4, 11, 21].

В условиях глобального запроса на устойчивое управление земельными ресурсами возрастает интерес к экологически безопасным и биологически ориентированным методам восстановления деградированных почв. В последние годы особое внимание уделяется микроорганизмам как ключевым регуляторам биогеохимических циклов и структурной организации почвы. Показано, что микробно-опосредованные процессы способствуют стабилизации углерода, фиксации атмосферного азота, мобилизации фосфора, а также формированию устойчивых почвенных агрегатов, что в совокупности повышает функциональную устойчивость почвенных систем [6, 22, 25]. В отличие от физико-химических методов рекультивации, микробиологические подходы рассматриваются как более долгосрочная и экологически безопасная стратегия восстановления деградированных экосистем [6, 25].

В этом контексте цианобактерии и водоросли представляют собой одну из наиболее перспективных групп микроорганизмов для биологической стабилизации почв. Эти прокариотические организмы способны к кислородному фотосинтезу, фиксации атмосферного азота и синтезу внеклеточных полимерных веществ (Extracellular Polymeric Substances, EPS) [7, 14, 19, 20]. EPS формируют структурированную матрицу, связывающую минеральные частицы почвы, способствуя образованию устойчивых агрегатов и повышению сопротивляемости эрозии [19]. Дополнительно полимерная матрица увеличивает влагоудерживающую способность почвенной поверхности, что особенно важно в условиях аридных и семиаридных экосистем.

Цианобактерии являются ключевыми компонентами биологических почвенных корок (БПК), широко распространённых в сухих и полусухих регионах мира [4, 5, 9, 10, 15–17]. Биологические почвенные корки представляют собой сложные микробно-минеральные системы, формирующиеся на поверхности почвы и выполняющие ряд критически важных экосистемных функций: стабилизацию поверхности, снижение интенсивности ветровой и водной эрозии, повышение инфильтрационной способности, а также участие в круговороте углерода и азота [4, 15–17]. Благодаря этим

функциям БПК рассматриваются как естественный механизм повышения устойчивости деградированных ландшафтов.

В последние годы развивается направление искусственного индуцирования биологических почвенных корок (Induced Biological Soil Crusts, IBSCs) посредством целенаправленной инокуляции цианобактериями [14, 23, 24]. Экспериментальные исследования показывают, что филоментозные формы, такие как представители родов *Nostoc* и *Microcoleus*, обладают высокой устойчивостью к засушливым условиям и интенсивно синтезируют EPS, что обеспечивает быстрое формирование биогенной агрегатной структуры и повышение эрозионной устойчивости почвы [7, 19].

Несмотря на накопленные данные о роли цианобактерий и водорослей в формировании биологических почвенных корок, остаются недостаточно изученными количественные параметры ранней стадии структурной стабилизации деградированных почв при лабораторной индукции БПК. В частности, ограничены систематические оценки скорости формирования корки и степени повышения агрегатной устойчивости в контролируемых условиях, что затрудняет масштабирование подобных биотехнологических решений для программ восстановления земель.

В связи с этим целью настоящего исследования является количественная оценка эффективности индукции биологических почвенных корок с использованием цианобактерий и водорослей для структурного и функционального восстановления деградированных почв в лабораторных условиях. Полученные результаты могут способствовать научному обоснованию биоинженерных подходов к устойчивому управлению земельными ресурсами в аридных и семиаридных регионах.

Материалы и методы исследований

Исследование направлено на моделирование формирования биологических почвенных корок (БПК) в деградированных почвах в контролируемых лабораторных условиях и оценку роли фототрофных микроорганизмов в инициации восстановительных процессов. Эксперимент включал контрольный вариант и варианты с инокуляцией цианобактериями и водорослями, выполненные в трёхкратной повторности с последующим статистическим анализом данных. В качестве фотосинтетического инокулюма использовали культуры *Chlorella sp.*, *Oscillatoria sp.* и *Nostoc sp.*, являющиеся типичными пионерными организмами БПК.

Отбор и подготовка почв. Образцы деградированных почв отбирали с глубины 0-10 см на участках с низким содержанием органического вещества и высокой эрозионной уязвимостью. Почвы высушивали при комнатной температуре, гомогенизировали и

просеивали через сито 2 мм (рис.1). До начала эксперимента определяли исходные физико-химические показатели.

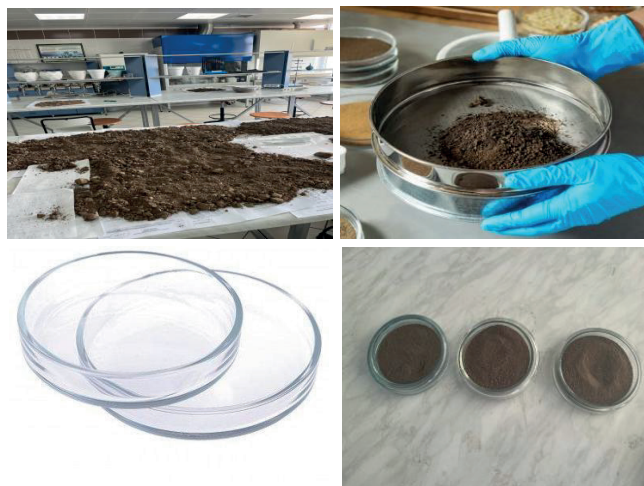


Рис.1. – Пробоподготовка почв в лаборатории КТУМ

Подготовка инокулюма. Смешанную культуру цианобактерий и водорослей выращивали до экспоненциальной фазы роста. Суспензию стандартизировали по концентрации хлорофилла-а (1 мкг см^{-3}). Цианобактерии характеризуются синтезом внеклеточных полимерных веществ (EPS), обеспечивающих агрегацию частиц почвы и формирование стабильной микроструктуры; представители рода *Nostoc* потенциально способны к фиксации атмосферного азота.

Стерилизация почвы. Для минимизации влияния автохтонной микробиоты почвы, ее стерилизовали в автоклаве при 121°C и 1,5 атм. После стерилизации образцы охлаждали до комнатной температуры.

Инокуляция и инкубация. Стерильную почву распределяли в чашки Петри слоем 1–1,5 см. На поверхность равномерно наносили 1-2 мл стандартизированной суспензии. Контроль получал стерильную дистиллированную воду. Инкубацию проводили при $25\text{--}28^\circ\text{C}$, фотопериоде 14 ч свет / 10 ч темнота, относительной влажности 15–40%. Влажность поддерживали опрыскиванием каждые 2-3 дня. Продолжительность опыта – 35 суток (рис.2).



Рис.2. – Подготовка инокулюма

Мониторинг и аналитические методы. Развитие БПК оценивали визуально, микроскопически и аналитически на 7, 21 и 35 суток.

Хлорофилл-а экстрагировали 90% этанолом с последующей спектрофотометрией. Органический углерод определяли методом Уолкли-Блэка. Нитраты и аммоний – колориметрически. Агрегатную устойчивость оценивали методом мокрого просеивания.

Статистическая обработка. Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение. Достоверность различий определяли методом ANOVA при $p < 0,05$. Динамика роста показала увеличение хлорофилла-а до $0,85 \pm 0,07 \text{ мг г}^{-1}$ к 14 суткам и $1,46 \pm 0,12 \text{ мг г}^{-1}$ к 28 суткам; биомасса возросла на $175 \pm 10\%$, что подтверждает успешное формирование фотосинтетически активной БПК и запуск ранних восстановительных процессов.

Результаты

Трансформация физических свойств почвы. Инокуляция фототрофным консорциумом (*Chlorella sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Nostoc sp.*) привела к выраженной модификации структурных характеристик деградированной почвы уже на ранних этапах эксперимента. Агрегатная устойчивость увеличилась с $18,6 \pm 2,4\%$ до $34,9 \pm 3,1\%$, что соответствует почти 1,9-кратному росту по сравнению с контролем (рис.3).

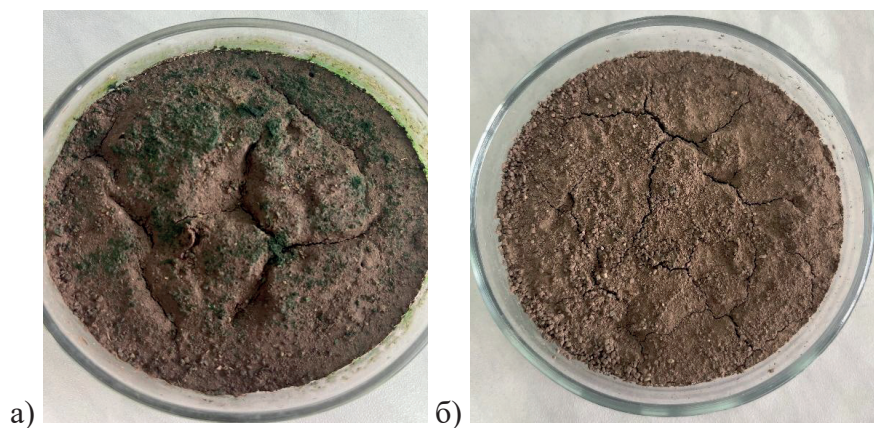


Рис.3. – а) сформированная биологическая корка на 35 сутки эксперимента, б) контроль

Данный эффект обусловлен интенсивным синтезом внеклеточных полимерных веществ (EPS), формирующих биогенную матрицу, связывающую минеральные частицы в устойчивые микро- и макроагрегаты. В результате существенно повысилась механическая прочность поверхностного горизонта и его устойчивость к водной и ветровой эрозии.

Полученные данные свидетельствуют о запуске процессов биогенной агрегации – ключевого механизма ранней структурной стабилизации почв при микробной инженерии экосистем.

Формирование биологической почвенной корки и её экосистемное значение. К 28-м суткам инкубации в вариантах с инокуляцией сформировалась устойчивая биологическая почвенная корка (БПК), обеспечившая покрытие поверхности на уровне $62 \pm 5\%$, тогда как в контроле этот показатель составил лишь $19 \pm 3\%$. Динамика наращивания покрытия носила поступательный характер, отражая активную колонизацию и пространственную экспансию фотосинтетической биомассы (табл. 1).

Таблица 1

Динамика покрытия биологической почвенной коркой (%)

Ход эксперимента, сутки	Контрольная почва (%)	Экспериментальная почва (%)
0	5 ± 1	5 ± 1
7	8 ± 2	21 ± 3
14	12 ± 2	38 ± 4
21	15 ± 3	51 ± 4
28	19 ± 3	62 ± 5

Формирование БПК сопровождалось визуально выраженной пигментацией поверхности, увеличением содержания хлорофилла-а и ростом микробной плотности. Экосистемно это проявилось в усилении защиты почвенной поверхности, повышении влагоудерживающей способности и снижении эрозионной уязвимости.

Таким образом, цианобактериально-водорослевая инокуляция не только ускоряет формирование БПК, но и инициирует функциональное восстановление деградированной почвы, переводя её в более устойчивое структурно-экологическое состояние.

Научная интерпретация и сопоставление с предшествующими исследованиями. Полученные результаты согласуются с современными представлениями о роли цианобактерий и микроскопических водорослей как ключевых экосистемных инженеров аридных ландшафтов. Рост концентрации хлорофилла-а подтверждает формирование фотосинтетически активной биомассы, тогда как увеличение агрегатной устойчивости демонстрирует структурообразующую функцию EPS.

Синергетическое сочетание фотосинтетической активности, биогенной агрегации и потенциальной фиксации азота указывает на

запуск комплексных процессов биогеохимической реабилитации. В стратегическом контексте это подтверждает высокую эффективность управляемой биоинженерии БПК как инструмента ускоренного восстановления деградированных земель и повышения их долгосрочной устойчивости.

Обсуждение

Цианобактерии как драйверы ранней стадии восстановления почв. Полученные результаты убедительно демонстрируют, что фототрофный консорциум на основе *Chlorella sp.*, *Oscillatoria sp.* и *Nostoc sp.* функционирует как активный биоинженер деградированных субстратов. Почти двукратный рост агрегатной устойчивости за 35 суток свидетельствует о быстром запуске процессов биогенной реорганизации почвенной структуры.

Синтез внеклеточных полимерных веществ (EPS) формирует связующую матрицу, стабилизирующую минеральные частицы и создающую микросреды, благоприятные для последующей колонизации. В условиях низкого содержания органического вещества именно микробная агрегация становится первичным механизмом восстановления структурной целостности почвы.

Ускоренная биоинженерия биологических почвенных корок. Формирование БПК с покрытием до 62% за 28 суток подтверждает возможность управляемого ускорения сукцессионных процессов. В природных условиях аналогичная стадия может формироваться годами. Стандартизированная инокуляция (по концентрации хлорофилла-а) обеспечивает воспроизводимость и управляемость восстановления. Рост фотосинтетической биомассы отражает запуск первичной продукции – ключевого фактора возврата деградированной системы к функциональному состоянию.

Влияние на биогеохимические циклы и мультифункциональность. Повышение содержания хлорофилла-а указывает на усиление фиксации углерода и потенциал накопления органического вещества. Потенциальная азотфиксация у *Nostoc sp.* снижает азотное ограничение, создавая предпосылки для развития более сложных микробных и растительных сообществ. Цианобактерии одновременно восстанавливают физическую структуру и активизируют биогеохимические циклы, формируя основу экосистемной мультифункциональности и устойчивости.

Значение для нейтрального баланса деградации земель и глобальной политики. Результаты напрямую соотносятся с приоритетами United Nations Convention to Combat Desertification и концепцией Land Degradation Neutrality. Быстрое повышение устойчивости к эрозии и рост биологической активности подтверждают, что микробная биоинженерия БПК может служить

масштабируемым природоподобным инструментом восстановления аридных территорий.

Полученные данные релевантны целям устойчивого развития ООН:

SDG 15 (Life on Land) – восстановление деградированных земель;

SDG 13 (Climate Action) – усиление адаптационного потенциала и углеродная фиксация;

SDG 2 (Zero Hunger) – повышение продукционного потенциала маргинальных почв;

SDG 6 (Clean Water and Sanitation) – снижение эрозионного выноса и стабилизация водосборов.

Научная новизна и ограничения. Работа предоставляет количественные доказательства быстрого структурного и функционального восстановления деградированных почв при стандартизированной микробной инокуляции. Метод нормирования инокулюма по хлорофиллу-а повышает воспроизводимость технологий микробной инженерии. Ограничением является лабораторный характер эксперимента, необходимы полевые испытания и долгосрочный мониторинг для оценки устойчивости сформированных БПК в условиях климатической вариабельности.

Выводы

Цианобактериально-водорослевая инокуляция инициирует ускоренное формирование биологических почвенных корок в деградированных почвах. За 35 суток обеспечено почти двукратное повышение агрегатной устойчивости и значительное расширение покрытия БПК. Цианобактерии и водоросли функционируют как микробные экосистемные инженеры, одновременно восстанавливая физическую структуру и активизируя биогеохимические процессы. Управляемая биоинженерия БПК представляет собой экологически безопасную, экономически доступную и масштабируемую технологию восстановления земель в условиях изменения климата. Подход обладает высоким потенциалом интеграции в национальные стратегии достижения нейтрального баланса деградации земель и программы адаптации к климатическим изменениям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Montgomery D.R. Soil erosion and agricultural sustainability // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2007. – Т. 104, № 33. – С. 13268–13272. – DOI: 10.1073/pnas.0611508104.
2. Pimentel D., Burgess M. Soil erosion threatens food production // *Agriculture*. – 2013. – Т. 3, № 3. – С. 443–463.

3. Oldeman L.R., Hakkeling R.T.A., Sombroek W.G. World map of the status of human-induced soil degradation (GLASOD). – Wageningen (The Netherlands): ISRIC, 1990.
4. Maestre F.T., Bowker M.A., Escolar C., Escudero A., Ochoa V. Biological soil crusts as modulators of dryland ecosystems // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2011. – Т. 108, № 4. – С. 14496–14501. – DOI: 10.1073/pnas.1111961108.
5. Bowker M.A., Belnap J., Miller M.E. Spatial modeling of biological soil crusts to support rangeland assessment and monitoring // *Journal of Arid Environments*. – 2008. – Т. 72, № 10. – С. 1929–1941. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2008.01.017.
6. Antoninka A.J., Bowker M.A., Reed S.C. Biological soil crusts and restoration // *Restoration Ecology*. – 2016. – Т. 24, № 5. – С. 695–705. – DOI: 10.1111/rec.12353.
7. Rossi F., Bowker M.A., Belnap J. Cyanobacterial inoculation improves soil stability in drylands // *Plant and Soil*. – 2018. – Т. 429, № 1–2. – С. 309–322. – DOI: 10.1007/s11104-018-3681-5.
8. Chamizo S., Cantón Y., Rodríguez-Caballero E. Biocrusts and ecosystem services: A review // *Earth-Science Reviews*. – 2022. – Т. 225. – С. 103910. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103910.
9. Bowker M.A. Biological crusts as soil stabilizers: Current knowledge and research gaps // *Journal of Arid Environments*. – 2007. – Т. 69, № 1. – С. 97–106. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2006.10.008.
10. Belnap J., Lange O.L. Biological soil crusts: Structure, function, and management. – Berlin: Springer, 2003.
11. Maestre F.T., Salguero-Gómez R., Quero J.L. Dryland soil responses to global change // *Global Change Biology*. – 2016. – Т. 22, № 8. – С. 3067–3081. – DOI: 10.1111/gcb.13226.
12. Gao Q., Chamizo S., Li X. Biocrusts and soil aggregate stability along climatic gradients // *SOIL*. – 2022. – Т. 8. – С. 717–731. – DOI: 10.5194/soil-8-717-2022.
13. Soliveres S., Maestre F.T., Ulrich W. Biodiversity at multiple trophic levels is vital for ecosystem multifunctionality // *Nature*. – 2014. – Т. 515, № 7528. – С. 448–451. – DOI: 10.1038/nature13992.
14. Li X.-R., Wang X., Zhao Q. Cyanobacteria inoculation enhances soil fertility in degraded lands // *Land Degradation & Development*. – 2020. – Т. 31, № 9. – С. 1163–1174. – DOI: 10.1002/ldr.3514.
15. Wang X., Zhao Q., Chamizo S. Biocrust distribution and soil functions: A global perspective // *SOIL*. – 2024. – Т. 10. – С. 763–780. – DOI: 10.5194/soil-10-763-2024.

16. Belnap J., Büdel B. Biocrust ecology and management: Integration across scales // *Journal of Arid Environments*. – 2016. – T. 124. – C. 42–49. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2015.07.028.
17. Chamizo S., Escudero A. Stability and multifunctionality of soil crusts: Climate and disturbance effects // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2015. – T. 81. – C. 23–30. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.12.014.
18. Rosière C., Zhao Q., Maestre F.T. Cellular mechanisms of EPS in water retention // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2019. – T. 128. – C. 47–57.
19. Zhao Q., Li X.-R., Wang X. Cyanobacteria functional genomics related to soil restoration // *Microorganisms*. – 2025. – T. 13, № 7. – Ст. 1468. – DOI: 10.3390/microorganisms13071468.
20. Maestre F.T., Soliveres S. Aridity effects on dryland multifunctionality // *Journal of Ecology*. – 2015. – T. 103, № 1. – C. 155–165. – DOI: 10.1111/1365-2745.12347.
21. Colman D.R., Reed S.C., Belnap J. Ecosystem resilience and soil biology // *Global Ecology and Biogeography*. – 2019. – T. 28, № 9. – C. 1170–1184. – DOI: 10.1111/geb.12962.
22. Zhao Y., Chamizo S., Li X. Dryland restoration by microbial inoculation // *Restoration Ecology*. – 2021. – T. 29, № 3. – Ст. e13351. – DOI: 10.1111/rec.13351.
23. Bowker M.A., Reed S.C. Biocrust-mediated nutrient cycling in drylands // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2020. – T. 150. – Ст. 108120.
24. Antoninka A.J., Bowker M.A. Dryland soil restoration strategies: A review // *Journal of Arid Environments*. – 2021. – T. 184. – Ст. 104256.
25. Zhang Y., Li X.-R., Chamizo S. Biocrust interactions with vascular plants // *Journal of Arid Environments*. – 2019. – T. 170. – C. 75–83. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2015.02.017.

REFERENCES

1. Montgomery D.R. Soil erosion and agricultural sustainability // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2007. – T. 104, № 33. – C. 13268–13272. – DOI: 10.1073/pnas.0611508104.
2. Pimentel D., Burgess M. Soil erosion threatens food production // *Agriculture*. – 2013. – T. 3, № 3. – C. 443–463.
3. Oldeman L.R., Hakkeling R.T.A., Sombroek W.G. World map of the status of human-induced soil degradation (GLASOD). – Wageningen (The Netherlands): ISRIC, 1990.
4. Maestre F.T., Bowker M.A., Escolar C., Escudero A., Ochoa V. Biological soil crusts as modulators of dryland ecosystems // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2011. – T. 108, № 4. – C. 14496–14501. – DOI: 10.1073/pnas.1111961108.

5. Bowker M.A., Belnap J., Miller M.E. Spatial modeling of biological soil crusts to support rangeland assessment and monitoring // *Journal of Arid Environments*. – 2008. – Т. 72, № 10. – С. 1929–1941. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2008.01.017.
6. Antoninka A.J., Bowker M.A., Reed S.C. Biological soil crusts and restoration // *Restoration Ecology*. – 2016. – Т. 24, № 5. – С. 695–705. – DOI: 10.1111/rec.12353.
7. Rossi F., Bowker M.A., Belnap J. Cyanobacterial inoculation improves soil stability in drylands // *Plant and Soil*. – 2018. – Т. 429, № 1–2. – С. 309–322. – DOI: 10.1007/s11104-018-3681-5.
8. Chamizo S., Cantón Y., Rodríguez-Caballero E. Biocrusts and ecosystem services: A review // *Earth-Science Reviews*. – 2022. – Т. 225. – Ст. 103910. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103910.
9. Bowker M.A. Biological crusts as soil stabilizers: Current knowledge and research gaps // *Journal of Arid Environments*. – 2007. – Т. 69, № 1. – С. 97–106. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2006.10.008.
10. Belnap J., Lange O.L. *Biological soil crusts: Structure, function, and management*. – Berlin: Springer, 2003.
11. Maestre F.T., Salguero-Gómez R., Quero J.L. Dryland soil responses to global change // *Global Change Biology*. – 2016. – Т. 22, № 8. – С. 3067–3081. – DOI: 10.1111/gcb.13226.
12. Gao Q., Chamizo S., Li X. Biocrusts and soil aggregate stability along climatic gradients // *SOIL*. – 2022. – Т. 8. – С. 717–731. – DOI: 10.5194/soil-8-717-2022.
13. Soliveres S., Maestre F.T., Ulrich W. Biodiversity at multiple trophic levels is vital for ecosystem multifunctionality // *Nature*. – 2014. – Т. 515, № 7528. – С. 448–451. – DOI: 10.1038/nature13992.
14. Li X.-R., Wang X., Zhao Q. Cyanobacteria inoculation enhances soil fertility in degraded lands // *Land Degradation & Development*. – 2020. – Т. 31, № 9. – С. 1163–1174. – DOI: 10.1002/ldr.3514.
15. Wang X., Zhao Q., Chamizo S. Biocrust distribution and soil functions: A global perspective // *SOIL*. – 2024. – Т. 10. – С. 763–780. – DOI: 10.5194/soil-10-763-2024.
16. Belnap J., Büdel B. Biocrust ecology and management: Integration across scales // *Journal of Arid Environments*. – 2016. – Т. 124. – С. 42–49. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2015.07.028.
17. Chamizo S., Escudero A. Stability and multifunctionality of soil crusts: Climate and disturbance effects // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2015. – Т. 81. – С. 23–30. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.12.014.
18. Rosière C., Zhao Q., Maestre F.T. Cellular mechanisms of EPS in water retention // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2019. – Т. 128. – С. 47–57.

19. Zhao Q., Li X.-R., Wang X. Cyanobacteria functional genomics related to soil restoration // *Microorganisms*. – 2025. – Т. 13, № 7. – Ст. 1468. – DOI: 10.3390/microorganisms13071468.
20. Maestre F.T., Soliveres S. Aridity effects on dryland multifunctionality // *Journal of Ecology*. – 2015. – Т. 103, № 1. – С. 155–165. – DOI: 10.1111/1365-2745.12347.
21. Colman D.R., Reed S.C., Belnap J. Ecosystem resilience and soil biology // *Global Ecology and Biogeography*. – 2019. – Т. 28, № 9. – С. 1170–1184. – DOI: 10.1111/geb.12962.
22. Zhao Y., Chamizo S., Li X. Dryland restoration by microbial inoculation // *Restoration Ecology*. – 2021. – Т. 29, № 3. – Ст. e13351. – DOI: 10.1111/rec.13351.
23. Bowker M.A., Reed S.C. Biocrust-mediated nutrient cycling in drylands // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2020. – Т. 150. – Ст. 108120.
24. Antoninka A.J., Bowker M.A. Dryland soil restoration strategies: A review // *Journal of Arid Environments*. – 2021. – Т. 184. – Ст. 104256.
25. Zhang Y., Li X.-R., Chamizo S. Biocrust interactions with vascular plants // *Journal of Arid Environments*. – 2019. – Т. 170. – С. 75–83. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2015.02.017.

Информация об авторах

У.С. Чубак – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Бишкек, Кыргызстан;

Э.У. Бурханова – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Бишкек, Кыргызстан;

Н.Н. Абдикалилов – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Бишкек, Кыргызстан;

С.Т. Умарова – магистрант, отделение экологической инженерии, Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Бишкек, Кыргызстан;

Н.В. Суханова – доктор биологических наук, зав.каф. биоэкологии и биологического образования, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы;

Н.Э. Тотубаева – доктор биологических наук, доцент, Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Бишкек, Кыргызстан.

Information about the authors

U.S. Chubak – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

E.U. Burkhanova – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

N.N. Abdikalilov – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

S.T. Umarova – master's student, Department of Environmental Engineering, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan;

N.V. Sukhanova – doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Bioecology and Biological Education, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla;

N.E. Totubaeva – doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kyrgyz-Turkish “Manas” University, Bishkek, Kyrgyzstan.

Вклад авторов

У.С. Чубак – сбор данных и эксперименты, анализ данных и визуализация, подготовка рукописи;

Э.У. Бурханова – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

Н.Н. Абдикалилов – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

С.Т. Умарова – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

Н.В. Суханова – сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи;

Н.Э. Тотубаева – концепция и проектирование исследования, сбор данных и эксперименты, подготовка рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

U.S. Chubak – data collection and experiments, data analysis and visualization, manuscript preparation;

E.U. Burkhanova – data collection and experiments, manuscript preparation;

N.N. Abdikalilov – data collection and experiments, manuscript preparation;

S.T. Umarova – data collection and experiments, manuscript preparation;

N.V. Sukhanova – data collection and experiments, manuscript preparation;

N.E. Totubaeva – study concept and design, data collection and experiments, manuscript preparation.

The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; принята к публикации 15.06.2026.

The article was submitted 12.05.2026; accepted for publication 15.06.2026.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 547.541.3

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-113-123

**Гюльсум Фариз гызы Гаджиева¹, Чингиз Князь оглу Расулов²,
Кенуль Ширзад гызы Алиева³, Гюнай Заман гызы Гейдарли⁴**
*^{1,2,3,4} Институт нефтехимических процессов Министерства
науки и образования Азербайджана, Баку, rchk49@mail.ru*

РОЗМАРИНОВАЯ КИСЛОТА И ЕЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Аннотация. Розмариновая кислота представляет собой биологически активное соединение растительного происхождения из семейства полифенолов, извлекаемое из растений семейства Lamiaceae. Розмариновая кислота обладает рядом важных фармакологических свойств, в том числе противовоспалительным, антиоксидантным, противовирусным и антиканцерогенным. В этой работе нами рассмотрены основные биологические функции розмариновой кислоты.

Ключевые слова: розмариновая кислота, биологические функции, антимикробная активность, фитогормоны

Для цитирования: Гаджиева Г.Ф., Расулов Ч.К., Алиева К.Ш., Гейдарли Г.З. Розмариновая кислота и ее биологические функции // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М.Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. №2. С. 113-123.

CHEMICAL SCIENCES

Original article

Gulsum Fariz Hajiyeva¹, Chingiz Qnyaz Rasulov², Kenul Shirzad Aliyeva³, Gunay Zaman Heydarli⁴
^{1,2,3,4}Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of Science and Education of Azerbaijan, Baku, rchk49@mail.ru

ROSMARINIC ACID AND ITS BIOLOGICAL FUNCTIONS

Abstract. Rosmarinic acid is a biologically active compound of plant origin, a member of the polyphenol family, extracted from plants of the Lamiaceae family. Rosmarinic acid possesses a number of important pharmacological properties, including anti-inflammatory, antioxidant, antiviral, and anticarcinogenic properties. The deglycation activity of rosmarinic acid, demonstrated by a group of French researchers in 2012, makes it a reference molecule in the fight against aging. In this paper, we examine the main biological functions of rosmarinic acid.

Key words: rosmarinic acid, biological functions, antimicrobial activity, phytohormones

For citing: Hajiyeva G.F., Rasulov Ch.Q., Aliyeva K.Sh., Heydarli G.Z Pharmacological activity of flavonoids // Bulletin of Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla. Series: Natural Sciences. 2026. №2. pp. 113-123.

Введение

Розмариновая кислота (РК) широко распространена в растениях семейств яснотковых (Lamiaceae) и бурачниковых (Boraginaceae). Структурно РК представляет собой сложный эфир кофейной кислоты и 3,4-дигидроксифенилмолочной кислоты с хорошо изученным биосинтетическим путем, физиологическими функциями в растениях и (потенциальной) биологической активностью. Большое количество растительных препаратов и пищевых добавок, содержащих РК, продаются с заявлениями о благотворном влиянии на здоровье. Кроме того, благодаря ингибированию перекисного окисления липидов и роста бактерий, РК одобрена для использования в качестве природного антиоксиданта и/или консерванта в пищевой промышленности. Достижения в области биотехнологического производства РК обеспечивают эффективный и «зеленый» подход, заслуживающий дальнейшего внедрения в широкомасштабное применение. Многочисленные исследования *in vitro* и *in vivo* подтверждают многие из заявленных полезных для здоровья эффектов РК, а также ее ценность как пищевой добавки [1].

Целью представленной работы является обобщение и систематизация результатов исследований в области применения розмариновой кислоты в агрохимии.

Методология

Представленная работа включает результаты исследований, осуществленных в течение 2000-2025 гг в области применения розмариновой кислоты и ее функционально-замещенных производных в качестве регуляторов роста растений с использованием широкой

базы данных рецензируемых статей (Scopus, Web of Science, PubMed, eLibrary). На основании полученных результатов исследований осуществлена группировка по тематическим блокам

Результаты исследований

Исследования по определению фиторегуляторных свойств розмариновой кислоты можно классифицировать по следующим основным направлениям:

1. Антиоксидантная активность розмариновой кислоты

Четыре клоновые линии мяты колосистой и две клоновые линии мяты перечной, отобранные по повышенному содержанию розмариновой кислоты (50–120 мг/г розмариновой кислоты в сухом веществе), где до 80% антиоксидантной активности коррелировало с содержанием розмариновой кислоты, были исследованы для определения влияния условий окружающей среды и физиологических условий на накопление розмариновой кислоты в тканях листьев. Воздействие короткого фотопериода 12 часов по сравнению с 16 часами снизило накопление розмариновой кислоты в двух линиях мяты, но существенной разницы между фотопериодами 14 и 16 часов обнаружено не было. Физиологический возраст растения сильно влиял на накопление розмариновой кислоты, при этом самые высокие уровни были зарегистрированы в вегетативном состоянии, а концентрация розмариновой кислоты в листьях значительно снизилась как на стадии закладки бутонов, так и на стадии цветения в линиях мяты [2]. Холодовой стресс, действовавший в течение шести недель, не оказал влияния на выработку розмариновой кислоты. Полевое исследование коммерческого хемотипа 700В показало, что тип почвы играет важную роль в накоплении розмариновой кислоты в листовой ткани, вероятно, из-за удержания влаги, что способствует выработке розмариновой кислоты. Для производителей и экстрагентов учет этих факторов значительно увеличит накопление розмариновой кислоты в мяте с высоким содержанием розмариновой кислоты в коммерческих целях и усилит контроль качества растительных экстрактов для производства натуральных продуктов.

Розмариновая кислота была получена из метанольного экстракта мяты перечной (*Mentha piperita* L.) с обратным холодильником [3]. Целью данного исследования была оценка антиоксидантной активности *in vitro* и уровня розмариновой кислоты в метанольных экстрактах мяты перечной (*M. piperita*). Анализ образца методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) показал, что розмариновая кислота присутствовала в экстракте в высокой концентрации 1,9 мг/мл. Очистка проводилась методом колоночной хроматографии с получением 0,020 г из 1 г неочищенного экстракта, после чего антиоксидантная активность очищенной

розмариновой кислоты определялась методами 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH), удаления H_2O_2 и окислительно-восстановительного анализа (REDOX). Было выявлено, что антиоксидантный потенциал экстракта розмариновой кислоты превышает 95% (при 100 мкг/мл) в анализе DPPH и 87,83% (при 100 мкг/мл) в анализе связывания H_2O_2 . Данное исследование проводилось с использованием метанольной экстракции *M. piperita* с обратным холодильником. Этот возможный метод обучения оказался быстрым и успешным способом сохранения антиоксидантных свойств розмариновой кислоты. Содержание розмариновой кислоты определялось с помощью ВЭЖХ.

Благодаря наличию свободных фенольных кислот, особенно розмариновой кислоты, экстракты *Satureja hortensis* L. обладают антиоксидантной и антимикробной активностью. Выработка розмариновой кислоты растительными клетками может регулироваться многими факторами [4]. В настоящем исследовании изучались изменения, вызванные внесением карбоната кальция и азота на содержание розмариновой кислоты, рост растений и урожайность *S. hortensis* сорта Saturn. Азотное удобрение значительно увеличило высоту растений, сырую и сухую массу травы, а также содержание розмариновой кислоты и урожайность. Обработка $CaCO_3$ не повлияла на содержание розмариновой кислоты или урожайность, в то время как сырая и сухая масса травы увеличилась при внесении 5 т/га $CaCO_3$.

2. Влияние розмариновой кислоты на прорастание семян

В исследовании [5] оценивали влияние розмариновой кислоты (РК), важного вторичного метаболита с множественной биологической активностью, такой как антиоксидантная способность, на прорастание семян инбредной линии дыни 'YJM' в условиях солевого стресса. Авторы обнаружили, что вызванные солью фенотипические изменения, включая замедленную скорость прорастания, а также сниженное удлинение радикалов и сырой вес, в значительной степени восстанавливались для семян 'YJM' при экзогенном внесении 0,1 мкМ РК ($NaCl+PK$) по сравнению с семенами без обработки РК ($NaCl$), что демонстрирует положительную роль РК в адаптации семян дыни к солевому стрессу. Значительное устранение H_2O_2 и $O_2^{\bullet-}$, вместе со сниженным накоплением МДА, было обнаружено в семенах $NaCl+PK$ по сравнению с образцами $NaCl$ из-за стимулированной активности СОД, ПОД и КАТ. Между тем, по сравнению с образцами $NaCl$, значительное увеличение как общей активности амилазы, так и содержания растворимых сахаров наблюдалось в семенах $NaCl+RA$, что обеспечивало достаточное количество материала для процесса прорастания и осмотической регуляции. Более того, это благоприятное влияние отменялось, когда образцы $NaCl+RA$

подвергались воздействию 600 мкМ метилглиоксальбис(гуанилгидразона), ингибитора биосинтеза полиаминов (РК), показывая, что РК-опосредованная солеустойчивость семян дыни работала зависимым от сигнала РК образом. Это наблюдение подтверждалось значительно повышенной экспрессией ключевых генов, ответственных за гомеостаз РК в семенах NaCl+РК по сравнению с образцами NaCl. В целом, это исследование раскрыло новые биологические функции РК в солеустойчивости растений и может стать потенциальной целью для селекции зародышевой плазмы/сортов дыни с высокой солеустойчивостью в будущем.

3. Влияние розмариновой кислоты на стрессы (солевой стресс)

Солевой стресс является серьезной проблемой, стоящей перед ростом и развитием растений [6]. Селен (Se) может улучшить рост растений и снизить стресс. Следовательно, целью данного исследования было определить, может ли применение Se смягчить негативное воздействие солевого стресса на *Melissa officinalis* L. Различные уровни солёности в данном исследовании были контрольными (0), 50, 100 и 200 мМ. Одновременно применялся селенат натрия (Se) (0 и 50 мг/л). Засоление показало неблагоприятное воздействие на различные параметры роста растений, а также на содержание пигментов. Se в концентрации 50 мг/л увеличил вегетативный рост растений *M. officinalis* при различных уровнях солёности. Соль вызвала условия окислительного стресса за счет увеличения содержания малонового диальдегида и пролина, а опрыскивание листьев Se усилило активность антиоксидантных ферментов, таких как супероксиддисмутаза и каталаза. По сравнению с контрольной группой, накопление селена в побегах и корнях значительно увеличилось с увеличением уровня Se. Внесение селена увеличило накопление N, Ca, K и Mn. Опрыскивание листьев селеном увеличило содержание розмариновой кислоты по сравнению с растениями, обработанными солью и без нее. Сделан вывод о том, что внесение селена может смягчить последствия солевого стресса у растений *M. officinalis* и улучшить усвоение минералов.

4. Участие розмариновой кислоты в биохимических процессах растительных организмов

Легочный фиброз характеризуется перенаселением и чрезмерной активацией фибробластов и миофибробластов, что нарушает нормальную структуру и функционирование легких [7]. Сообщалось, что экстракт розмарина, богатый карнозойной кислотой (CA) и розмариновой кислотой (RA), излечивает легочный фиброз, вызванный блеомицином (BLM). Мы демонстрируем, что CA снижает жизнеспособность легочных фибробластов человека (HLF) со значением IC₅₀ 17,13 ± 1,06 мкМ, в то время как RA не оказывает

цитотоксического эффекта. В присутствии 50 мкМ RA зависимость доза-ответ для СА смещается до значения $IC_{50} 11,70 \pm 1,46$ мкМ, что указывает на синергическое действие. TGF β -трансформированные HLF, фибробласты легких крысы и клетки L929 демонстрируют схожую чувствительность к лечению СА и СА+РА (20 мкМ + 100 мкМ соответственно). Клетки альвеолярного эпителия крыс погибали только при лечении СА+РА, в то время как клетки A549 не были затронуты. Окрашивание аннексином V и количественная оценка ДНК показали, что HLF останавливаются в фазе клеточного цикла G0/G1 и подвергаются апоптозу. СА вызывала устойчивую активацию экспрессии фосфо-Akt и фосфо-p38 и ингибирование белка p21. Добавление RA усиливало эти эффекты, в то время как добавление RA в одиночку не оказывало действия. Только тройная комбинация ингибиторов (МАРК-p38, пан-каспаза, PI3K/Akt/аутофагия) частично ослабляла апоптоз; это говорит о том, что цитотоксичность лечения СА+РА имеет сложный механизм, включающий несколько параллельных сигнальных путей. Антифибротический эффект СА и RA *in vivo* сравнивали с эффектом витамина Е в модели фиброза, индуцированного BLM у крыс. Авторы обнаружили сопоставимое снижение индекса фиброза при применении КА, РА и КА+РА, уменьшение отложения коллагена и нормализацию маркеров оксидантного стресса. Таким образом, антифибротический эффект КА+РА обусловлен синергетическим проапоптотическим действием на фибробласты легких и миофибробласты.

Молекулы гомосеринлактона (ГЛ) выполняют функцию сигналов кворума для грамотрицательных бактерий. Растения также производят ранее не идентифицированные соединения, которые влияют на чувство кворума [8]. Авторы этой работы идентифицировали розмариновую кислоту как соединение растительного происхождения, которое функционирует как имитатор ГЛ. Анализы *in vitro* показали, что розмариновая кислота связывается с регулятором чувства кворума RhIR *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 и конкурирует с бактериальным лигандом N-бутаноил-гомосеринлактоном (C4-HSL). Более того, розмариновая кислота стимулировала *in vitro* большее усиление транскрипции, опосредованной RhIR, чем C4-HSL. У *P. aeruginosa* розмариновая кислота индуцировала экспрессию генов, зависящих от кворум-сенсинга, а также усиливала образование биопленки и продукцию факторов вирулентности пиоцианина и эластазы. Поскольку заражение *P. aeruginosa* PAO1 индуцирует секрецию розмариновой кислоты корнями растений, наши результаты указывают на то, что секреция розмариновой кислоты является защитным механизмом растений, стимулирующим преждевременный ответ кворум-сенсинга. *P.*

aeruginosa — повсеместно распространенный патоген, поражающий растения и животных; поэтому идентификация розмариновой кислоты как индуктора преждевременного ответа кворум-сенсинга может быть полезна в сельском хозяйстве и может быть использована для разработки терапевтических стратегий для человека.

5. Применение физико-химических методов для определения розмариновой кислоты в растительных организмах

Розмариновая кислота использовалась в традиционной медицине как антиоксидант, противовоспалительное, противораковое и антибактериальное средство [9]. Для контроля качества растительного сырья была разработана валидация определения розмариновой кислоты с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии. Целью данного исследования была валидация метода ВЭЖХ для оценки уровней розмариновой кислоты и применение этого метода для определения розмариновой кислоты в *Rosmarinus officinalis*, *Symphytum officinale*, *Mentha piperita*, *Orthosiphon stamineus* и *Salvia officinale*. Хроматографическое разделение проводили на обращенно-фазовой колонке C18 с подвижной фазой 0,1% муравьиной кислоты и ацетонитрила и изократическим элюированием со скоростью потока 0,5 мл/мин. Длина волны для детектирования была установлена на 330 нм. Метод был валидирован на точность, правильность, линейность, предел обнаружения и предел количественного определения. Концентрационная зависимость детектора была линейной с коэффициентом определения 0,9933. Точность метода ВЭЖХ составила $101,00 \pm 6,43\%$. Прецизионность, выраженная в виде коэффициента вариации (CV), составила 6,36%. Максимальное содержание розмариновой кислоты в экстракте *Rosmarinus officinalis* составило $214,86 \pm 0,60$ мкг/мл. Метод ВЭЖХ пригоден для анализа содержания розмариновой кислоты. Метод может быть применен для рутинного определения розмариновой кислоты в фитопармацевтических продуктах.

Отмечается [10], что хитозан — поликатионный полисахарид, полученный из хитина, который признан эффективным элиситором в образовании вторичных метаболитов многих лекарственных растений. В данном исследовании изучалось влияние абиотического элиситора (хитозана) в различных концентрациях на накопление розмариновой кислоты (РК) и общего количества фенолов в культурах побегов мелиссы.

Обработка побегов хитозаном привела к заметной индукции активности фенилаланинаммиаклиазы (ФАЛ), каталазы (КАТ), гваяколпероксидазы (ГП) и липоксигеназы (ЛОК). Кроме того, в обработанных хитозаном побегах мелиссы увеличилась экспрессия генов PAL1, TAT и RAS, а также накопление РК и фенольных

соединений. Обработка хитозаном также увеличила накопление H_2O_2 и экспрессию RВОН – важного гена, участвующего в образовании АФК. Кроме того, повышение экспрессии гена OPR экзогенным хитозаном было связано с индукцией эндогенной JA, определяемой методом ГХ-МАС. Настоящее исследование показало, что индуцированная хитозаном продукция розмариновой кислоты связана с активацией ферментов, связанных с защитными механизмами, повышением экспрессии генов TAT и RAS и стимуляцией биосинтеза JA.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Marchev A.S., Vasileva L.V., Amirova K.M., Savova M.S. Rosmarinic acid – From bench to valuable applications in food industry // Trends in Food Science and Technology. 2021. Vol. 117. pp. 182-193.
2. Fletcher R.S., Slimmon T., Skott L.S. Environmental Factors Affecting the Accumulation of Rosmarinic Acid in Spearmint (*Mentha spicata* L.) and Peppermint (*Mentha piperita* L.) // Open Agricultural Journal. 2010. Vol. 4. pp. 10-16.
3. Aldoghachi F.E., Al-Mousawi U.M., Shari F.H. Antioxidant Activity of Rosmarinic Acid Extracted and Purified from *Mentha piperita* // Archives of Razi Institute. 2021. Vol. 76. N 5. pp. 1279-1287.
4. Babalar M., Mumivand H., Hadian J., Beheshti Sh. Effects of Nitrogen and Calcium Carbonate on Growth, Rosmarinic Acid Content and Yield of *Satureja hortensis* L. // Journal of Agricultural Science. 2010. Vol. 2. N 3. pp. 92-98.
5. Wang J., Jianquan W., Yanan L., Guobiao L. Exogenous Application of Rosmarinic Acid Enhances Seed Salt Tolerance of *Cucumis Melo* L. In a Polyamine Signaling-Dependent Manner // In a Polyamine Signaling-Dependent Manner. 2021. N 2. pp. 257-262.
6. Ghasemian S., Masoudian N., Nematpour F.S., Afshar A.S. Selenium enhances nutrient uptake and rosmarinic acid biosynthesis in *Melissa officinalis* L. under salinity stress // Iranian Journal of Plant Physiology. 2020. Vol. 11. N 1. pp. 112-116.
7. Bahri S., Mies F., Ben Ali R., Mlika M. Rosmarinic acid potentiates carnosic acid induced apoptosis in lung fibroblasts // PLOS One. 2017. Vol. 12. N 9. pp. 184368-184372.
8. Corral-Lugo A., Daddaoua A., Ortega A., Espinosa-Urgel M. Rosmarinic acid is a homoserine lactone mimic produced by plants that activates a bacterial quorum-sensing regulator // Science Signaling. 2016. Vol. 9. N 409. pp. 312-318.
9. Syarifah A.N., Suryadi H., Munim A. Validation of Rosmarinic Acid Quantification using High- Performance Liquid Chromatography in Various Plants // Pharmacognosy Journal. 2021. Vol. 14. N 1. pp. 165-171

10. Vanda Gh., Shabani L., Razavizadeh R. Chitosan enhances rosmarinic acid production in shoot cultures of *Melissa officinalis* L. through the induction of methyl jasmonate // *Botanical Studies*. 2019. Vol. 60. pp. 26-41.

REFERENCES

1. Marchev A.S., Vasileva L.V., Amirova K.M., Savova M.S. Rozmarinovaya kislota – ot laboratornykh issledovaniy do tsennykh primeneniye v pishевой promyshlennosti. [Rosmarinic acid - From bench to valuable applications in food industry] // *Trends in Food Science and Technology*. 2021. Vol. 117. pp. 182-193.

2. Fletcher R.S., Slimmon T., Skott L.S. Faktory pkruzhayushey sredy, vliyayushie na nakoplenie rozmarinovoy kisloty v myate kolosistoy (*Mentha spicata* L.) I myate perechnoy (*Mentha piperita* L.). [Environmental Factors Affecting the Accumulation of Rosmarinic Acid in Spearmint (*Mentha spicata* L.) and Peppermint (*Mentha piperita* L.)] // *Open Agricultural Journal*. 2010. Vol. 4. pp. 10-16.

3. Aldoghachi F.E., Al-Mousawi U.M., Shari F.H. Antioksidantnaya aktivnost rozmarinovoy kisloty, vydelennoy I ochishennoy iz *Mentha piperita*. [Antioxidant Activity of Rosmarinic Acid Extracted and Purified from *Mentha piperita*] // *Archives of Razi Institute*. 2021. Vol. 76. N 5. pp. 1279-1287.

4. Babalar M., Mumivand H., Hadian J., Beheshti Sh. Vliyanie azota I karbonata kaltsiya na rost, sodержanie rozmarinovoy kisloty I urozhaynost *Satureja hortensis* L. [Effects of Nitrogen and Calcium Carbonate on Growth, Rosmarinic Acid Content and Yield of *Satureja hortensis* L.] // *Journal of Agricultural Science*. 2010. Vol. 2. N 3. pp. 92-98.

5. Wang J., Jianquan W., Yanan L., Guobiao L. Ekzogennoe primeneniye rozmarinovoy kisloty povyshaet soleustoychivost semyan *Cucumis Melo* L. zavisimym ot poliaminnoy signalizatsii obrazom. [Exogenous Application of Rosmarinic Acid Enhances Seed Salt Tolerance of *Cucumis Melo* L. In a Polyamine Signaling-Dependent Manner] // *In a Polyamine Signaling-Dependent Manner*. 2021. N 2. pp. 257-262.

6. Ghasemian S., Masoudian N., Nematpour F.S., Afshar A.S. Selen usilivaet usvoeniye pitatelnykh veshestv I biosintez rozmarinovoy kisloty u *Melissa officinalis* L. v usloviyakh solevogo stressa. [Selenium enhances nutrient uptake and rosmarinic acid biosynthesis in *Melissa officinalis* L. under salinity stress] // *Iranian Journal of Plant Physiology*. 2020. Vol. 11. N 1. pp. 112-116.

7. Bahri S., Mies F., Ben Ali R., Mlika M. Rozmarinovaya kislota usilivaet apoptoz, indutsirovannyi karnozinovo kislotoy, v fibroplastakh legkikh. [Rosmarinic acid potentiates carnosic acid induced apoptosis in lung fibroblasts] // *PLOS One*. 2017. Vol. 12. N 9. pp. 184368-184372

8. Corral-Lugo A., Daddaoua A., Ortega A., Эспиноса-Ургель М. Rozmarinovaya kislota – eto analog homoserinlaktona, vyrabatyvaemyi rasteniyami, kotoryi aktiviruet bakterialnyi regulyator kvorum-sensinga. [Rosmarinic acid is a homoserine lactone mimic produced by plants that activates a bacterial quorum-sensing regulator] // Science Signaling. 2016. Vol. 9. N 409. pp. 312-318.

9. Syarifah A.N., Suryadi H., Munim A. Validatsiya kolichestvennogo opredeleniya rozmarinovoy kisloty s ispolzovaniem vysokoeffektivnoi zhidkostnoy chromatographii v razlichnykh rasteniyakh. [Validation of Rosmarinic Acid Quantification using High- Performance Liquid Chromatography in Various Plants] // Pharmacognosy Journal. 2021. Vol. 14. N 1. pp. 165-171.

10. Vanda Gh., Shabani L., Razavizadeh R. Khitin usilivaet vyrabotku rozmarinovoi kisloty v kulturakh pobegov Melissa officinalis L. za xet induktsii metilzhasmonata. Chitosan enhances rosmarinic acid production in shoot cultures of Melissa officinalis L. through the induction of methyl jasmonate] // Botanical Studies. 2019. Vol. 60. pp. 26-41.

Информация об авторах

Г.З. Гейдарли – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Химия и технология циклоалкилфенолов»;

Г.Ф. Гаджиева – докторант лаборатории «Химия и технология циклоалкилфенолов»;

Ч.К. Расулов – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией «Химия и технология циклоалкилфенолов»;

К.Ш. Алиева – докторант, младший научный сотрудник лаборатории «Химия и технология циклоалкилфенолов».

Information about the author

G.Z. Heydarli – Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher at the Laboratory of Chemistry and Technology of Cycloalkylphenols;

G.F. Hajiyeva – Doctoral Student at the Laboratory of Chemistry and Technology of Cycloalkylphenols;

Ch.K. Rasulov – Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Laboratory of Chemistry and Technology of Cycloalkylphenols;

K.Sh. Aliyeva – Doctoral Student, Junior Researcher at the Laboratory of Chemistry and Technology of Cycloalkylphenols.

Вклад авторов

Г.З. Гейдарли – сбор материала;

Г.Ф. Гаджиева – систематизация результатов;

К.Ш. Алиева – сбор материала, обработка материала;

Ч.К. Расулов – научное редактирование текста; концепция исследования;

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

G.Z. Heydarli – collection of materials;

G.F. Hajiyeve – experimental part;

K.Sh. Aliyeva – systematization of results;

Ch.Q. Rasulov – data collection, data processing.

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.04.2026; принята к публикации 25.05.2026.

The article was submitted 21.04.2026; accepted for publication 25.05.2026.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 547.541.3

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-124-140

Ирада Расул гызы Сафарова¹, Миннавар Джафар гызы Ибрагимова²

*^{1,2} Институт нефтехимических процессов Министерства науки и образования Азербайджана, Баку
elnaramahmudova79@gmail.com*

ТЕТРАЦИКЛОДОДЕЦЕН: СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация. Тетрациклододецен представляет собой полициклический олефин, состоящий из четырех циклов и содержащий в своем составе одну двойную связь. Наличие жесткой каркасной структуры предопределяет особые свойства этого соединения. Основным направлением его применения является полимерная промышленность, поскольку преимущественно он используется для синтеза особых полимеров и сополимеров. В этой работе нами рассмотрены наиболее основные свойства тетрациклододецена.

Ключевые слова: тетрациклододецен, полимеры, сополимеры, каркасная структура

Для цитирования: Сафарова И.Р., Ибрагимова М.Д. Тетрациклододецен: свойства и области применения // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М.Акмиллы. Серия: Естественные науки. 2026. №2. С. 124-140.

CHEMICAL SCIENCES

Original article

Irada Rasul Safarova¹, Minnavar Djafar Ibrahimova²

*^{1,2} Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of Science and Education of Azerbaijan, Baku,
elnaramahmudova79@gmail.com*

TETRACYCLODODECENE: PROPERTIES AND APPLICATION FIELDS

Abstract. Tetracyclododecene is a polycyclic olefin consisting of four rings and containing one double bond. The presence of a rigid framework structure determines the unique properties of this compound. Its primary application is in the polymer industry, as it is primarily used to synthesize special polymers and copolymers. In this paper, we examine the most basic properties of tetracyclododecene.

Key words: tetracyclododecene, polymers, copolymers, framework structure

For citing: Safarova I.R., Ibrahimova M.Dj. Tetracyclododecene: properties and application fields // Bulletin of Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmully. Series: Natural Sciences. 2026. №2. pp. 124-140.

В представленной работе рассмотрены результаты исследований в области изучения свойств тетрациклододецена, а также его применение в полимерной промышленности для синтеза полимеров и сополимеров особого назначения.

1. Общая характеристика тетрациклододецена

Тетрациклододецен (ТЦД) представляет собой прозрачную жидкую мономерную молекулу, используемую для получения специальных полимеров (СПП) с превосходной оптической прозрачностью, высокой термостойкостью и низким водопоглощением, полезных в электронике и оптике; его физические свойства включают температуру кипения около 93°C , удельную плотность $\sim 1,02 \text{ г/см}^3$ и показатель преломления $\sim 1,52$; его структура характеризуется сложной системой конденсированных колец и двойной связью, что делает его реакционноспособным для полимеризации с использованием катализаторов, таких как металлоцены. Химическая формула тетрациклододецена имеет вид $\text{C}_{12}\text{H}_{16}$. Другое название тетрациклододецена 1,2,3,4,4А,5,8,8А-октагидро-1,4:5,8-диметано-нафталин. Строение тетрациклододецена показано ниже:

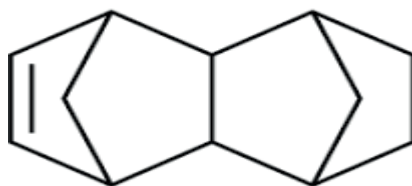


Рис. 1. Химическое строение тетрациклододецена

Это конденсированная полициклическая структура с двойной связью, существующая в виде различных изомеров (например, эндо, экзо- или эндо,эндо-). Молекулярная масса: приблизительно составляет 160,25 г/моль. Физические и химические данные (для распространенного изомера, например, тетрацикло[6.2.1.13,6.02,7]додец-4-ена): температура кипения: $\sim 93^{\circ}\text{C}$ (при пониженном давлении). плотность: $\sim 1,02 \text{ г/см}^3$. показатель преломления: $\sim 1,52$. температура вспышки: $\sim 85^{\circ}\text{C}$. Он имеет очень низкую полярность (низкое количество доноров/акцепторов водородных связей). Тетрациклододец-4-ен служит строительным блоком для циклических олефиновых сополимеров (ЦОС) и терполимеров (КОТ). Полимеры на основе ТЦД обладают высокой прозрачностью, термической стабильностью, хорошей маслостойкостью и улучшенными механическими свойствами (например, упрочнением при деформации) по сравнению с более простыми циклическими олефинами, такими как норборнен (NBE). Для полимеризации используются металлоорганические катализаторы, включая системы Циглера-Натта и металлоценовые системы, для образования высокоэффективных пластмасс. По сути, жесткая, объемная структура ТСД обеспечивает улучшенные свойства материала при полимеризации, что делает его ценным для оптических линз, медицинских устройств и высококачественной упаковки. Производные ТЦД используются в электронике, аэрокосмической отрасли и лакокрасочных материалах благодаря низким диэлектрическим постоянным, превосходным механическим свойствам и химической стойкости. Кроме того, он служит строительным блоком для синтеза специфических изомеров и функционализированных молекул, часто применяется в синтезе полимеров для фотолитографии с длиной волны 193 нм и 248 нм в полупроводниковой промышленности

Синтез производных тетрациклододецена неоднократно сообщался в работах [1-5]

2. Применение тетрациклододецена в синтезе полимеров и сополимеров

Авторы работы [6] сообщают о синтезе полинорборнена (поли(NBE)) и поли(эндо(анти-тетрациклододецена) (поли(TCD))) с содержанием более 98% цис-изотактических и цис-синдиотактических соединений. Цис-изотактические поли(NBE) и поли(TCD) были получены с использованием инициаторов на основе бифенолат-имидоалкилидена $\text{Mo}(\text{NR})(\text{CHCMe}_2\text{Ph})(\text{Biphen})$ (Biphen = например, 3,3'-(t-Bu)2-5,5'-6,6'-(CH₃)4-1,1'-бифенил-2,2'-диолат), тогда как цис,синдиотактические поли(NBE) и поли(TCD) были получены с использованием инициаторов на основе вольфрама имидного или оксомоноарилоксидпирролида (MAP), $\text{W}(\text{X})(\text{CHR}')(\text{Pyrrolide})(\text{OTer})$ (X

= NR или O; OTer = 2,6-терфеноксид). Добавление 1-гексена или координирующих растворителей, таких как ТГФ, не снижает стереоспецифичность полимеризации. Цис,изо- и цис,синдиодиады можно различить, изучив спектры ЯМР ^1H и ^{13}C двух полимеров в смеси. Полимеры были гидрированы с образованием изотактического и синдиотактического Н-поли(NBE) и Н-поли(TCD).

Новые комплексы вольфрама на основе тридентатного лиганда [O,N,O]-2-[(4-гидрокси-3-пентен-2-илиден)амино]фенола (hpar) были синтезированы путем прямой лигации лиганда к WOCl_4 , что привело к вытеснению двух хлоридных групп из металлического центра и образованию цис- и транс-изомеров соответствующего дихлоридного комплекса [7]. Молекулярная структура цис-[$\text{WOCl}_2(\text{hpar})$] была подтверждена методом рентгеновской кристаллографии. Синтезированный [$\text{WOCl}_2(\text{hpar})$], представляющий собой смесь цис- и транс-изомеров, продемонстрировал способность образовывать высокоактивный катализатор в реакции метатезиса с раскрытием кольца (ROMP) циклических олефинов, таких как тетрациклододецэн TCD и MCMT, в сочетании с триалкилалюминием в качестве промотора. Однако эффективность метатезиса полярно замещенных мономеров оказалась несколько ниже, что может быть связано с взаимодействием полярных групп мономеров с компонентами катализатора. Химическая структура полученного в результате ROMP поли-TCD была охарактеризована с помощью одномерной и двумерной спектроскопии ЯМР ^1H и ЯМР ^{13}C .

Впервые были тщательно исследованы изоспецифические и синдиоселективные полимеризации с раскрытием кольца методом метатезиса (ROMP) норборнена (NB) и тетрациклододецэна (TCD), а также их тактические (и атактические) гидрированные полимерные продукты с раскрытым кольцом [8]. В случае полимеризации NB были достигнуты цис-изоспецифические ROMP NB с использованием катализатора на основе $\text{Mo}(=\text{O})(\text{rac-5,5',6,6'-Me}_4\text{-3,3'-t-Bu}_2\text{-бифенолата})_2$ (цис = 100%, изотактичность = 100%). Цис-синдиоселективные ROMP NB протекали в присутствии катализаторов на основе $\text{W}(=\text{NPh})\text{Cl}_4 \cdot \text{Et}_2\text{O}$ и $\text{W}(=\text{N-2,6Me}_2\text{Ph})\text{Cl}_4 \cdot \text{Et}_2\text{O}$ (цис = 90%, синдиотактичность = 90%). Гидрогенизированные поли(NB) демонстрировали высокую кристалличность независимо от их стереоструктуры. Кристаллическая природа синдиотактического гидрогенизированного поли(NB) (синдиотактичность = 90%: $T_m = 130\text{--}136\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta H = 60\text{--}75\text{ Дж/г}$, $w_c = 0,55\text{--}0,70$) была близка к кристаллической природе обычного атактического поли(NB) (мезо/раце́мо = 50/50: $T_m = 145\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta H = 65\text{--}70\text{ Дж/г}$, $w_c = 0,65$). Напротив, изотактический гидрированный поли(NB) характеризовался удивительно уникальной кристаллической природой, такой как

высокие температуры плавления (изотактичность > 90%: $T_m = 160\text{--}180$ °C, $\Delta H = 50\text{--}90$ Дж/г, $w_c = 0,50\text{--}0,65$). В случае полимеризации TCD катализатор на основе $W(=NPh)Cl_4 \cdot Et_2O$ обеспечивал цис-синдиоселективную ROMP TCD (цис = 90%, синдиотактичность = 86%). Синдиотактический гидрированный поли(TCD), полученный с помощью катализатора на основе $W(=NPh)Cl_4 \cdot Et_2O$, был полностью аморфным и растворимым в обычных органических растворителях. С другой стороны, атактический гидрированный поли(TCD) показал плохую растворимость и полукристалличность ($T_m = 290$ °C, $\Delta H < 10$ Дж/г). Кроме того, катализатор на основе $Mo(=O)(rac\text{-}5,5',6,6'\text{-}Me_4\text{-}3,3'\text{-}t\text{-}Bu_2\text{-}бифенолат)_2$ обеспечил получение полностью цис-поли(TCD), гидрированный продукт которого был полностью нерастворим и обладал высокой степенью кристалличности ($T_m > 350$ °C, $w_c = 0,65$). Эти тенденции существенно контрастируют с характеристиками гидрированных поли(эндо-дициклопентадиенов), в которых атактический полимер является аморфным, а оба тактических полимера — кристаллическими (синдиотактичность = 90%; $T_m = 270$ °C и изотактичность > 95%; $T_m = 295$ °C соответственно).

Была синтезирована и охарактеризована серия новых алициклических полимеров, предназначенных для использования в качестве фоторезистивных материалов с длиной волны 193 нм [9]. Эти смолы основаны на циклоалифатических сополимерах и терполимерах 2-метилпропилбицикло[2.2.1]гепт-5-ен-2-карбоксилата (тривиальное название, карбо-трет-бутоксинорборнен), бицикло[2.2.1]гепт-5-ен-2-карбоновой кислоты (тривиальное название, норборненкарбоновая кислота), 8-метил-8-карбокситетрацикло[4,4,0,1,2,5]гепт-3-ена (тривиальное название, метилтетрациклододеценкарбоновая кислота), 5-(гидроксиметил)-2-норборнен-2-метанола и малеинового ангидрида, которые были синтезированы методами свободнорадикальной полимеризации, полимеризации с катализируемым $Pd(II)$ присоединением и полимеризации с раскрытием кольца методом метатезиса. Полимеры, полученные методом полимеризации с раскрытием кольца методом метатезиса, были гидрированы для получения еще одного представителя этой группы материалов. Полимеры растворимы в обычных органических растворителях и имеют температуры стеклования от менее 60 °C до более 250 °C в зависимости от их специфической структуры и способа полимеризации. Низкое поглощение этих полимеров на длине волны 193 нм и их высокая устойчивость к реактивному ионному травлению делают их привлекательными кандидатами для применения в резистах с длиной волны 193 нм.

Одновременные измерения переходного растягивающего напряжения и двулучепреломления проводились при одноосном

растяжении с постоянной скоростью деформации Хенки на новом олефиновом сополимере этилена (Е) и тетрациклододецена (ТД) с тремя различными содержаниями ТД от 20 до 41 мол% [10]. Для сополимера с низким содержанием ТД вязкость растяжения показала лишь умеренное увеличение со временем растяжения t или деформацией Хенки и коэффициент оптического напряжения оставался практически постоянным во всем исследованном диапазоне σ . С другой стороны, для других образцов с высоким содержанием ТД ($\geq 30\%$) мы наблюдали сильное увеличение η_E , часто называемое упрочнением, вызванным деформацией, и быстрое уменьшение S с увеличением σ . Поскольку цепи сополимера растягивались из запутанного состояния, большее количество громоздких групп ТД в последнем может подавлять вызванные потоком конформационные изменения и препятствовать распутыванию цепей, что приводит к увеличению σ и уменьшению S .

Показано [11], что циклические олефиновые сополимеры (ЦОС) – перспективные аморфные материалы с высокой прозрачностью, влаго- и термостойкостью. Некоторые ЦОС используются в качестве сверхчистых (применимо в современной фармацевтической упаковке, пленках, контактирующих с пищевыми продуктами), кристалльно чистых (стекловидных, аморфных), высокобарьерных (устойчивых к влаге, спиртам, кислотам) материалов. Авторы работы осуществили эффективный синтез сополимеров этилена с тетрациклододеценом (ТЦД) с замечательной каталитической активностью и эффективным включением ТЦД, используя модифицированный кетимидом полутитаноценовый катализатор. Таким образом, в этом катализе был достигнут синтез ЦОС с высокой температурой стеклования.

Высокоэффективный синтез сополимеров циклических олефинов (СО) с высокими температурами стеклования (T_g), а также высокой каталитической активностью был достигнут не только путем сополимеризации норборнена (NBE) с α -олефинами (1-гексен, 1-октен, 1-додецен), но и путем сополимеризации тетрациклододецена (TCD) с α -олефинами с использованием полутитаноценовых катализаторов $Cr'TiCl_2(N=CtBu_2)$ [$Cr' = tBuC_5H_4$ (1), Cr (2)] в присутствии MAO. Во всех случаях наблюдалась линейная зависимость между значениями T_g и содержанием NBE или TCD; значения T_g в поли(TCD-со- α -олефинах) были выше, чем в поли(NBE-со- α -олефинах) с тем же содержанием СО [7]. Включение NBE и TCD в эти сополимеризации при высоких концентрациях NBE или TCD (особенно при использовании соединения 2) не зависело от используемого α -олефина (количества метиленовых звеньев в боковой цепи). Введение концевой олефиновой двойной связи в боковую цепь полимера могло быть достигнуто, если сополимеризация NBE с 1-

октеном с использованием соединения 1 проводилась в присутствии 1,7-октадиена [12].

(tBuC₅H₄)TiCl₂(N=CtBu₂) продемонстрировал замечательную каталитическую активность (12 000–43 700 кг-полимера/моль-Ti·ч) и эффективное включение сомономера в сополимеризацию этилена с тетрациклододеценом (TCD) в присутствии метилалюмоксана, при этом каталитическая активность 1 возрастала даже при 60 °С. Полученные полимеры представляют собой высокомолекулярные аморфные поли(этилен-со-TCD) ($M_n = 5,88\text{--}7,03 \times 10^5$) с однородным составом (с высокими значениями T_g, 108–203 °С); наблюдалась линейная зависимость между значениями T_g и содержанием TCD. [13]

В работе [14] рассмотрены избранные результаты синтеза циклических олефиновых сополимеров (ЦОС) — особенно сополимеризации норборнена (НБЭ) или тетрациклододецена (ТЦД) с этиленом и α-олефинами (1-гексен, 1-октен, 1-додецен) — с использованием комплексных катализаторов на основе переходных металлов 4-й группы (титана и циркония). Полутитаноцены, содержащие анионный вспомогательный донорный лиганд $\text{Cr}'\text{TiX}_2(\text{Y})$ (Cr' = циклопентадиенил; X = галоген, алкил; Y = анионный донорный лиганд, такой как арилокси, кетимид, имидазолин-2-иминато и др.), являются эффективными катализаторами для эффективного синтеза новых ЦОС; модификации лиганда играют важную роль в желаемой сополимеризации. Эти новые ЦОС обладают многообещающими свойствами (высокая прозрачность, термостойкость (высокая температура стеклования), низкое водопоглощение и т. д.), что демонстрирует, что разработка эффективного катализатора играет важную роль в синтезе новых тонких полиолефинов с заданными свойствами.

Циклические насыщенные сополимеры были получены из 8-метил-8-метоксикарбонилтетрацикло[4.4.0.12,5.17,10]додец-3-ена (ММТ) с полярной сложноэфирной группой и дициклопентадиена (ДКП) без полярной группы [15]. Процедура включала полимеризацию с раскрытием кольца методом метатезиса (ROMP) с последующим гидрированием. Реакционная способность мономера ДКП была выше, чем у ММТ; отношение реакционной способности мономера $r_{\text{DCP}}/r_{\text{MMT}}$ варьировалось от 2,135 до 1,159 в диапазоне температур от 80 до 130 °С. Эти кинетические результаты показали, что сополимер имеет распределение состава ДКП в макромолекулярной цепи, что может обуславливать интересное агрегационное поведение. Агрегационное поведение гидрированного сополимера и гомополимера в различных растворителях также было исследовано с помощью динамического рассеяния света (DLS) и статического рассеяния света (SLS). Анализ методом динамического рассеяния света

(DLS) показал, что быстрый режим в каждом полимере обусловлен диффузионным движением каждой отдельной полимерной цепи, тогда как медленный режим в сополимере вызван агрегацией полимеров. Степень агрегации сополимера уменьшалась с увеличением гидрофобности растворителя, уменьшением концентрации полимера, уменьшением молекулярного размера растворителя и повышением температуры. На основе этих данных был выяснен механизм агрегационного поведения, согласно которому богатый ДКП-звенья в макромолекуле могут выступать в качестве ядра, вызывающего агрегацию в плохом растворителе.

Полимеризация с раскрытием кольца методом метатезиса (ROMP) полициклического олефинового мономера (тетрациклододецена, TCD) проводилась с использованием различных каталитических систем [16]. В качестве катализаторов использовались тройная система на основе титана (тетрахлорид титана, $TiCl_4$ /триэтилалюминий, Et_3Al /триэтиламин, Et_3N), тройная система на основе вольфрама (гексахлорид вольфрама, WCl_6 /триизобутилалюминий, $(i-Bu)_3Al$ /этанол) и бензилиденовый катализатор на основе рутения (катализатор Граббса 1-го порядка). Катализатор Граббса 1-го порядка оказался наиболее активным в ROMP TCD. Было установлено, что катализатор на основе вольфрама более активен, чем катализатор на основе титана. В отличие от катализаторов на основе титана и Граббса 1-го порядка, ROMP TCD с катализатором на основе вольфрама была очень чувствительна к гелеобразованию в ходе реакции. Подробно исследовано влияние этанола, концентрации WCl_6 , соотношения TCD/ WCl_6 и 1-гексана на выход полимеризации и образование полимерного геля, а также определены оптимизированные условия ROMP. Химическая структура синтезированного полимера была охарактеризована с помощью одномерной и двумерной спектроскопии ядерного магнитного резонанса ^{13}C при 150 МГц и 1H при 600 МГц, молекулярные массы были измерены с помощью гель-проникающей хроматографии, а термические свойства — с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии. Числовые средние молекулярные массы (M_n) полимера находились в диапазоне $1,5\text{--}4,7 \times 10^4$ г/моль, а температуры стеклования — в диапазоне 185–220 °C.

Были исследованы полимеризации с раскрытием кольца (ROMP) норборнена (NBE) и тетрациклододецена (TCD) в присутствии цис-циклооктена (COE) с использованием ванадий-алкилиденевого катализатора $V(CHSiMe_3)(N-2,6-Cl_2C_6H_3)(OC_6F_5)(PMe_3)_2$. Полимеризация с TCD позволила получить высокомолекулярные полимеры ($M_n = 19\,500\text{--}47\,400$) с низкими значениями PDI (M_w/M_n) (1,18–1,38), которые обладают микроструктурой, состоящей из

повторяющихся раскрытых колец TCD и некоторых метиленовых звеньев за счет включения раскрытого кольца COE, на основе анализа микроструктуры с помощью спектров ЯМР и термограмм ДСК; гидрированный сополимер имел температуру плавления 294 °C [17].

Первый пример сополимеризации тетрациклододецена (ТД) со стиролом, а также норборнена (НБ) со стиролом, катализируемой переходными металлами, был получен с использованием комплекса никеля(II) в присутствии МАО [18]. Высокое содержание циклических олефинов в этих сополимерах было подтверждено измерениями ЯМР ¹H. Кривые ГПХ для всех сополимеров являются одномодальными, а соотношение Mw/Mn как в гомополимерных, так и в сополимерных образцах имеет довольно узкий диапазон значений. Эти результаты показывают, что гомо- и сополимеризация происходят на одном активном центре. Содержание циклических олефинов в этих сополимерах можно изменять, изменяя соотношение сомономеров в исходной смеси. Сополимеры ТД/стирол показали более высокое значение Tg, чем сополимеры НБ/стирол, и значение Tg увеличивалось с увеличением содержания ТД.

Триалкилсилилзамещенные полусэндвичевые титановые комплексы, содержащие кетимидные лиганды, (RC₅H₄)TiCl₂(N[двойная связь, длина как m-типе]CtBu₂) (R = SiMe₃, SiEt₃), особенно аналог SiEt₃, продемонстрировали превосходную каталитическую активность с эффективным включением норборнена (NBE) (25 700–91 400 кг полимера на моль Ti/ч; NBE 36,2–72,7 мол%) в сополимеризации этилена/NBE при 50 °C с получением высокомолекулярных сополимеров с высоким содержанием NBE (NBE > 60 мол%). Эти комплексы также продемонстрировали превосходную способность к эффективному синтезу сополимеров этилена с тетрациклододеценом (ТЦД) при 50 °C, а также был достигнут синтез высокомолекулярных сополимеров с высокими температурами стеклования (Tg = 255 °C, ТЦД 52,3 мол.%). С помощью этих катализаторов был продемонстрирован эффективный синтез высокомолекулярных циклических олефиновых сополимеров (ЦОС), обладающих высокими значениями Tg [19].

Циклоолефиновые сополимеры представляют собой новый класс полимерных материалов, обладающих такими свойствами, как высокая температура стеклования, оптическая прозрачность, низкая усадка, низкое влагопоглощение и низкое двулучепреломление [20]. Существует несколько типов циклических олефиновых сополимеров, основанных на различных типах циклических мономеров и методах полимеризации. В сополимеризации этилена/норборнена (Е/НВ) катализатор iPr(Cp)(Flu)ZrCl₂ показал более высокую активность, чем катализаторы Cp₂ZrCl₂ и rac-Et(Ind)₂ZrCl₂. При включении

норборнена в сополимер температура стеклования (T_g) сополимера повысилась. T_g сополимера увеличилась до 190°C . Пропускание сополимеров превышало 90% в диапазоне 300–900 нм. Показатель преломления (RI) сополимера этилена/тетрациклододецена (E/TCD) был выше, чем у сополимера E/NB. Показатель преломления сополимера E/NB не изменялся с увеличением содержания NB, однако показатель преломления сополимера E/TCD увеличивался с увеличением содержания TCD. Соплимер E/NB обладает очень низким двулучепреломлением, а его пленка имеет очень гладкую поверхность.

Изучены деформационно-индуцированное упрочнение и двулучепреломление при течении на сополимерах этилена-тетрациклододецена (E–TD) и этилена-норборнена (E–NB) различного состава, подвергнутых одноосному растяжению с постоянной скоростью деформации Хенки от 0,01 до 1,0 с⁻¹ в температурном диапазоне от $+40$ до $+60^\circ\text{C}$ выше их соответствующих температур стеклования T_g [21]. При сравнении при соответствующей температуре, например, $T_g+50^\circ\text{C}$, сополимер E–TD демонстрировал более сильную тенденцию к деформационно-индуцированному упрочнению, чем сополимер E–NB с соответствующим содержанием сомономера. Для сополимера E–NB во всем диапазоне его состава соблюдалось правило оптического напряжения (SOR), тогда как для сополимера E–TD правило SOR было справедливо только для низкого содержания TD (<30 мол%), но недействительно для высокого содержания TD (≥ 30 мол%). Результаты показывают, что увеличение доли более громоздкого сомономера TD может быть молекулярной причиной сильного упрочнения, вызванного деформацией, а также причиной недействительности SOR для сополимера E–TD с высоким содержанием TD. Для двух сополимеров, удовлетворяющих SOR, коэффициент оптического напряжения C экспоненциально уменьшается с увеличением содержания сомономера, причем эта тенденция сильнее выражена для E–TD, чем для E–NB, что отражает размер сомономера. Графики зависимости коэффициента оптического напряжения C от состава для сополимеров E–NB (блочного типа) и E–TD экстраполированы при нулевом пределе E до $5,5 \times 10^{-10}$ и $7,5 \times 10^{-12}$ Па⁻¹ соответственно, которые, как ожидается, будут соответствовать значениям C для гомополимеров NB и TD, если такие полимеры существуют.

Сополимеры пропилена (P) с рядом циклических олефинов [циклопентен (CPE), циклогексен (CHE), дис-циклооктен (COE), трицикло[6.2.1.0(2,7)]ундека-4-ен (TCUE) и тетрациклододецен (TCD)] были получены в толуоле в присутствии модифицированных феноксидом полутитаноценовых катализаторов, в частности

$\text{Cr}'\text{TiCl}_2(\text{O}-2,6\text{-iPr}_2\text{C}_6\text{H}_3)$ ($\text{Cr}' = 1,2,4\text{-Me}_3\text{C}_5\text{H}_2, \text{tBuC}_5\text{H}_4$) и сокатализатора метилалюмоксана (MAO) [22]. Полученные сополимеры представляют собой аморфные материалы, и их состав был однородным, что подтверждается термограммами ДСК [единственные температуры стеклования (T_g)]. Циклические олефины были включены в сополимеры по механизму 1,2-внедрения, при этом степень включения зависела от типа циклического олефина, а также от природы используемых катализаторов. Содержание СНЕ в сополимерах достигало 6,3 мол. % (при изолированном включении), тогда как содержание СРЕ, СОЕ, TCUE и TCD в сополимерах увеличивалось примерно до 40 мол. % (при смеси изолированных и чередующихся включений) с увеличением концентрации сомономера. Во всех сополимерах была продемонстрирована линейная корреляция между значениями T_g и содержанием циклических олефинов. Циклическая структура влияет на значения T_g в пропиленовых сополимерах, за исключением того, что графики зависимости значений T_g от содержания циклических олефинов были близки в сополимерах Р/СРЕ и Р/СОЕ. В области низкого содержания циклических олефинов (до 25 мол. %) значения температуры стеклования (T_g) в сополимерах пропилена были выше, чем в сополимерах этилена.

В патентах [23, 24] сообщается, что гидрогенизированный полимер на основе тетрациклододецена с раскрытием кольца обладает высокой температурой плавления и стеклования, сохраняет кристалличность после воздействия термической предыстории, включая быстрое охлаждение в результате формования расплава или тому подобное, и демонстрирует высокую термостойкость и технологичность. Поскольку гидрогенизированный полимер на основе тетрациклододецена с раскрытием кольца, имеет изотактическую структуру и высокую скорость кристаллизации, он может быть использован в качестве формовочного материала, текстильного материала и пленкообразующего материала в различных областях.

В патенте [25] предложена композиция тетрациклододецена с регулируемым содержанием тримера циклопентадиена, позволяющей проводить аддитивную полимеризацию с помощью катализатора Циглера, предотвращая при этом гелеобразование, вызванное реакцией сшивания. Раскрывается композиция тетрациклододецена, регулируемая по содержанию определенного ингредиента с молекулярной массой 188, позволяющая получать полимеры с высокими температурами стеклования посредством различных полимеризаций. Кроме того, настоящее изобретение относится к способу получения тетрациклододецена в присутствии алифатического растворителя с температурой кипения, близкой к температуре кипения норборнена, который эффективно препятствует затвердеванию

регенерированного норборнена. Предпочтительным для получения тетрациклододецена высокой чистоты путем удаления метилтетрагидроиндена, содержащегося в исходном дициклопентадиене, является непрерывный процесс, включающий комбинацию реакции, дистилляции, регенерации/циркуляции и т. д.

Полимеризация с раскрытием кольца методом метатезиса (ROMP) этилзамещенного тетрациклододецена (8-этилтетрацикло[4.4.0.12,5.17,10]додец-3-ена, Et-TCD) проводилась в присутствии тройной каталитической системы, состоящей из WCl_6 , триизобутилалюминия (изо-Bu₃Al) и этанола [26]. Оптимальное молярное соотношение Et-TCD/ WCl_6 /изо-Bu₃Al/этанол было определено как 500/1/3/2, при котором выход полимера с раскрытым кольцом составил 100%. Было показано, что 1-гексен является эффективным агентом, контролирующим молекулярную массу в реакции ROMP Et-TCD. Гидрирование полимера с раскрытым кольцом (p-Et-TCD) было успешно проведено с использованием Pd(5 мас. %)/ γ -Al₂O₃ при 80 °C в течение 1 ч. Химические структуры п-Et-TCD и его гидрированного продукта (H₂-п-Et-TCD) были охарактеризованы с помощью двумерной ЯМР-спектроскопии (1H-1H COSY и 1H-13C HSQC).

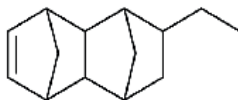


Рис. 2 Химическое строение 8-этилтетрацикло[4.4.0.12,5.17,10]додец-3-ена

Изменения физических свойств, таких как термическая стабильность, температура стеклования и светопропускание после гидрирования, также были исследованы с помощью термогравиметрического анализа (ТГА), дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и УФ-спектроскопии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mi-Zhuan L., Tong O., Yong W.-H., Yang S.-Y. Synthesis of chromone-containing polycyclic compounds via palladium-catalyzed [2+2+1]-annulation // Organic and Biomolecular Chemistry. – 2020. – Vol. 18. – N 6. – pp. 1112-1116.
2. Mamedova Kh.M. Synthesis of tetracyclic esters of glycerine // PPOR. – 2020. – Vol. 21. – N 1. – pp. 45-52.
3. Mamedov M.K., Raruslova R.A., Veliyeva S.A. Synthesis of acrylates based on tetracyclododecene and its methyl derivative // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2012. – Vol. 85. – pp. 327-330.
4. Pat. 112592248A. CN. 2020. Preparation method and application of tetracyclododecene compound.

5. Dugan Ch. Synthesis and characterization of substituted tetracyclododecene ring opening metathesis polymers // Master Thesis. – 2023. – 167 p.

6. Autenrieth B., Schrock R. Stereospecific Ring-Opening Metathesis Polymerization (ROMP) of Norbornene and Tetracyclododecene by Mo and W Initiators // *Macromolecules*. – 2015. – Vol. 48. – N 2. – pp. 2489-2503

7. Nayab S., Park W., Woo H-Y., Sung I.K. Synthesis and characterization of novel tungsten complexes and their activity in the ROMP of cyclic olefins // *Polyhedron*. – 2012. – Vol. 42. – N 1. – pp. 102-109.

8. Hayano Sh., Nakama Y. Iso- and Syndio-Selective ROMP of Norbornene and Tetracyclododecene: Effects of Tacticity Control on the Hydrogenated Ring-Opened Poly(cycloolefin)s // *Macromolecules*. – 2014. – Vol. 42. – N 22. – pp. 7797-7811.

9. Okoroanyanwu U., Shimokawa T., Byers J., Grant Willson C. Alicyclic Polymers for 193 nm Resist Applications: Synthesis and Characterization // *Chem. Mater.* – 1998. – Vol. 10. – N 11. – pp. 3319-3327.

10. Maiti P., Okamoto M., Kojaka T. Elongational flow birefringence of ethylene-tetracyclododecene copolymer // *Polymer*. – 2001. – Vol. 42. – N 8. – pp. 3939-3942.

11. Malonado A. Cyclic olefin copolymers // *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*. – 2016. – Vol. 54. – N 17. – pp. 2641-2825.

12. Zhao W., Nomura K. Copolymerizations of Norbornene and Tetracyclododecene with α -Olefins by Half-Titanocene Catalysts: Efficient Synthesis of Highly Transparent, Thermal Resistance Polymers // *Macromolecules*. – 2016. – Vol. 49. – N 1. – pp. 59-70.

13. Apisuk W., Ito H., Nomura K. Efficient synthesis of cyclic olefin copolymers with high glass transition temperatures by ethylene copolymerization with tetracyclododecene using (tert-BuC₅H₄)TiCl₂(N=CtBu₂)—MAO catalyst // *Journal of Polymer Science. Part A. Polymer Chemistry*. – 2016. – Vol. 54. – N 17. – pp. 2662-2667.

14. Zhao W., Nomura K. Design of efficient molecular catalysts for synthesis of cyclic olefin copolymers by copolymerization of ethylene and α -olefins with norbornene or tetracyclododecene // *Catalysts*. – 2016. – Vol. 6. – N 1. – pp. 175-192.

15. Ogara Y., Makita Y., Okaniwa M. Aggregation behavior of new cyclic saturated copolymers synthesized via ring-opening metathesis polymerization // *Polymer*. – 2008. – Vol. 49. – N 22. – pp. 4819-4825.

16. Jaehoon K., Chun W., Kim W., Junhynk K. Ring-Opening Metathesis Polymerization of Tetracyclododecene Using Various Catalyst

Systems // Journal of Applied Polymer Science. – 2010. – Vol. 116. – N 1. – pp. 479-485.

17. Chaimohgkoikunasin S., Hou X., Nomura K. Ring opening metathesis polymerization of norbornene and tetracyclododecene with cyclooctene by using (arylimido)vanadium(V)–alkylidene catalyst // Journal of Polymer Science. Part A. Polymer Chemistry. – 2017. – Vol. 55. – N 3. – pp. 312-319.

18. Ogata K., Nishimura N., Yunokuchi T., Toyota A. Copolymerization of tetracyclododecene or norbornene with styrene in the presence of Ni(II) complex/MAO catalytic system: First example for transition metal catalyzed copolymerization of tetracyclododecene with styrene // Journal of Applied Polymer Science. – 2008. – Vol. 108. – N 3. – pp. 1562-1565.

19. Kawatsu M., Fujioka T., Losic S., Tritto I. (Trialkylsilyl-cyclopentadienyl)titanium(IV) dichloride complexes containing ketimide

ligands, Cp'TiCl₂(N-CtBu₂) (Cp' = Me₃SiC₅H₄, Et₃SiC₅H₄), as efficient catalysts for ethylene copolymerisation with norbornene and tetracyclododecene // Catalysis Science and Technology. – 2025. – Vol. 15. – N 9. – pp. 2757-2775.

20. Yoon K-B., Choi I-S., Lee D-H., Yongiune H. Synthesis and Optical Properties of Cycloolefin Copolymers for Plastic Substrates // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2007. – Vol. 45. – N 1. – pp. 307-314.

21. Maiyi P., Okamoto M., Kotaka T. Flow birefringence and strain-induced hardening of cycloolefin copolymers under elongational flow // Polymer. – 2001. – Vol. 42. – N 24. – pp. 9827-9835.

22. Okabe M., Nomura K. Propylene/Cyclic Olefin Copolymers with Cyclopentene, Cyclohexene, Cyclooctene, Tricyclo[6.2.1.0(2,7)]undeca-4-ene, and Tetracyclododecene: The Synthesis and Effect of Cyclic Structure on Thermal Properties // Macromolecules. – 2023. – Vol. 56. – N 1. – pp. 81-91.

23. Pat. 3118239B1. EP. 2015. Tetracyclododecene ring-opened polymer hydride and method for producing same / Hayano Sh.

24. Pat. 2000001742A1. WO. 1999. Compositions tetracyclododecene et procede de fabrication correspondant / Hashizume M., Uchida T.

25. Pat. 65121252B1. US. 1999. Tetracyclododecene compositions and process for producing the same / Hashizume M., Uchida T. /

26. Kwon O-J., Huyen T-Y., Lee S-B., Kyung T-K. Ring-opening metathesis polymerization and hydrogenation of ethyl-substituted tetracyclododecene // Bulletin of the Korean Chemical Society. – 2011. - Vol. 32. – N 8. – pp. 2737-2742.

REFERENCES

1. Mi-Zhuan L., Tong O., Yong W.-H., Yang S.-Y. Synthesis of chromone-containing polycyclic compounds via palladium-catalyzed [2+2+1]-annulation // *Organic and Biomolecular Chemistry*. – 2020. – Vol. 18. – N 6. – pp. 1112-1116.
2. Mamedova Kh.M. Synthesis of tetracyclic esters of glycerine // *PPOR*. – 2020. – Vol. 21. – N 1. – pp. 45-52.
3. Mamedov M.K., Raruslova R.A., Veliyeva S.A. Synthesis of acrylates based on tetracyclododecene and its methyl derivative // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2012. – Vol. 85. – pp. 327-330
4. Pat. 112592248A. CN. 2020. Preparation method and application of tetracyclododecene compound.
5. Dugan Ch. Synthesis and characterization of substituted tetracyclododecene ring opening metathesis polymers // *Master Thesis*. – 2023. – 167 p.
6. Autenrieth B., Schrock R. Stereospecific Ring-Opening Metathesis Polymerization (ROMP) of Norbornene and Tetracyclododecene by Mo and W Initiators // *Macromolecules*. – 2015. – Vol. 48. – N 2. – pp. 2489-2503.
7. Nayab S., Park W., Woo H.-Y., Sung I.K. Synthesis and characterization of novel tungsten complexes and their activity in the ROMP of cyclic olefins // *Polyhedron*. – 2012. – Vol. 42. – N 1. – pp. 102-109.
8. Hayano Sh., Nakama Y. Iso- and Syndio-Selective ROMP of Norbornene and Tetracyclododecene: Effects of Tacticity Control on the Hydrogenated Ring-Opened Poly(cycloolefin)s // *Macromolecules*. – 2014. – Vol. 42. – N 22. – pp. 7797-7811.
9. Okoroanyanwu U., Shimokawa T., Byers J., Grant Willson C. Alicyclic Polymers for 193 nm Resist Applications: Synthesis and Characterization // *Chem. Mater.* – 1998. – Vol. 10. – N 11. – pp. 3319-3327.
10. Maiti P., Okamoto M., Kojaka T. Elongational flow birefringence of ethylene-tetracyclododecene copolymer // *Polymer*. – 2001. – Vol. 42. – N 8. – pp. 3939-3942.
11. Malonado A. Cyclic olefin copolymers // *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*. – 2016. – Vol. 54. – N. 17. – pp. 2641-2825.
12. Zhao W., Nomura K. Copolymerizations of Norbornene and Tetracyclododecene with α -Olefins by Half-Titanocene Catalysts: Efficient Synthesis of Highly Transparent, Thermal Resistance Polymers // *Macromolecules*. – 2016. – Vol. 49. – N 1. – pp. 59-70.

13. Apisuk W., Ito H., Nomura K. Efficient synthesis of cyclic olefin copolymers with high glass transition temperatures by ethylene copolymerization with tetracyclododecene using (tert-BuC₅H₄)TiCl₂(N=CtBu₂)—MAO catalyst // *Journal of Polymer Science. Part A. Polymer Chemistry*. – 2016. – Vol. 54. – N 17. – pp. 2662-2667.

14. Zhao W., Nomura K. Design of efficient molecular catalysts for synthesis of cyclic olefin copolymers by copolymerization of ethylene and α -olefins with norbornene or tetracyclododecene // *Catalysts*. – 2016. – Vol. 6. – N 1. – pp. 175-192.

15. Ogara Y., Makita Y., Okaniwa M. Aggregation behavior of new cyclic saturated copolymers synthesized via ring-opening metathesis polymerization // *Polymer*. – 2008. – Vol. 49. – N 22. – pp. 4819-4825.

16. Jaehoon K., Chun W., Kim W., Junhynk K. Ring-Opening Metathesis Polymerization of Tetracyclododecene Using Various Catalyst Systems // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2010. – Vol. 116. – N 1. – pp. 479-485.

17. Chaimohgkoikunasin S., Hou X., Nomura K. Ring opening metathesis polymerization of norbornene and tetracyclododecene with cyclooctene by using (arylimido)vanadium(V)–alkylidene catalyst // *Journal of Polymer Science. Part A. Polymer Chemistry*. – 2017. – Vol. 55. – N 3. – pp. 312-319.

18. Ogata K., Nishimura N., Yunokuchi T., Toyota A. Copolymerization of tetracyclododecene or norbornene with styrene in the presence of Ni(II) complex/MAO catalytic system: First example for transition metal catalyzed copolymerization of tetracyclododecene with styrene // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 108. – N 3. – pp. 1562-1565.

19. Kawatsu M., Fujioka T., Losic S., Tritto I. (Trialkylsilyl-cyclopentadienyl)titanium(IV) dichloride complexes containing ketimide

ligands, Cp'TiCl₂(N=CtBu₂) (Cp' = Me₃SiC₅H₄, Et₃SiC₅H₄), as efficient catalysts for ethylene copolymerisation with norbornene and tetracyclododecene // *Catalysis Science and Technology*. – 2025. – Vol. 15. – N 9. – pp. 2757-2775.

20. Yoon K-B., Choi I-S., Lee D-H., Yongiune H. Synthesis and Optical Properties of Cycloolefin Copolymers for Plastic Substrates // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2007. – Vol. 45. – N 1. – pp. 307-314.

21. Maiyi P., Okamoto M., Kotaka T. Flow birefringence and strain-induced hardening of cycloolefin copolymers under elongational flow // *Polymer*. – 2001. – Vol. 42. – N 24. – pp. 9827-9835.

22. Okabe M., Nomura K. Propylene/Cyclic Olefin Copolymers with Cyclopentene, Cyclohexene, Cyclooctene, Tricyclo[6.2.1.0(2,7)]undeca-4-

ene, and Tetracyclododecene: The Synthesis and Effect of Cyclic Structure on Thermal Properties // *Macromolecules*. – 2023. – Vol. 56. – N 1. – pp. 81-91.

23. Pat. 3118239B1. EP. 2015. Tetracyclododecene ring-opened polymer hydride and method for producing same / Hayano Sh. /

24. Pat. 2000001742A1. WO. 1999. Compositions tetracyclododecene et procede de fabrication correspondant / Hashizume M.. Uchida T. /

25. Pat. 65121252B1. US. 1999. Tetracyclododecene compositions and process for producing the same // Hashizume M.. Uchida T. /

26. Kwon O-J., Huyen T-Y., Lee S-B., Kyung T-K. Ring-opening metathesis polymerization and hydrogenation of ethyl-substituted tetracyclododecene // *Bulletin of the Korean Chemical Society*. – 2011. – Vol. 32. – N 8. – pp. 2737-2742.

Информация об авторах

И.Р. Сафарова – старший научный сотрудник лаборатории «Функциональные олигомеры»;

М.Д. Ибрагимова – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией «Функциональные олигомеры».

Information about the authors

I.R. Safarova – Senior Researcher at the Laboratory of Functional Oligomers;

M.D. Ibrahimova – Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Laboratory of Functional Oligomers.

Вклад авторов

И.Р. Сафарова – экспериментальная часть;

М.Дж. Ибрагимова – научное редактирование текста; концепция исследования;

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

I.R. Safarova – experimental part;

M.Dj. Ibrahimova – data collection, data processing.

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 29.03.2026; принята к публикации 25.04.2026.

The article was submitted 29.03.2026; accepted for publication 25.04.2026.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 547.541

DOI 10.21510/3034-266X-2026-2-141-153

Панах Магомед оглу Ширинов¹, Самая Эльданиз гызы Турабханлы², Пери Турабхан гызы Шахтактинская³

^{1,2,3} Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан, zemfira.shaxtaxtinskaya@mail.ru

К МЕТОДАМ АЛКИЛИРОВАНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ АМИНОВ

Аннотация. Известно, что для ароматических аминов одной из характерных реакций является реакция алкилирования, при которой атомы водорода из аминогруппы способны замещаться на алкильные радикалы. В результате этой реакции образуются вторичные и третичные амины. При этом для проведения реакции в качестве алкилирующих агентов используют спирты или галогензамещенные алканов, тогда как в качестве катализаторов обычно используют аммиачные комплексы солей одновалентной меди. Однако позднее в качестве катализаторов этой реакции стали использовать и другие комплексы металлов. Состав продуктов этой реакции во многом определяется соотношением исходных реагирующих веществ. В этой работе нами рассмотрены наиболее ключевые методы синтеза алкилароматических аминов

Ключевые слова: алкилирование, ароматические амины, С-алкилирование, N-алкилирование

Для цитирования: Ширинов П.М., Турабханлы С.Э., Шахтактинская П.Т. К методам алкилирования ароматических аминов // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М.Акмуллы. Серия: Естественные науки. 2026. № 2. С. 141-153.

CHEMICAL SCIENCES

Original article

TO METHODS OF ALKYLATION OF AROMATIC AMINES

Panah M. Shirinov¹, Samaya E. Turabkhanly², Peri T. Shakhtakhtinskaya³

^{1,2,3} Sumgayit State University, Sumgayit, Azerbaijan, zemfira.shaxtaxtinskaya@mail.ru

Abstract. It is known that one of the characteristic reactions of aromatic amines is alkylation, in which hydrogen atoms from the amino group can be replaced by alkyl radicals. This reaction results in the formation of secondary and tertiary amines. Alcohols or halogenated alkanes are used as alkylating agents for this reaction, while ammonia complexes of copper salts are typically used as catalysts. However, other metal complexes have since come to be used as catalysts for this reaction. The composition of the products of this reaction is largely determined by the ratio of the starting reactants. In this paper, we examine the most important methods for synthesizing alkylaromatic amines.

Key words: alkylation, aromatic amines, C-alkylation, N-alkylation

For citing: Shirinov P.M., Turabkhanly S.E., Shakhtakhtinskaya P.T. To methods of alkylation of aromatic amines// Bulletin of Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmully. 2026. № 2. pp. 141-153.

Цель представленной статьи заключалась в обобщении и систематизации ключевых методов синтеза алкилароматических аминов, разборе их положительных преимуществ и недостатков, закономерностей протекания этих реакций.

Введение

Получение алкилзамещенных ароматических аминов включает введение алкильных групп к атому азота (N-алкилирование) или непосредственно к ароматическому кольцу (алкилирование кольца) ароматического амина. Существуют различные методы, от традиционных реакций с алкилгалогенидами до современных, более селективных каталитических подходов.

1. N-алкилирование ароматических аминов (N-алкиланилины)

N-алкилирование вводит алкильные группы к атому азота производного анилина, обычно используемого для получения вторичных (R-NH-Ar) или третичных (R₂N-Ar) аминов.

2. Восстановительное аминирование: Высокоэффективный метод, при котором ароматический амин реагирует с альдегидом или кетоном в присутствии восстановителя.

3. Алкилирование спиртами (каталитическое): Селективное N-алкилирование может быть достигнуто с использованием спиртов с рутениевыми или иридиевыми катализаторами, или с использованием цеолитных катализаторов (например, фауызита NaY) для получения моно-N-алкиланилинов с высокой селективностью.

4. Реакция с алкилгалогенидами/тозилатами: Первичные амины можно обрабатывать алкилгалогенидами или тозилатами в присутствии основания (например, карбонатов). Однако этот метод может страдать от низкой селективности (чрезмерного алкилирования).

Алкилирование кольца ароматических аминов (алкилзамещенное кольцо) вводит алкильные группы в бензольное кольцо, обычно в орто- или пара-положение, используя химию типа Фриделя-Крафтса.

Алкилирование по Фриделю-Крафтсу: Ароматические амины могут быть алкилированы по кольцу с использованием алкилгалогенида и катализатора Льюиса, такого как $AlCl_3$

Присоединение олефинов (кислотный катализатор): Анилин может непосредственно реагировать с олефинами (такими как пропилен или изобутилен) в присутствии катализаторов, таких как хлорид алюминия или хлорид цинка, с образованием моно-трет-бутиланилина.

Перегруппировка N-алкиланилинов: N-алкилвторичные ароматические амины могут быть превращены в орто-алкилпервичные ароматические амины путем нагревания (275–400 °C) с катализатором на основе анилида алюминия.

5. Специальные методики

Синтез с использованием микроволнового излучения: Одностадийный метод, позволяющий быстро N-алкилировать бензанилид с последующим гидролизом, обеспечивающий высокие выходы и чистые продукты.

Каталитическое C–H аминирование: Прямой метод функционализации аренов без предварительной функционализации, привлекательный для синтеза на поздних стадиях.

Переалкилирование: N-алкилирование часто приводит к смеси моно- и диалкилированных продуктов.

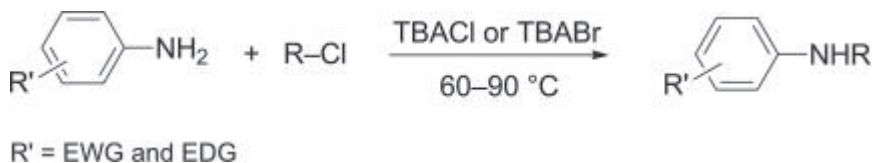
Аминная функциональная группа сильно направляет и активирует орто/пара-положение, что делает алкилирование кольца очень эффективным. Использование специфических высокоселективных методов, таких как восстановительное аминирование или катализ с использованием цеолитов, предпочтительнее простого алкилирования для минимизации отходов и трудностей с очисткой.

Результаты проведенных исследований

Так, в работе [1] описано межмолекулярное C–H аминирование аренов для получения N-метиланилинов, так и внутримолекулярный вариант синтеза тетрагидрохинолинов. Новый, высокоэлектрофильный аминирующий реагент оказался ключевым для прямого синтеза незащищенных N-метиланилинов из простых аренов. Реакции демонстрируют широкую толерантность к функциональным группам и используют каталитические количества безопасной соли железа в мягких условиях реакции.



Представлено эффективное N-селективное алкилирование первичных ароматических аминов в расплавленных четвертичных аммониевых солях в качестве растворителя в относительно мягких условиях без использования оснований [2]. На основе параметров Камлета-Тафта и нуклеофильности анионов ионной жидкости (ИЖ) было оценено влияние ионной жидкости. Данный метод был проверен в более крупном многограммовом масштабе, а также при синтезе биоактивных гетероциклов (например, 1,4-бензотиазина и хиноксалинов) и новых эффективных MALDI-матриц.



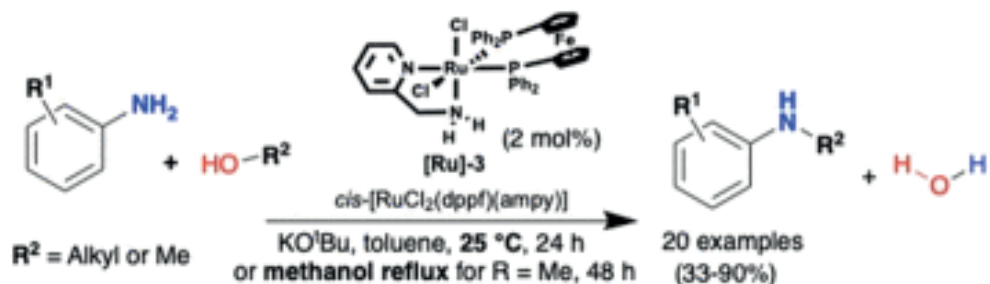
Показано [3], что замещенные бензанилиды быстро реагируют с алкилгалогенидами, основаниями, спиртами и катализаторами межфазного переноса под воздействием микроволнового излучения, образуя соответствующие N-алкилбензанилиды, которые затем гидролизуются серной кислотой для получения чистых N-алкилароматических аминов. Микроволновая обработка в органическом синтезе привлекает внимание благодаря повышенной скорости реакции, высоким выходам, улучшенной чистоте, простоте обработки после реакции и экологичности условий реакции по сравнению с традиционными методами.

Предложен способ получения замещенных ароматических аминов, включающий сочетание замещенного ароматического азосоединения с соединением, выбранным из алифатических спиртов, циклоалифатических спиртов, спиртов, аралкиловых спиртов и их смесей [4]. В другом варианте осуществления замещенные ароматические амины настоящего изобретения подвергаются

восстановительному алкилированию с образованием алкилированных диаминов или их замещенных производных. Метод включает использование основания (обычно гидроксиды щелочных металлов), катализаторов межфазного переноса при температуре от 70 °С до 200 °С, замещенное ароматическое азосоединение и алифатический спирт с 1-22 атомами углерода.

Воздухо- и водостойкий π -аллилиридиевый комплекс катализирует высокорегео- и энантиоселективное аминирование по типу Цуджи-Троста рацемических разветвленных алкилзамещенных аллильных ацетатов первичными или вторичными (гетеро)ароматическими аминами [5].

Разработана методика N-алкилирования в очень мягких условиях с использованием известного коммерчески доступного катализатора на основе рутения [6]. В результате широкий спектр ароматических первичных аминов был селективно алкилирован несколькими первичными спиртами, что позволило получить соответствующие вторичные амины с высоким выходом. Методика также позволяет проводить метилирование анилинов в кипящем метаноле и получать ряд гетероциклов простым способом.

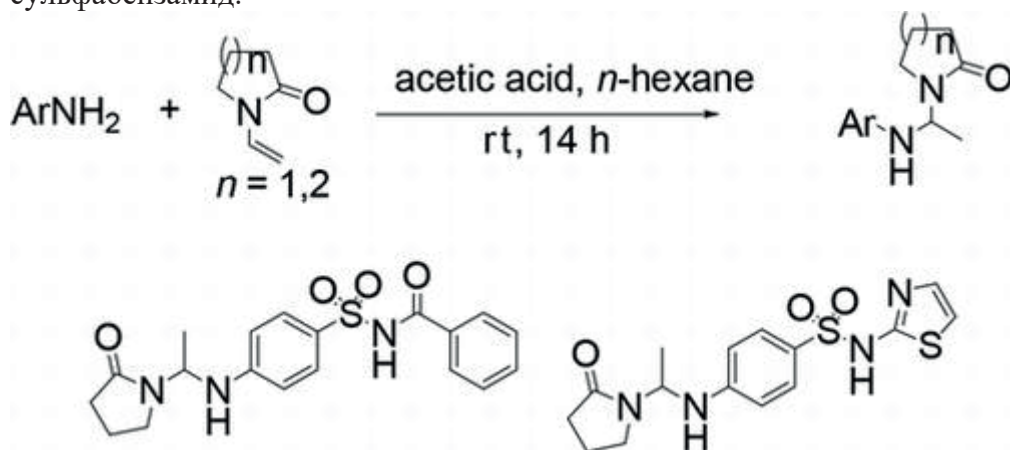


В патенте [7] предложен способ получения алкилированных ароматических аминов с кольцевой структурой. В этом процессе ароматический амин реагирует с олефином, используя в качестве катализатора кислотное кристаллическое молекулярное сито. В условиях процесса катализатор обладает высокой активностью, и при использовании аминов, способных к алкилированию в орто- и пара-положениях, может быть достигнута высокая селективность по отношению к орто-алкилированному изомеру.

Разработка общего и практичного подхода к N-алкилированию гетероароматических аминов гетероароматическими спиртами всегда представляет собой сложную задачу и редко встречается в литературе [8]. В данной работе авторы разработали и синтезировали не содержащие фосфинов, надежные и эффективные N,N-бидентатные комплексы Co(II) для универсальной стратегии N-алкилирования аминов. Предложенная каталитическая методология может быть применена к широкому спектру субстратов с использованием

различных спиртов, включая арильные, алифатические, ациклические и циклические группы, с гетероароматическими аминами, такими как аминопирдин, 2-аминопиримидин и аминохиолин, для получения разнообразных моноалкилированных органических азотсодержащих соединений с хорошим и отличным выходом (108 примеров). Кроме того, разработанный каталитический метод был успешно расширен для дегидрогенативного синтеза биологически важных производных хиолина (11 примеров). В частности, было обнаружено, что 8-аминохиолин по-разному реагирует с побочным продуктом N-алкилирования-переноса водорода (N-бензил-1,2,3,4-тетрагидрохиолин-8-амин), что свидетельствует о каталитической активности комплекса I. Реакция протекала в экологически безопасных условиях, при этом единственным побочным продуктом являлась вода. Примечательно, что краткий синтез ингибиторов ацетилхолинэстеразы (АХЭИ) в качестве потенциальных средств, улучшающих когнитивные функции, продемонстрировал полезность данного метода. Интересно, что были проведены различные контрольные и дейтерированные эксперименты, которые указывают на то, что реакция протекает по пути заимствования водорода.

Реакцию ароматических аминов с третичными енамидами проводили в *n*-гексане в присутствии уксусной кислоты в качестве недорогого и экологически чистого катализатора при комнатной температуре [9]. Этот метод позволяет получать защищенные аминалы посредством реакции присоединения по Марковникову с высокими и отличными выходами и региоспецифичностью. Кроме того, этот метод был расширен для синтеза аминалов из коммерчески доступных сульфаниламидных препаратов, таких как сульфатиазол и сульфабензамид.



Внедрение недорогих, распространенных в земной коре металлов в типичные реакции, катализируемые благородными металлами, является одной из главных задач гомогенного катализа.

Экологически устойчивая или «зеленая» реакция, привлекающая большое внимание в последние годы и преимущественно катализируемая комплексами Ir или Ru, — это алкилирование аминов спиртами. Она основана на концепции заимствования водорода или автопереноса водорода [10]. В данной работе авторы сообщают о катализируемом кобальтом алкилировании ароматических аминов спиртами. Реакция протекает в мягких условиях и селективно генерирует моноалкилированные амины. Наблюдаемая селективность позволяет синтезировать несимметрично замещенные диамины. Новый комплекс кобальта, стабилизированный лигандом PN5P, наиболее эффективно катализирует эти реакции.

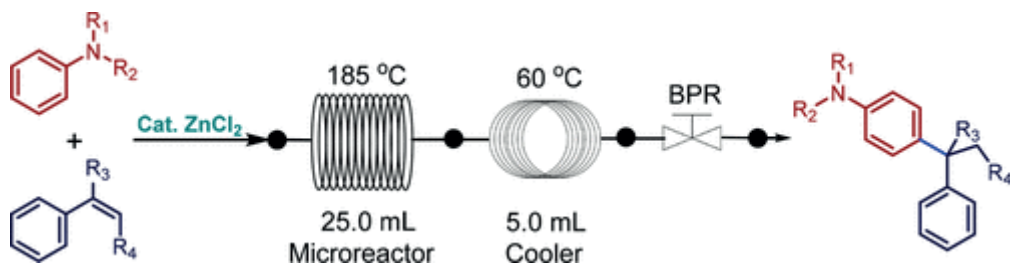


Алкилирование аминов легкодоступными реагентами является одной из наиболее эффективных стратегий синтеза замещенных аминов. Первичные спирты, будучи широко распространенными, являются превосходными электрофилами, способными к дегидратации и реакции с различными нуклеофильными реагентами. Однако использование первичных спиртов для прямого алкилирования аминов представляет собой сложную задачу из-за кинетических и термодинамических барьеров, связанных с образованием карбокатионов в процессе дегидроксилирования спиртов. Традиционные подходы, включающие предварительную активацию первичных спиртов до их производных (альдегидов, галогенидов или тозилатов), страдают от низкой эффективности стадий и атомной экономии, ограниченной толерантности к функциональным группам или зависимости от нестабильных комплексов металлов [11]. В данной работе авторы представляют высокоэффективный метод алкилирования аминов с использованием первичных спиртов, катализируемый комбинацией HI и $NaHSO_4$. Этот метод использует

недорогие катализаторы и легкодоступные спирты в качестве алкилирующих реагентов, демонстрируя превосходную толерантность к функциональным группам и высокую каталитическую активность. Данный метод успешно применялся для алкилирования различных аминов, каскадного построения N-гетероциклов и краткого синтеза фармацевтических препаратов на поздних стадиях реакции.

Описано алкилирование аминов и родственных соединений (например, гидразинов, гидразонов, гидроксиламинов) с использованием алкилалюминиевого реагента под действием меди (II). Реакция протекает селективно и с хорошим выходом, ключевым этапом является обмен металл-металл [12].

Разработан практический подход к синтезу антиоксиданта 4,4'-дикумилдифениламина (DCDPA) и его производных путем алкилирования ароматических аминов по Фриделю-Крафтсу в условиях непрерывного потока [13]. Благодаря улучшенным характеристикам массо- и теплопередачи микрореактора, время реакции значительно сократилось по сравнению с периодическим режимом. Реакция проводилась с использованием системы соразтворителей этанол/ $\text{Cl}(\text{CH}_2)_2\text{Cl}$ в соотношении 1:6 (об/об) с ZnCl_2 в качестве катализатора, что позволило достичь удовлетворительных выходов. Это эффективный метод синтеза DCDPA и его производных с превосходной пара-селективностью, обладающий преимуществами более короткого времени реакции, простоты эксплуатации и легко масштабируемости.



Реакция алкилирования ароматических аминов также рассматривалась в работах [14-16].

Заключение

Таким образом, алкилирование ароматических аминов (анилинов) происходит главным образом по атому азота (N-алкилирование) с образованием вторичных или третичных аминов, или по кольцу (C-алкилирование) посредством электрофильного замещения. N-алкилирование алкилгалогенидами часто сопровождается переалкилированием до четвертичных аммониевых солей, что делает восстановительное аминирование или

каталитическое алкилирование спиртами более селективными методами получения вторичных аминов. Анилин действует как нуклеофил, реагируя с алкилгалогенидами. Однако продукт часто оказывается более нуклеофильным, чем исходный материал, что приводит к полиалкилированию (вторичные, третичные и четвертичные соли). Более экологичный метод включает реакцию ароматических аминов со спиртами с использованием катализаторов на основе Ru, Rh или Co. Этот метод обеспечивает высокую селективность моно-N-алкилирования, при этом основным побочным продуктом является вода. Восстановительное аминирование является более предпочтительным методом синтеза, включающий образование имина между ароматическим амином и карбонильным соединением (альдегидом/кетон) с последующим восстановлением до алкилированного амина. Анилин может быть алкилирован по кольцу, обычно в орто- или пара-положениях, с использованием алкилгалогенидов и катализатора Льюиса (например, AlCl_3 , BF_3). Ароматические амины могут быть алкилированы олефинами с использованием кислых кристаллических молекулярных сит или цеолитов для получения алкилзамещенных анилинов. Первичные амины легко превращаются в смеси вторичных, третичных и четвертичных соединений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Falk E., Gasser V.C., Morandi B. Synthesis of N-Alkyl Anilines from Arenes via Iron-Promoted Aromatic C–H Amination // *Org. Lett.* – 2021. – Vol. 23. – N 4. – pp. 1422-1426.
2. Monopoli A., Cotugno P., Cortese M., Damiana-Calvano C. Selective N-Alkylation of Arylamines with Alkyl Chloride in Ionic Liquids: Scope and Applications // *European Journal of Organic Chemistry.* – 2012. – N 16. – pp. 3105-3111.
3. Tapase A.B., Shinde N., Devanand Sh. Microwave assisted one pot synthesis of N-alkyl aromatic amines from benzanilide in presence of phase transfer catalyst // *Organic Chemistry – An Indian Journal.* – 2023. – Vol. 19. – pp. 310-318.
4. Pat. 1084727. CN. 1993. Process for preparing substituted aromatic amines
5. Seung W-K., Schwartz L.A., Zbieg J.R., Styala C.E. Regio- and Enantioselective Iridium-Catalyzed Amination of Racemic Branched Alkyl-Substituted Allylic Acetates with Primary and Secondary Aromatic and Heteroaromatic Amines // *J. Amer. Chem. Soc.* - 2019. – Vol. 141. – N 1. – pp. 671-676.
6. Mocci R., Atzori L., Baratta W., de Luca L. N-Alkylation of aromatic amines with alcohols by using a commercially available Ru

complex under mild conditions // RSC Advances. – 2023. – Vol. 13. – N 49. – pp. 34847-34851.

7. Pat. 4740620A. US. 1985. Alkylation of aromatic amines in the presence of acidic, crystalline molecular sieves / Dixon D., Burgoyne W. /

8. Kumar R., Babu R., Chakraborty S., Madhu V. Catalytic N-Alkylation of (Hetero)Aromatic Amines and Tandem Annulation Reactions // J. Org. Chem. – 2024. – Vol. 89. – N 20. – pp. 14720-14739

9. Halimehiani A.Z., Goudarzi M., Lotfi Nosood Y. Alkylation of aromatic amines by tert-enamides: Direct access to protected amins // Synthetic Communications. – 2017. – Vol. 47. – N 21. – pp. 2022-2029.

10. Rosler S., Ertl M., Irrgang T., Kempe R. Cobalt-Catalyzed Alkylation of Aromatic Amines by Alcohols // Angewandte Chemie International Edition. – 2015. – Vol. 54. – N 50. – pp. 15046-15050.

11. Geng Sh., Jiang Ch., Zhaoting L., Yihan G. Inorganic Iodide Catalyzed Alkylation of Amines with Primary Alcohols // Chinese Chemical Society. – 2026.- Vol. 8. – N 4. – pp. 2120-2131.

12. Derek H.R., Barton H.R., Doris E. Alkylation of aromatic amines and related compounds using a copper(II)-aluminum(III) couple // Tetrahedron Letters. – 1996. – Vol. 37. – N 19. – pp. 3295-3298.

13. Zhang L., Xiaofan B., Hanlin Y., Mengmei M. Zinc-Catalyzed Alkylation of Aromatic Amines in Continuous Flow // Org. Process Res. Dev. – 2020. – Vol. 24. – N 10. – pp. 2078-2084.

14. Singh B., Lobo H., Shankarling G. Selective N-alkylation of aromatic primary amines catalyzed by bio-catalyst or deep eutectic solvent // Catalysis Letters. – 2010. – Vol. 141. – pp. 178-182.

15. Zarubina I.V., Borukhova M.S., Kagan L.Kh., Nikonorov E.M. Alkylation of aromatic amines over aluminosilicate catalysts // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 1975. – Vol. 11. – pp. 586-588.

16. Deng D., Bo-Wen H., Zhang Z., Shengkai M. Alkylation of Aromatic Amines with Trialkyl Amines Catalyzed by a Defined Iridium Complex with a 2-Hydroxypyridylmethylene Fragment // Organometallics. – 2019. – Vol. 38. – N 9. – pp. 1012-1017.

REFERENCES

1. Falk E., Gasser V.C., Morandi B. Sintez N-alkilanilinov iz arenov posredstvom aminirovaniya aromatcheskikh C-H svyazey s uchastiem zheleza. [Synthesis of N-Alkyl Anilines from Arenes via Iron-Promoted Aromatic C–H Amination] // Org. Lett. – 2021. – Vol. 23. – N 4. – pp. 1422-1426.

2. Monopoli A., Cotugno P., Cortese M., Damiana-Calvano C. Selektivnoe N-alkilirovanie arilaminov alkilchloridom v ionnykh zidkostyakh – oblast primeneniya I sfery primeneniya. [Selective N-Alkylation of Arylamines with Alkyl Chloride in Ionic Liquids: Scope and

Applications] // European Journal of Organic Chemistry. – 2012. – N 16. – pp. 3105-3111.

3. Tapase A.B., Shinde N., Devanand Sh. Odnostadiynyi sintez N-alkilaromaticeskikh amino viz benzanilide s ispolzovaniem mikrovolnovogo izlucheniya v prisytstvi katalizatora mezhfaznogo perenosa. [Microwave assisted one pot synthesis of N-alkyl aromatic amines from benzanilide in presence of phase transfer catalyst] // Organic Chemistry – An Indian Journal. – 2023. – Vol. 19. – pp. 310-318.

4. Pat. 1084727. CN. 1993. Sposob polucheniya zameshennykh aromaticeskikh aminov [Process for preparing substituted aromatic amines].

5. Seung W-K., Schwartz L.A., Zbieg J.R., Styala C.E. Regio- I enantioselektivnoe iridii-kataliziruemo aminirovanie ratsemicheskikh razvetvlennukh alkilzameshennykh allilnykh atsetatov pervichnymi I vtorichnymi aromaticeskimi I heteroaromaticeskimi aminami [Regio- and Enantioselective Iridium-Catalyzed Amination of Racemic Branched Alkyl-Substituted Allylic Acetates with Primary and Secondary Aromatic and Heteroaromatic Amines] // J. Amer. Chem. Soc. – 2019. – Vol. 141. – N 1. – pp. 671-676.

6. Mocci R., Atzori L., Baratta W., de Luca L. N-alkilirovanie aromaticeskikh aminov spirtami s ispolzovaniem kommercheski dostupnogo kompleksa ruteniya v myagkikh usloviyakh. [N-Alkylation of aromatic amines with alcohols by using a commercially available Ru complex under mild conditions] // RSC Advances. – 2023. – Vol. 13. – N49. – pp. 34847-34851.

7. Pat. 4740620A. US. 1985. Alkilirovanie aromaticeskikh aminov v prisutstvi kislykh kristallicheskikh molekularnykh sit. [Alkylation of aromatic amines in the presence of acidic, crystalline molecular sieves] / Dixon D., Burgoyne W.

8. Kumar R., Babu R., Chakraborty S., Madhu V. Kataliticheskoe N-alkilirovanie (hetero)aromaticeskikh aminov I tandemnye reaktsii annulyatsii. [Catalytic N-Alkylation of (Hetero)Aromatic Amines and Tandem Annulation Reactions] // J. Org. Chem. – 2024. – Vol. 89. – N 20. – pp. 14720-14739.

9. Halimehiani A.Z., Goudarzi M., Lotfi Nosood Y. Alkilirovanie aromaticeskikh aminov tret-enamidami pryamoi dustup k zashishennym aminalam. [Alkylation of aromatic amines by tert-enamides: Direct access to protected aminals] // Synthetic Communications. – 2017. – Vol. 47. – N 21. – pp. 2022-2029.

10. Rosler S., Ertl M., Irrgang T., Kempe R. Alkilirovanie aromaticeskikh aminov spirtami, kataliziruemo kobaltom. [Cobalt-Catalyzed Alkylation of Aromatic Amines by Alcohols] // Angewandte

Chemie International Edition. – 2015. – Vol. 54. – N 50. – pp. 15046-15050.

11. Geng Sh., Jiang Ch., Zhaoting L., Yiham G. Alkilirovanie aminov pervichnymi spirtami?, kataliziruemo neorganicheskim iodidom. [Inorganic Iodide Catalyzed Alkylation of Amines with Primary Alcohols] // Chinese Chemical Society. – 2026. – Vol. 8. – N 4. – pp. 2120-2131.

12. Derek H.R., Barton H.R., Doris E. Alkilirovanie aromaticheskikh aminov I rodstvennykh soedinenii s ispolzovaniem pary med(II)-aluminii(III). [Alkylation of aromatic amines and related compounds using a copper(II)-aluminum(III) couple] // Tetrahedron Letters. – 1996. – Vol. 37. – N 19. – pp. 3295-3298.

13. Zhang L., Xiaofan B., Hanlin Y., Mengmei M. Tsinkovo-kataliziruemo alkilirovanie aromaticheskikh aminov v nepreryvnom potoke. [Zinc-Catalyzed Alkylation of Aromatic Amines in Continuous Flow] // Org. Process Res. Dev. – 2020. – Vol. 24. – N 10. – pp. 2078-2084.

14. Singh B., Lobo H., Shankarling G. Selektivnoe N-alkilirovanie pervichnykh aminov, kataliziruemo biokatalizatorom ili glubokim evteticheskim rastvoritelem . [Selective N-alkylation of aromatic primary amines catalyzed by bio-catalyst or deep eutectic solvent] // Catalysis Letters. – 2010. – Vol. 141. – pp. 178-182.

15. Zarubina I.V., Borukhova M.S., Kagan L.Kh., Nikonorov E.M. Alkilirovanie aromaticheskikh aminov na alumosilikatnykh katalizatorakh [Alkylation of aromatic amines over aluminosilicate catalysts] // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 1975. – Vol. 11. – pp. 586-588.

16. Deng D., Bo-Wen H., Zhang Z., Shengkai M. Alkilirovanie aromaticheskikh aminov trialkilaminami, kataliziruemo opredelennym iridievym kompleksom s 2-hidroksipiridilmetilenovym fragmentom. [Alkylation of Aromatic Amines with Trialkyl Amines Catalyzed by a Defined Iridium Complex with a 2-Hydroxypyridylmethylene Fragment] // Organometallics. – 2019. – Vol. 38. – N 9. – pp. 1012-1017.

Информация об авторах

П.М. Ширинов – кандидат химических наук, старший преподаватель;

С.Э. Турабханлы – кандидат химических наук, старший преподаватель;

П.Т. Шахтахтинская – кандидат химических наук, старший преподаватель.

Information about the authors

P.M. Shirinov – Cand. Sci. (Chem.), Senior Lecturer at Sumgait State University;

S.E. Turabkhanly – Cand. Sci. (Chem.), Senior Lecturer at Sumgait State University;

P.T. Shakhtakhtinskaya – Cand. Sci. (Chem.), Senior Lecturer at Sumgait State University.

Вклад авторов

П.М. Ширинов – сбор материала;

С.Э. Турабханлы – постановка статьи;

П.Т. Шахтахтинская – систематизация материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

P.M. Shirinov – scientific editing of the text; research concept;

S.E. Turabkhanly – data collection, data processing

P.T. Shakhtakhtinskaya – systematization of material

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07.05.2026; принята к публикации 05.06.2026.

The article was submitted 07.05.2026; accepted for publication 05.05.2026.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

**При подготовке статей в журнал
просим руководствоваться следующими правилами**

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Научный журнал «Вестник БГПУ им. М. Акмуллы» публикует статьи по следующим сериям:

- Естественные науки
- Филологические науки
- Социально-гуманитарные науки

Основным требованием к публикуемому материалу является соответствие его высоким научным критериям (актуальность, научная новизна и другое).

Авторский материал должен быть представлен в одном из следующих форматов:

- *Оригинальная (научно-исследовательская) статья (объем до 8 страниц)*

Представляет завершенные результаты *эмпирического* (экспериментального, аналитического, корпусного) или *теоретического исследования*, выполненного автором.

Структура: статья должна иметь четкую логическую структуру. Для *эмпирических* исследований рекомендуется схема IMRaD (Введение, методы, результаты и обсуждение, выводы). Для *теоретических* работ допустима более свободная, но аргументированная композиция (постановка проблемы, анализ концепций, аргументация, выводы).

- *Обзорная (аналитическая) статья (объем до 16 страниц)*

Содержит систематизированный анализ, синтез и критическое обобщение ранее опубликованных научных работ по конкретной, обычно узкой, теме.

Цель: выявление основных тенденций, школ, противоречий в развитии научного знания, оценка состояния проблемы и определение перспективных направлений для будущих исследований. Не является простым пересказом источников.

- *Краткое научное сообщение (объем до 3 страниц)*

Предназначено для оперативной публикации: предварительных (пилотных) результатов исследования; описания отдельного научного наблюдения, уникального случая (кейса) или находки; изложения

нового метода или методики; краткой теоретической позиции или научной дискуссии.

Работы сопровождаются **аннотацией и ключевыми словами**. К статье молодых исследователей (студентов, магистрантов, аспирантов) следует приложить заключение научного руководителя о возможности опубликования её в открытой печати.

Все принятые к работе материалы проходят проверку в системе «Антиплагиат». Допустимый уровень оригинальности текста научной статьи (за исключением правильно оформленных цитат, библиографических описаний и стандартных формулировок) составляет не менее 75%. Статьи, не соответствующие данному требованию, к рассмотрению не принимаются.

Всем авторам необходимо предоставить в редакцию отдельным файлом:

а) персональные данные по предложенной форме:

Фамилия Имя Отчество	
Место учебы / работы	
Должность	
Учёная степень	
Почтовый адрес (домашний)	
Факультет, курс, специальность	
Тел.: рабочий / мобил., дом.	
E-mail	
Тема работы	
Рубрика для публикации	

б) согласие на обработку персональных данных по форме (<https://bspu.ru/unit/251/docs> Форма согласия субъекта ПДн на обработку ПДн БГПУ образец (1));

в) оформленная строго по требованиям научная статья;

г) заключение научного руководителя (студентам и аспирантам).

Название файла и письма должны соответствовать фамилии автора/ авторов, например, «**Иванов.doc**». Материалы отправляются по электронному адресу: vestnik.bspu@yandex.ru

РЕКОМЕНДУЕМАЯ СТРУКТУРА ПУБЛИКАЦИЙ

В начале статьи в левом верхнем углу на отдельной строке ставится индекс УДК.

Далее данные идут в следующей последовательности:

1. Полное название статьи (прописными буквами по центру);

2. Фамилия, имя, отчество (полностью), наименование организации, где выполнена работа, город, страна, электронный адрес, ORCID;

3. Аннотация (содержит основные цели предмета исследования, главные результаты и выводы объёмом не менее 250 слов);

4. Ключевые слова (не более 15);

5. Данные для цитирования (фамилия, инициалы, название статьи, название журнала);

6. Пункты 1-5 на английском языке;

7. Текст публикации по структуре:

Введение:

- *актуальность темы;*

- *проблема, которую предстоит исследовать;*

- *степень разработанности (обзор литературы);*

- *цель и задачи;*

Методы:

- *теоретико-методологические основы и методы исследования (материалы, процедуры, участники; подробно описывается то, как проводилось исследование);*

Результаты исследования

(здесь максимально присутствуют таблицы, схемы, графики, математические выкладки.);

Обсуждение:

- *ответ на гипотезу;*

- *сопоставление с другими исследованиями;*

- *описание вклада в науку;*

Заключение:

- *выводы;*

- *возможные направления дальнейших исследований.*

8. Список источников (не менее 15), оформленная в соответствии с требованиями;

9. Транслитерация (Reference) с переводом названия источника;

10. Информация об авторе/ авторах на русском и английском языках.

11. Вклад авторов.

Отсутствие конфликта интересов.

Основные сведения об авторе содержат:

– имя, отчество, фамилию автора (полностью);

– наименование организации (учреждения), её подразделения, где работает или учится автор (без обозначения организационно-

правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.);

- адрес организации (учреждения), её подразделения, где работает или учится автор (город и страна);
- электронный адрес автора (e-mail);
- открытый идентификатор учёного (Open Researcher and Contributor ID – ORCID) (при наличии).

Адрес организации (учреждения), где работает или учится автор, может быть указан в полной форме.

Электронный адрес автора приводят без слова “e-mail”, после электронного адреса точку не ставят.

ORCID приводят в форме электронного адреса в сети «Интернет». В конце ORCID точку не ставят.

Наименование организации (учреждения), её адрес, электронный адрес и ORCID автора отделяют друг от друга запятыми.

Пример –

Сергей Юрьевич Глазьев

**Финансовый университет, Москва, Россия, serg1784@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-4616-0758>**

1. В случае, когда автор работает (учится) в нескольких организациях (учреждениях), сведения о каждом месте работы (учёбы), указывают после имени автора на разных строках и связывают с именем с помощью надстрочных цифровых обозначений.

Пример –

Арпик Ашотовна Асратян^{1, 2}

¹Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия, zasratyan@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1288-7561>

²Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Россия

2. Если у статьи несколько авторов, то сведения о них приводят с учётом нижеследующих правил.

Имена авторов приводят в принятой ими последовательности.

Сведения о месте работы (учёбы), электронные адреса, ORCID авторов указывают после имён авторов на разных строках и связывают с именами с помощью надстрочных цифровых обозначений¹⁾.

Пример –

*Пётр Анатольевич Коротков¹, Алексей Борисович Трубянов²,
Екатерина Андреевна Загайнова³*

*¹Поволжский государственный технологический
университет, Йошкар-Ола, Россия, korotp@bk.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0340-074X>*

*²Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Россия, true47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2342-9355>*

*³Марийский государственный университет, Йошкар-Ола,
Россия, e.zagaynova@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5432-7231>*

3. Если у авторов одно и то же место работы, учёбы, то эти сведения приводят один раз.

Пример –

Юлия Альбертовна Зубок¹, Владимир Ильич Чупров²

*¹, ²Институт социально-политических исследований,
Федеральный научно-исследовательский социологический
центр, Российская академия наук, Москва, Россия*

¹uzubok@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3108-261>

²chuprov443@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7881-9388>

После сведений обо всех авторах на отдельной строке в начале статьи.

Пример –

*Автор, ответственный за переписку: Иван Васильевич
Перов, ivp@mail.ru*

Corresponding author: Ivan V. Perov, ivp@mail.ru

4. Когда приводят электронный адрес только одного автора или данный автор указан отдельно как ответственный за переписку, электронные адреса других авторов приводят в дополнительных сведениях об авторах в конце статьи.

5. Сведения об авторе (авторах) повторяют на английском языке после заглавия статьи на английском языке. Имя и фамилию автора (авторов) приводят в транслитерированной форме на латинице полностью, отчество сокращают до одной буквы (в отдельных случаях, обусловленных особенностями транслитерации, – до двух букв).

Пример –

Sergey Yu. Glaz'ev

***Financial University, Moscow, Russia, serg1784@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-4616-0758>***

6. Дополнительные сведения об авторе (авторах) могут содержать:

- полные имена, отчества и фамилии, электронные адреса и ORCID авторов, если они не указаны на первой полосе статьи (см. 4.9.2.2);

- учёные звания;

- учёные степени;

- другие, кроме ORCID, международные идентификационные номера авторов.

Дополнительные сведения об авторе (авторах) приводят с предшествующими словами «Информация об авторе (авторах)» (“Information about the author (authors)”) и указывают в конце статьи после «Списка источников».

Пример –

Информация об авторах

Ю.А. Зубок – доктор социологических наук, профессор;

В.И. Чупров – доктор социологических наук, профессор.

Information about the authors

Ju.A. Zubok – Doctor of Science (Sociology), Professor;

V.I. Chuprov – Doctor of Science (Sociology), Professor.

Пример –

Информация об авторе

С. Ю. Глазьев – д-р экон. наук, проф., акад. Рос. акад. наук.

Information about the author

S. Yu. Glaz'ev – Dr. Sci. (Econ.), Prof., Acad. of the Russ. Acad. of Sciences.

7. Аннотацию формируют по ГОСТ Р 7.0.99. Объем аннотации не превышает 250 слов. Перед аннотацией приводят слово «Аннотация» (“Abstract”).

Вместо аннотации может быть приведено резюме. Объем резюме обычно не превышает 250–300 слов.

8. Ключевые слова (словосочетания) должны соответствовать теме статьи и отражать её предметную, терминологическую область. Не используют обобщённые и многозначные слова, а также словосочетания, содержащие причастные обороты.

Количество ключевых слов (словосочетаний) не должно быть меньше 3 и больше 15 слов (словосочетаний). Их приводят, предваряя словами «Ключевые слова:» (“Keywords:”), и отделяют друг от друга запятыми. После ключевых слов точку не ставят.

Пример –

Книгоиздание России в 2019 г.

**Галина Викторовна Перова¹, Константин Михайлович
Сухоруков²**

^{1, 2}*Российская книжная палата, Москва, Россия*

¹*perova_g@tass.ru*

²*a-bibliograf@mail.ru*

Аннотация. Авторы приводят основные статистические показатели отечественного книгоиздания за 2019 г., анализируя состояние выпуска печатных изданий и тенденции развития издательского дела в России.

Ключевые слова: издательское дело, статистика книгоиздания, Российская книжная палата, Россия

Publishing in Russia in 2019

Galina V. Perova¹, Konstantin M. Sukhorukov²

^{1, 2}*Russian Book Chamber, Moscow, Russia*

¹*perova_g@tass.ru*

²*a-bibliograf@mail.ru*

Abstract. The authors provide the main statistics of the Russian book publishing in 2019, analyzing the output indicators of printed publications and trends in the publishing industry in Russia.

Keywords: publishing, publishing statistics, Russian Book Chamber, Russia.

9. После ключевых слов приводят слова благодарности организациям (учреждениям), научным руководителям и другим лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи, сведения о грантах, финансировании подготовки и публикации статьи, проектах, научно-исследовательских работах, в рамках или по результатам которых опубликована статья.

Эти сведения приводят с предшествующим словом «Благодарности:». На английском языке слова благодарности приводят после ключевых слов на английском языке с предшествующим словом “Acknowledgments:”.

Пример –

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 17-77-3019; авторы выражают благодарность Алексею Вадимовичу Зимину за предоставление данных о донной топографии в Белом море.

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation, Project № 17-77-300; the authors are grateful to Aleksey V. Zimin for providing the bottom topography data of the White Sea.

10. Знак охраны авторского права приводят по ГОСТ Р 7.0.1 внизу первой полосы статьи с указанием фамилии и инициалов автора (-ов) или других правообладателей и года публикации статьи.

Знак охраны авторского права приводят внизу первой полосы статьи с указанием фамилий и инициалов авторов и года публикации статьи.

© Олесова Е.И., 2022

или

© Левитская Н.Г., Бойкова О.Ф., Киян Л.Н., 2022.

11. Перечень затекстовых библиографических ссылок помещают после основного текста статьи с предшествующими словами **«СПИСОК ИСТОЧНИКОВ»**. Использование слов «Библиографический список», «Библиография» не рекомендуется.

12. В перечень затекстовых библиографических ссылок включают записи только на ресурсы, которые упомянуты или цитируются в основном тексте статьи.

Библиографическую запись для перечня затекстовых библиографических ссылок составляют по ГОСТ Р 7.0.5.

13. Отсылки на затекстовые библиографические ссылки оформляют по ГОСТ Р 7.0.5.

14. Библиографические записи в перечне затекстовых библиографических ссылок нумеруют и располагают в порядке цитирования источников в тексте статьи. Список должен содержать не менее 15 названий источников.

15. Дополнительно приводят перечень затекстовых библиографических ссылок на латинице (**“REFERENCES”**) согласно выбранному стилю оформления перечня затекстовых библиографических ссылок, принятому в зарубежных изданиях: Harvard, Vancouver, Chicago, ACS (American Chemical Society), AMS

(American Mathematical Society), APA (American Psychological Association) и др. (см. Приложение). Нумерация записей в дополнительном перечне затекстовых библиографических ссылок должна совпадать с нумерацией записей в основном перечне затекстовых библиографических ссылок.

16. Пристатейный библиографический список помещают после перечня затекстовых ссылок с предшествующими словами «Библиографический список».

17. В пристатейный библиографический список включают записи на ресурсы по теме статьи, на которые не даны ссылки, а также записи на произведения лиц, которым посвящена статья.

Библиографическую запись для пристатейного библиографического списка составляют по ГОСТ 7.80, ГОСТ Р 7.0.100.

18. Библиографические записи в пристатейном библиографическом списке нумеруют и располагают в алфавитном или хронологическом порядке.

19. Приложение (приложения) к статье публикуют с собственным заглавием. В заглавии или подзаголовочных данных приложения приводят сведения о том, что данная публикация является приложением к основной статье.

При наличии двух и более приложений их нумеруют.

20. В статье могут быть внутритекстовые, подстрочные и затекстовые примечания.

21. Внутритекстовые примечания помещают внутри основного текста статьи в круглых скобках.

22. Подстрочные примечания помещают внизу соответствующей страницы текста статьи.

22. Затекстовые примечания помещают после основного текста статьи перед «Списком источников» с предшествующим словом «Примечания».

23. Затекстовые и подстрочные примечания связывают с текстом, к которому они относятся, знаками выноски или отсылки.

24. Внутритекстовые и подстрочные примечания, содержащие

библиографические ссылки, составляют по ГОСТ Р 7.0.5.

25. При публикации статьи, переведённой с языка народов Российской Федерации или иностранного языка, а также при перепечатке статьи из другого источника в подстрочном примечании на первой полосе статьи приводят библиографическую запись на оригинальную статью по ГОСТ 7.80, ГОСТ Р 7.0.100.

26. Сведения о вкладе каждого автора, если статья имеет несколько авторов, приводят в конце статьи после «Информации об авторах». Этим сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (“Contribution of the authors:”). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример –

Вклад авторов:

Артемьева С.С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Митрохин В.В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Artemyeva S.S. – scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Mitrokhin V.V. – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

27. Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия приводят в конце статьи после «Информации об авторах». Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример –

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТОВОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

Текст статьи предоставляется в редакцию в виде файла с названием, соответствующим фамилии первого автора статьи в формате doc (текстовый редактор Microsoft Word 6.0 и выше), и должен отвечать нижеприведенным требованиям.

Компьютерную подготовку статей следует проводить посредством текстовых редакторов, использующих стандартный код ASCII (Multi-Edit, Norton-Edit, Lexicon), MS Word for Windows или (предпочтительно) любой из версий пакета TeX.

- Параметры страницы: формат – А4; ориентация – книжная; поля: верхнее – 2 см, нижнее – 2 см, левое – 2 см, правое – 2 см; размер страницы – 17 на 26.

- Шрифт Times New Roman; размер шрифта – 12 pt; межстрочный интервал – 1; отступ (абзац) – 1,25.

Следует различать дефис (-) и тире (–). Дефис не отделяется пробелами, а перед тире и после ставится пробел.

Перед знаком пунктуации пробел не ставится.

Кавычки типа « » используются в русском тексте, в иностранном – “ ”.

Кавычки и скобки не отделяются пробелами от заключенных в них слов, например: (при 300 К).

Все сокращения должны быть расшифрованы.

Подписи к таблицам и схемам должны предшествовать последним. Подписи к рисункам располагаются под ними и должны содержать четкие пояснения, обозначения, номера кривых и диаграмм. На таблицы и рисунки должны быть ссылки в тексте, при этом не допускается дублирование информации таблиц, рисунков и схем в тексте. Рисунки и фотографии должны быть предельно четкими (по возможности цветными, но без потери смыслового наполнения при переводе их в черно-белый режим) и представлены в формате *.jpg, *.eps, *.tif, *.psd, *.psx. Желательно, чтобы рисунки и таблицы были как можно компактнее, но без потери качества. В таблице границы ячеек обозначаются только в «шапке». Каждому столбцу присваивается номер, который используется при переносе таблицы на следующую страницу. Перед началом следующей части в правом верхнем углу курсивом следует написать «*Продолжение табл. ...*» с указанием ее номера. Сложные схемы, рисунки, таблицы, формулы

желательно привести на отдельном листе. Не допускается создание макросов Microsoft Word для создания графиков и диаграмм.

Расстояние между строками формул должно быть не менее 1 см. Следует четко различать написание букв n , h и u ; g и q ; a и d ; U и V ; ξ и ζ ; v , ϑ и ν и т.д. Прописные и строчные буквы, различающиеся только своими размерами (C и c , K и k , S и s , O и o , Z и z и др.), подчеркиваются карандашом двумя чертами: прописные – снизу, строчные – сверху ($\underline{\underline{P}}$, $\overline{\overline{p}}$, $\underline{\underline{S}}$, $\overline{\overline{s}}$). Латинские буквы подчеркиваются волнистой чертой снизу, греческие – красным цветом, полужирные символы – синим.

Индексы и показатели степени следует писать четко, ниже или выше строки, и отчеркивать дужкой ($\frown$ – для нижних индексов и $\smile$ – для верхних) карандашом. Цифра 0 (нуль), а также сокращения слов в индексах подчеркиваются прямой скобкой – $_$.

Употребление в формулах специальных, в частности, готических и русских букв, а также символов (например, $\mathcal{L}$, $\mathcal{P}$, $\mathcal{A}$, $\mathcal{D}$, $\mathcal{M}$, $\mathcal{G}$, $\mathfrak{z}$, $\mathbb{Z}$, $\mathbb{P}$, $\mathbb{R}$, ∇ , $\oplus$, $\exists$ и др.) следует особо отмечать на полях рукописи.

Нумерация математических формул приводится справа от формулы курсивом в круглых скобках. Для удобства форматирования следует использовать таблицы из двух столбцов, но без границ. В левом столбце приводится формула, в правом – номер формулы.

Ссылки на математические формулы приводятся в круглых скобках курсивом и сопровождаются определяющим словом. Например: ... согласно уравнению (2) ...

Транскрипцию фамилий и имен, встречающихся в ссылке, необходимо по возможности представлять на оригинальном языке (преднамеренно не русифицируя), либо приводить в скобках иноязычный вариант транскрипции фамилии.

Список источников литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.5 в порядке цитирования. Литературный источник в списке литературы указывается один раз (ему присваивается уникальный номер, который используется по всему тексту публикации).

ОБРАЗЦЫ ОФОРМЛЕНИЯ ССЫЛОК НА ЛИТЕРАТУРУ

Общая схема библиографического описания:

КНИГА С ОДНИМ, ДВУМЯ или ТРЕМЯ АВТОРАМИ:
ЗАГОЛОВОК (фамилия, инициалы авторов) ОСНОВНОЕ
ЗАГЛАВИЕ
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ (учеб. пособие)

СВЕДЕНИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ (И.О. Фамилия
редактора, составителя; университет)
СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ (2-е изд., перераб. и доп.)
МЕСТО ИЗДАНИЯ (Москва, Новосибирск)
ИЗДАТЕЛЬСТВО
ГОД ИЗДАНИЯ.
КОЛИЧЕСТВО СТРАНИЦ.

Если нет какой-либо области описания – пропускаем.

Примеры:

Книга с одним автором:

Росляков А.В. ОКС №7: архитектура, протоколы, применение.
Москва: ЭкоТрендз, 2010. 315 с.

Книга с двумя авторами:

Ручкин В.Н., Фулин В.А. Архитектура компьютерных сетей.
Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 2010. 238 с.

Книга с тремя авторами:

Тарасевич Л.С., Гребенников П.И., Леусский А.И.
Макроэкономика: учебник. Москва: Высш. образование, 2011. 658с.

Максименко В.Н., Афанасьев В.В., Волков Н.В. Защита
информации в сетях сотовой подвижной связи / под ред. О.Б.
Макаревича. Москва: Горячая линия-Телеком, 2009. 360 с.

Книга с четырьмя и более авторами: Описание начинается с
ОСНОВНОГО ЗАГЛАВИЯ. В сведениях об ответственности
указываются либо все авторы, либо первый автор с добавлением в
квадратных скобках сокращения "и другие" [и др.]

1. История России в новейшее время: учебник / А.Б.
Безбородов, Н.В. Елисеева, Т.Ю. Красовицкая, О.В. Павленко.
Москва: Проспект, 2014. 440с.

или

1. История России в новейшее время: учебник / А.Б. Безбородов
[и др.]. Москва: Проспект, 2014. 440 с.

Книга без автора:

Страхование: учебник / под ред. Т.А. Федоровой. 3-е изд.,
перераб. и доп. Москва: Магистр, 2011. 106 с.

Многотомное издание:

Экономическая история мира. Европа. Т. 3 / под общ. ред. М.В. Конотопова. Москва: Издат.-торг. корпорация «Дашков и К», 2012. 350 с.

Учебное пособие вуза:

Заславский К.Е. Оптические волокна для систем связи : учеб. пособие / Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. Новосибирск, 2008. 96 с.

или

Заславский К.Е. Оптические волокна для систем связи: учеб. пособие. Новосибирск: СибГУТИ, 2008. 96 с.

Нормативные документы:

Типовая инструкция по охране труда для пользователей персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ) в электроэнергетике: РД 153-34.0-03.298-2001. Введ. с 01.05.2001. М., 2002. 91с.

ГОСТ 7.80-2000. Библиографическая запись. Заголовок. Общие требования и правила составления. Введ. 2001-07-01. М., 2000. 7с.

Общая схема описания статей из журналов:

Фамилия И.О. автора статьи. Название статьи // Название журнала. Год. №. С.

Статья с одним автором:

Волков А.А. Метод принудительного деления полосы частот речевого сигнала // Электросвязь. 2010. № 11. С. 48-49.

Статья с тремя авторами:

Росляков А., Абубакиров Т., Росляков Ал. Системы поддержки операционной деятельности провайдеров услуг VPN // Технологии и средства связи. 2011. № 2. С. 60-62.

Статья с четырьмя и более авторами:

Сверхширокополосные сигналы для беспроводной связи / Ю.В. Андреев, А.С. Дмитриев, Л.В. Кузьмин, Т.И. Мохсени // Радиотехника. 2011. № 8. С. 83-90.

Общая схема описания электронного документа:

ЗАГОЛОВОК (фамилия, инициалы авторов) ОСНОВНОЕ ЗАГЛАВИЕ

ОБЩЕЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ МАТЕРИАЛА [Электронный ресурс]

системы (эбс)

Книга с 1-3 авторами:

Карпенков С.Х. Экология [Электронный ресурс]: учебник. Электрон. Текстовые данные. М.: Логос, 2014. 400 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/21892>. ЭБС «IPRbooks».

Книга с 4 и более авторами:

Сборник задач по аналитической геометрии и линейной алгебре [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Л.А. Беклемишева [и др.]; под ред. Д.В. Беклемишева. Электрон. текстовые дан. Изд. 3-е, испр. СПб.: Лань, 2008. URL: <http://e.lanbook.com/view/book/76/>

Ссылки внутри текста

Затекстовые библиографические ссылки:

В конце абзаца текста в квадратных скобках [3, с. 25]

3 – номер источника в списке литературы с. 25 – номер страницы.

Статьи, оформленные с нарушением перечисленных выше правил, редакцией не рассматриваются.

Образец:

ЛИТЕРАТУРОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 81'38

СТИЛИСТИЧЕСКОЕ СВОЕОБРАЗИЕ ПОВЕСТИ А.С. ПУШКИНА «КАПИТАНСКАЯ ДОЧКА»

Иван Иванович Иванов¹, Иван Иванович Сидоров²

*^{1,2}Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы, Уфа, Россия*

¹ivanov@mail.ru

²nova8@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку: Иван Иванович Иванов,
ivanov@mail.ru*

Аннотация. В статье проводится стилистический анализ повести А.С. Пушкина «Капитанская дочка», исследуются уникальные стилистические особенности произведения. Анализ текста с точки зрения языковых и стилистических приемов позволяет раскрыть особенности художественного исполнения и языкового мастерства. Исследование фокусируется на использовании лексических оборотов, фразеологизмов, художественных приемов, а также на роли стилистики в создании образов. Результаты анализа помогают более глубоко понять и оценить вклад А.С. Пушкина в развитие русской литературы, а также выдвинуть новые исследовательские гипотезы относительно структуры и смысла «Капитанской дочки»... (не менее 250 слов).

Ключевые слова: А.С. Пушкин, «Капитанская дочка», стилистический прием, языковое мастерство, повесть

Для цитирования: Иванов И.И., Сидоров И.И. Стилистическое своеобразие повести А.С. Пушкина «Капитанская дочка» // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М.Акмуллы. Серия: Филологические науки. 2024. №1. С.

LITERARY STUDIES

Original article

THE STYLISTIC UNIQUENESS OF THE NOVELLA "THE CAPTAIN'S DAUGHTER" BY A.S. PUSHKIN

Ivan I. Ivanov¹, Ivan I. Sidorov²

^{1,2} *Bashkir State Pedagogical University n.a. M. Akmulla, Ufa, Russia*

¹ *ivanov@mail.ru*

² *nova8@mail.ru*

Corresponding author: Ivan I. Ivanov, ivanov@mail.ru

Abstract. The article presents a stylistic analysis of Alexander Pushkin's novella "The Captain's Daughter," exploring its unique stylistic features. Analyzing the text from the perspective of language and stylistic devices helps reveal the artistic execution and linguistic mastery of the work. The study focuses on the use of lexical expressions, phraseology, artistic techniques, and the role of stylistics in character creation. The results of the analysis aid in a deeper understanding and appreciation of Alexander Pushkin's contribution to the development of Russian literature, as well as in proposing new research hypotheses regarding the structure and meaning of "The Captain's Daughter." ... (не менее 250 слов).

Keywords: Alexander Pushkin, The Captain's Daughter, stylistic device, linguistic mastery, novella

For citing: Ivanov I.I., Sidorov I.I. Stylistic uniqueness of Alexander Pushkin's novella "The Captain's Daughter" // Bulletin of Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmully. Series: Philological Sciences. 2024. №1. pp.

Структура текста:

Введение:

- актуальность темы;
- проблема, которую предстоит исследовать;
- степень разработанности (обзор литературы);
- цель и задачи;

Методы:

- теоретико-методологические основы и методы исследования (материалы, процедуры, участники; подробно описывается то, как проводилось исследование);

Результаты исследования

(здесь максимально присутствуют таблицы, схемы, графики, математические выкладки.);

Обсуждение:

- ответ на гипотезу;
- сопоставление с другими исследованиями;
- описание вклада в науку;

Заключение:

- выводы;
- возможные направления дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (не менее 15)

1. Абрамзон С.М. Киргизы и их этногенетические и историко-культурные связи. – Л., 1971.
2. Ахмеров Р.Б. Наскальные знаки и этнонимы башкир. – Уфа: Китап, 1994. – 112 с: ил. ISBN 5-295-01493-2 (Из записок историка-краеведа).
3. Башкорт халык ижады. 5-се том. Тарихи кобайырзар, хикәйттәр, иртәктәр. / Төзөүсе, инеш мәкәлә, коммент., глоссарий авторы Н.Т. Зарипов. Яуаплы редактор З.Ф. Ураксин. – Өфө, 2000. – 391 б.
4. Башкорт халык ижады. XIII т. Хайуандар тураһында әкиәттәр / Төз, баш һүз авторы Г.Р. Хөсәйенова, аңл. авт-ры Л.Г. Бараг, М.М. Мингажетдинов, Г.Р. Хөсәйенова. – Өфө: Китап, 2009. – 200 б.
5. Башкорт халык ижады. Әкиәттәр III китап / Төз. Н.Т. Зарипов, М.М. Мингажетдинов, аңл. авт.-ры Л.Г. Бараг, Н.Т. Зарипов. – Өфө: Башкитап нәшриәте, 1978, – 351-се б.
6. Башкорт халык ижады. Йола фольклоры / Төз., инеш һүз, аңл. авт-ры Ә. Сөләймәнов, Р. Солтангәрәева. – Өфө, Китап: 1995. – 556 б.
7. Башкорт халык ижады. Мәкәлдәр һәм әйтемдәр. Беренсе китап / Төз., башһүз, аңлатм. авторы. Ф.А. Нәзершина. – Өфө: Китап, 2006. – 544 б.
8. Башкорт халык ижады. Т.5. Тарихи кобайырзар, хикәйттәр, иртәктәр/ Төзөүсе, инеш мәкәлә, коммент., глоссарий авторы Н.Т. Зарипов. Яуаплы редактор З.Ф. Ураксин. – Өфө, Китап, 2000. 5-се том, 391 С.
9. Берёзкин Ю.Е. Реконструкция сюжета создания человека у степных индоевропейцев // Культуры степной Евразии и их взаимодействие с древними цивилизациями. – СПб.: ИИМК РАН. «Периферия». Ред. коллегия. 2012. кн. 2. – 584 с.
10. В преддверии философии: духовные искания древнего человека Г. Франкфорт, Г.А. Франкфорт, Дж. Уилсон, Т. Якобсен. – СПб.: Амфора, 2001. – 314 с
11. Захарова А.Е. Архаическая ритуально-обрядовая символика народа Саха. – Новосибирск: Наука, 2004. – 312с.
12. Инан А. Шаманизм тарихта һәм бөгөн. – Өфө: Китап, 1998, 223 б.
13. Куканова В.В. Архаические представления о ветре в калмыцком фольклоре: междисциплинарный подход / В.В. Куканова

// Новый филологический вестник. – 2021. – № 2(57). – С. 371-391. – DOI 10.24411/2072-9316-2021-00058. – EDN LZFRJY.

14. Петров А.М. Образы воздушной стихии в русском религиозном фольклоре / А. М. Петров // Религиоведение. – 2022. – № 4. – С. 93-99. – DOI 10.22250/20728662_2022_4_93. – EDN DPLAQW.

15. Султангареева Р.А. Башкирский фольклор: семантика, функции и традиции. Т.2. Календарный фольклор: миф и ритуал. – Уфа: Башк. энцикл., 2019. – 296 с.

REFERENCES

Список источников в конце статьи представляется в транслитерации (с переводом в квадратных скобках [] названия источника на английский язык).

1. Abramzon S.M. Kirgizy i ih etnogeneticheskie i istoriko-kul'turnye svyazi [Kyrgyz people and their ethnogenetic, historical and cultural ties]. – L., 1971.

2. Ahmerov R.B. Naskal'nye znaki i etnonimy bashkir [Rock signs and ethnonyms of Bashkirs]. – Ufa: Kitap, 1994. – 112 s: il. ISBN 5-295-01493-2 (Iz zapisok istorika-kraevedy).

3. Bashkort halyk izhady. 5-se tom. Tarihi kobajyrzar, hikəjəttər, irtəktər [Bashkir folk art. Volume 5. Historical kubairs, legends, tales] / Тəзəyse, inesh məkələ, komment., glossarij avtory N.T. Zaripov. YAuply redaktor Z.F. Uraksin. – Өfə, 2000. – 391 b.

4. Bashkort halyk izhady. XIII t. Hajuandar turahynda əkiəttər [Bashkir folk art. XIII vol . Animal Tales] / Тəз, bash hыз avtory G.R. Həsəjenova, аңл. avt-ry L.G. Barag, M.M. Mingazhetdinov, G.R. Həsəjenova. – Өfə: Kitap, 2009. – 200 b.

5. Bashkort halyk izhady. Əkiəttər III kitap [Bashkir folk art. Fairy Tales book III] / Тəз. N.T. Zaripov, M.M. Minhazhetdinov, аңл. avt-ry L.G. Barag, N.T. Zaripov. – Өfə: Bashkitap nəshriəte, 1978, – 351-se b.

6. Bashkort halyk izhady. Jola fol'klory [Bashkir folk art. Ritual folklore] / Тəз., inesh hыз, аңл. avt-ry Ə. Sələjmənov, R. Soltangəräeva. – Өfə, Kitap: 1995. – 556 b.

7. Bashkort halyk izhady. Məkəldər həм əjtemdər. Berense kitap [Bashkir folk art. Proverbs and sayings. The first book] / Тəз., bashhыз, аңлатм. avtory. F.A. Nəzəreshina. – Өfə: Kitap, 2006. – 544 b.

8. Bashkort halyk izhady. T.5. Tarihi kobajyrzar, hikəjəttər, irtəktər [Bashkir folk art. Vol. 5. Historical kubairs, tales, tales] / Тəзəyse, inesh məkələ, komment., glossarij avtory N.T. Zaripov. YAuply redaktor Z.F. Uraksin. – Өfə, Kitap, 2000. 5-se tom, 391 s.

9. Beryozkin YU.E. Rekonstrukciya syuzheta sozdaniya cheloveka u stepnyh indoevropceev [Reconstruction of the plot of human creation among the steppe Indo-Europeans] // Kul'tury stepnoj Evrazii i ih vzaimodejstvie s drevnimi civilizacijami. – SPb.: IIMK RAN. «Periferiya». Red. kollegiya. 2012. kn. 2. – 584 s.
10. V preddverii filosofii: duhovnye iskanija drevnego cheloveka G. Frankfort, G.A. Frankfort, Dzh. Uilson, T. Yakobsen [On the threshold of philosophy: the spiritual quest of ancient man G. Frankfort, G.A. Frankfort, J. Wilson, T. Jacobsen]. – SPb.: Amfora, 2001. – 314 s
11. Zaharova A.E. Arhaicheskaya ritual'no-obryadovaya simbolika naroda Saha [Archaic ritual and ceremonial symbols of the Sakha people]. – Novosibirsk: Nauka, 2004. – 312s.
12. Inan A. SHamanizm tarihta h m b gen [Shamanism in history and today]. –  f : Kitap, 1998, 223 b.
13. Kukanova V.V. Arhaicheskie predstavleniya o vetre v kalmyckom fol'klоре: mezhdisciplinarnyj podhod [Archaic ideas about the wind in Kalmyk folklore: an interdisciplinary approach] / V.V. Kukanova // Novyj filologicheskij vestnik. – 2021. – № 2(57). – S. 371-391. – DOI 10.24411/2072-9316-2021-00058. – EDN LZFRJY.
14. Petrov A.M. Obrazy vozdushnoj stihii v russkom religioznom fol'klоре [Images of the air element in Russian religious folklore] / A.M. Petrov // Religiovedenie. – 2022. – № 4. – S. 93-99. – DOI 10.22250/20728662_2022_4_93. – EDN DPLAQW.
15. Sultangareeva R.A. Bashkirskij fol'klор:semantika, funkcii i tradicii. T.2. Kalendar'nyj fol'klор: mif i ritual [Bashkir folklore:Semantics, functions and traditions. Vol. 2. Calendar folklore: myth and ritual]. – Ufa: Bashk. encikl., 2019. – 296 s.

Информация об авторах

И.И. Иванов – аспирант;

И.И. Сидоров – кандидат филологических наук, доцент.

Information about the authors

I.I. Ivanov – graduate student;

I.I. Sidorov – Candidate of Science (Philology), Associate Professor.

Вклад авторов:

И.И. Иванов – сбор материала, обработка материала;

И.И. Сидоров – научное редактирование текста; концепция исследования;

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

I.I. Ivanov – scientific editing of the text; research concept;

I.I. Sidorov – data collection, data processing;

The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 00.00.2024; принята к публикации
00.00.2024.*

The article was submitted 00.09.2024; accepted for publication 00.00.2024.

**ВЕСТНИК
БАШКИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПЕДАГОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
им. М. АКМУЛЛЫ**

16 +

Серия: Естественные науки.

**Редакция не всегда разделяет мнение авторов.
Статьи публикуются в авторской редакции.**

Подписано в печать: 25.08.2026 г.

Формат 70×108/16

Бумага офсетная.

Гарнитура Times New Roman

Усл. печ. л. 11.

Уч-изд.л.12,25.

Тираж 1000 экз.

Отпечатано в ИП Копыльцов П.И.

394052, Воронежская область, г. Воронеж, ул. Маршала

Неделина, д. 27, кв. 56.

Тел.: 89507656959. E-mail: Kopyltsov_Pavel@mail.ru

Бесплатно.