ISSN 3034-3739 (Online)

Вестник 2026

Балтийского федерального университета им. И. Канта

Серия

Естественные науки

№ 1

2026
Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта

ISSN 3034-3739 (Online)

БФУ БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИММАНУИЛА КАНТА

IKBFU IMMANUEL KANT BALTIC FEDERAL UNIVERSITY

ВЕСТНИК

БАЛТИЙСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА им. И. КАНТА

Серия

Естественные науки

№1

Калининград
Издательство Балтийского федерального университета
им. Иммануила Канта
2026

12+

Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. — 2026. — №1. — 147 с.

Учредитель

Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта

Редакция

236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, 14
Адрес электронной почты редакции: vestnik@kantiana.ru
Телефон: + 7 (4012) 595-595 (доб. 6718)

Издатель

236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, 14

СМИ «Вестник БФУ им. И. Канта. Серия: Естественные науки» зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), регистрационный номер ЭЛ № ФС 77-88748 от 2 декабря 2024 г.

Дата выхода в свет 18.02.2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

УДК 914/919:327.5

В. В. Стрюковатый

КАЛИНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОПОЛИТИЧЕСКИХ ВЫЗОВОВ: ДИНАМИКА И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
Поступила в редакцию 24.10.2025 г.
Принята к публикации 11.12.2025 г.
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-1

Для цитирования: *Стрюковатый В. В.* Калининградская область в условиях современных геополитических вызовов: динамика и тенденции развития // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2026. №1. С. 5—24. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-1.

Калининградская область, являясь эксклавом России в центре Балтийского региона, оказалась в эпицентре геополитического противостояния между Российской Федерацией и коллективным Западом. С началом Специальной военной операции на Украине конфронтация с НАТО, Европейским союзом и государствами региона достигла максимума. Географическое положение Калининградской области создало угрозы ее транспортной и экономической блокады, усилив при этом ее военно-стратегическое значение как российского форпоста. В статье анализируются ключевые вызовы, с которыми сталкивается Калининградская область: эксклавное положение, санкционное давление, ограничение грузового транзита через Литву, милитаризация региона и угрозы морской блокады. Рассматривается эволюция политики прибалтийских государств, направленной на изоляцию области, а также ответные меры России, включая военно-политические. Особое внимание уделено экономической адаптации региона: развитию морских перевозок, энергетической безопасности и поиску новых логистических маршрутов под влиянием санкций. Подчеркивается возрастающее значение Балтийского моря как ключевого транспортного коридора. Исследование показывает, что в условиях нарастающей конфронтации с Западом Калининградская область вынуждена сочетать усиление оборонного потенциала с поиском устойчивых экономических моделей развития, позволяющих минимизировать угрозы и сохранить контроль над ключевыми транспортными маршрутами.

Ключевые слова: Калининградская область, Балтийский регион, геополитические вызовы, безопасность, развитие, эксклавность, кризис

Введение

С началом проведения специальной военной операции (далее — СВО) на Украине отношения Российской Федерации с государствами Европы перешли из плоскости политического диалога к нескрываемой конфронтации. Особенно она исходит от государств Балтийского региона — Польши, Финляндии, Швеции и трех Прибалтийских государств (Литвы, Латвии и Эстонии). С момента распада Советского Союза уровень конфронтации этих государств неуклонно рос и достиг своего максимума к началу проведения СВО. Такие категории международных отношений, как противостояние и конфронтация, стали нормой для описания ситуации в регионе.

При этом необходимо отметить, что причиной ухудшения взаимодействия между Российской Федерацией, Евросоюзом и государствами региона стала не СВО. Она выступила как катализатор обострения отношений, которые нельзя было назвать конструктивными и до ее начала, что нашло отражение в официальных документах как государств региона, так и Европейского союза, членами которого все они являются (за исключением Норвегии).

В частности, в 2007 г. Европейский союз сорвал подписание нового соглашения о партнерстве и сотрудничестве с Российской Федерацией. Кроме того, Евросоюз фактически бойкотировал исполнение подписанных в 2003 и 2005 гг. соглашений о создании в регионе общих пространств — экономического, пространства свободы, безопасности и исследований, образования и науки. Европейским союзом создавались затруднения для экспорта российской продукции в страны ЕС, которые носили характер нетарифных ограничений [34].

Наиболее активно используемым инструментом Европейского союза для оказания политического и экономического давления на Россию оказались санкции, которые ЕС начал активно использовать с марта 2014 г. При этом санкции вводились не только в отношении юридических лиц, органов исполнительной власти, общественных организаций, но и против отдельных политиков, бизнесменов, журналистов и общественных деятелей.

Однако самым показательным примером отсутствия конструктивных отношений между Европейским союзом и Российской Федерацией, на наш взгляд, является ситуация вокруг газопровода «Северный поток-2» и проблемы, с которыми столкнулась российская сторона в ходе его строительства, сертификации и запуска в эксплуатацию [36].

По мнению старшего советника посольства Российской Федерации в ФРГ А. Лебедева, санкции, заняв свое место в арсенале средств экономической политики ряда государств, и прежде всего США, превратились в нерыночный, нерегулируемый международным правом и торговыми соглашениями инструмент экономического и политического давления. Вводимые под различными предлогами санкции, по существу, служат целям, далеким от официально заявленных, а зачастую и противоположным [21].

С началом украинского кризиса в 2014 г. начали нарастать милитаризация, а также уровень опасений представителей государств Балтийского региона по поводу региональной безопасности. При этом лидеры и политические деятели Прибалтийских государств выражали не только обеспокоенность по вопросам безопасности, но и открыто, безосновательно обвиняли Российскую Федерацию в агрессии.

В этих условиях регион Балтийского моря стал важным полем геостратегического противостояния между Российской Федерацией, с одной стороны, и коллективным Западом во главе с Соединенными Штатами, с другой [20].

После вступления в НАТО Финляндии и Швеции, Балтийское море практически полностью оказалось окружено государствами, входящими в Североатлантический альянс (за исключением Российской Федерации), что, в свою очередь, кратно увеличило возможности стран Запада не только оказывать санкционное давление на Россию, но и в случае обострения обстановки организовать морскую блокаду основных российских портов на Балтике: Калининград, Балтийск, Санкт-Петербург, Усть-Луга и Приморск, а также военно-морских баз Балтийского флота в Кронштадте и Балтийске.

При этом следует иметь в виду, что в настоящее время регион Балтийского моря для России является одним из важнейших транспортных коридоров, связанных с развитием Северного морского пути и грузовым транзитом, в первую очередь, в Калининградскую область, а также экспортом углеводородов.

Сейчас Калининградская область, отделенная от основной территории Российской Федерации и окруженная поясом государств-лимитрофов, фактически представляющих «санитарный кордон», оказалась на линии открытой конфронтации России с агрессивно настроенными евроатлантическими структурами.

Однако, находясь в эпицентре геополитических процессов, протекающих в Балтийском регионе, Калининградская область демонстрирует динамику развития, которая определяется двумя взаимосвязанными процессами: усилением ее военно-стратегической роли как форпоста России и поиском новых экономических моделей для преодоления изоляции.

В этих условиях самый западный регион России сталкивается с необходимостью адаптации к изменяющейся внешней среде, что требует комплексного анализа ее военно-стратегической роли, экономического потенциала и перспектив развития.

Динамика и тенденции развития области в контексте современных вызовов неоднократно становились объектом изучения как отдельных ученых, так и научных и аналитических центров. В частности, большое количество исследований Балтийского региона (экономических, социальных, военно-политических и др.) проведено учеными Балтийского Федерального Университета им. И. Канта — Г. М. Федоровым, А. П. Клемешевым, Я. А. Ворожеиной, Ю. М. Зверевым и др.

Однако стремительно меняющаяся геополитическая обстановка как в мире, так и в регионе Балтийского моря делает актуальным проведение исследования, направленного на дополнительное изучение и выявление ключевых факторов, влияющих на геополитическое положение Калининградской области и разработку рекомендаций по укреплению военной и экономической безопасности.

Цель настоящего исследования — выявление и анализ ключевых тенденций и динамики геополитических процессов в Балтийском регионе, их влияние на положение Калининградской области в условиях современных вызовов и угроз, а также определение перспективных направлений повышения ее устойчивости к меняющейся геополитической обстановке.

Основными задачами исследования являются определение места Калининградской области в политической и экономической структуре Балтийского региона, изучение динамики и анализ геополитической обстановки в регионе и ее влияния на развитие области, выявление ключевых для Калининградской области вызовов и угроз, определение направления развития Калининградской области, которое позволит ей эффективно адаптироваться к современным условиям и обеспечить устойчивое развитие в долгосрочной перспективе.

Такой подход позволит комплексно оценить положение Калининградской области в условиях современной геополитической ситуации в Балтийском регионе и предложить рекомендации для обеспечения ее развития и безопасности.

Формирование региона геополитической нестабильности вокруг Калининградской области

Вступление Прибалтийских государств и Польши в евроатлантические структуры стало реализацией их внешнеполитической программы середины 1990-х гг., проводившейся под лозунгом «Назад в Европу!». В ходе ее реализации формировалась и будущая стратегия отношений этих стран с Россией, согласно которой они являются «органичной частью Запада, “похищенной” Советским Союзом» [18].

При этом стремление как можно быстрее стать частью Западного мира обосновывалось ими достаточно просто: НАТО, в которой ведущая роль бесспорно принадлежит США, они рассматривали в качестве гаранта их безопасности, а Европейский союз — в качестве источника финансовой помощи и гаранта экономической стабильности [6].

Можно с уверенностью констатировать, что переориентация бывших Прибалтийских государств СССР проходила под влиянием националистических идей, которые в итоге стали основой политики, проводимой правящими элитами вновь образованных государств, а также основой выбора направления их внешнеполитического движения.

Как считает В. Смирнов [6], коридор выбора внешнеполитических действий элитами малых стран определяется в основном тремя сферами: экономической, военно-политической и культурно-идеологической. В этой связи Прибалтийские страны можно считать идеальным примером приведенной концепции [31] так как все три указанных фактора не только присутствуют в основании их выбора, но и оказывают значительное влияние друг на друга, создавая в итоге ситуацию «идеального шторма».

В начале 1990-х гг. идея интеграции Прибалтийских государств в НАТО вызывала не только большие сомнения в Брюсселе и Вашингтоне, но и немалые опасения в политическом руководстве самих республик, которое рассматривало идею нейтралитета и стратегии «между Востоком и Западом», как моста между Россией и Европой. Эта идея официально даже была включена в Концепцию безопасности Литвы 1992 г. [38], а также в проект Концепции безопасности Эстонии 1993 г. [37]. Идею нейтралитета рассматривали и в Латвии. Но, как отметил в своих мемуарах первый президент Литвы А. Бразаускас, «…хотя много голосов было за нейтралитет, выбор был сделан в пользу концентрации коллективной безопасности…» [2].

Однако идея о нейтральном статусе и «мосте» между Европой и Россией была краткосрочной. В конце 1993 г. в Таллине все три прибалтийских президента сошлись во мнении, что «видят в НАТО главного перспективного гаранта безопасности трех государств, имея тенденции, складывающиеся после парламентских выборов в России» [23].

Так или иначе, после прохождения всех процедур Литва, Латвия и Эстония с 29 марта 2004 г. стали полноправными членами НАТО. Польша же вступила в НАТО пятью годами ранее — 12 марта 1999 г. Членами Европейского союза Латвия, Литва, Эстония и Польша стали 1 мая 2004 г.

После того как государства Балтийского региона официально были приняты в Европейский союз и НАТО, концепция «моста между Востоком и Западом» стала исключаться из всех официальных внутри- и внешнеполитических повесток, институт «неграждан» в Прибалтийский республиках был оформлен на законодательном уровне, а «российская угроза» стала основой в их политическом дискурсе.

Тем не менее в то время Балтийское море вместе с его прибрежной территорией формировало уникальный макрорегион, в отношении которого действовала стратегия[1] Европейского союза, сосредоточенная на углублении транснациональной интеграции, охране морской экосистемы, улучшении транспортной инфраструктуры и повышении уровня жизни в приморских странах [25].

При этом, участие России в программах данной стратегии было значительно ограничено после событий 2014 г. и полностью прекращено после начала СВО. Также в 2022 г. Россия вышла из Совета государств Балтийского моря, а в 2023 г. из Совета Баренцева / Евроарктического региона.

С точки зрения инструментов сотрудничества, Балтийский регион был самым показательным для всего мира. В регионе действовало несколько международных региональных организаций, таких как Совет государств Балтийского моря, Парламентская конференция Балтийского моря, Организация субрегионального сотрудничества государств Балтийского моря, Северное измерение или, например, программы

[1] Макрорегиональные стратегии — часть инструментария долгосрочного развития Евросоюза. В частности, они упоминаются в документе ЕС «Европа 2020: Стратегия разумного, устойчивого и инклюзивного роста». В нем говорится о роли регионов, ставших полноправными участниками политических процессов наравне с государствами — членами ЕС и его институтами.

приграничного сотрудничества (INTERREG). Планировалась к созданию Балтийская стратегия «ЕС — Россия», включавшая множество элементов: борьбу с загрязнениями, рыболовство, совместное освоение ресурсов, туризм и ганзейскую культуру [13].

В условиях роста напряженности Совет государств Балтийского моря потенциально мог бы выступить в качестве механизма координации общей стратегии, направленной на обеспечение безопасности и стабильности в регионе [30]. Но все это было остановлено и заблокировано в 2022 г. государствами — членами Совета по причине «агрессии России на Украине». В итоге это привело к тому, что сейчас нет никаких точек соприкосновения и инструментов, через которые было бы возможно решать проблемы общего развития. На наш взгляд, это сделано в угоду геополитическим амбициям и желаниям, главным образом, Соединенных Штатов, а позднее — и Европейского союза.

После начала СВО Россия была вынуждена сама выйти из некоторых международных организаций и проектов, деятельность которых связана с регионом Балтийского моря, а из некоторых была исключена, или ее членство в них было приостановлено. Это сделало невозможным ведение конструктивного диалога как с государствами региона, так и с Европейским союзом.

Эксклавность — главный фактор геополитической нестабильности вокруг Калининградской области

Главным фактором, влияющим на геополитическую обстановку вокруг Калининградской области, является ее эксклавное положение. При этом до начала обострения отношений с соседними государствами географическое положение Калининградской области создавало не только угрозы, но и возможности для ее развития в рамках трансграничного сотрудничества [16].

Так, в период существования Советского Союза у Калининградской области отсутствовали проблемы транспортного сообщения с другими регионами страны, отсутствовали угрозы морской или сухопутной экономической блокады региона [17].

После распада Советского Союза Калининградская область оказалась фактически отрезанной от основной части Российской Федерации государствами, вышедшими из состава СССР под давлением националистически настроенных элит, которые всячески демонстрировали свои антироссийские настроения.

В этих условиях впервые возник вопрос обеспечения экономической, транспортной, энергетической и военной безопасности региона, поскольку существовавший к моменту распада Советского Союза промышленный комплекс, включавший, прежде всего, рыбопромышленный комплекс и приборостроение, фактически был разрушен, а область столкнулась с проблемами грузового и пассажирского транзита через территорию ставшей независимой Литвы, что в существовавших условиях создавало значительные проблемы для снабжения области с территории России.

После того как Польша и государства Прибалтики вступили в НАТО и Европейский союз, Калининградская область стала российским эксклавом и в то же время — полуанклавом внутри НАТО и Европейского союза [17].

С этого времени начался период ухудшения отношений как с Европейским союзом, так и с отдельными государствами региона. После вступления в ЕС Прибалтийских государств и Польши, их руководством были проигнорированы предложенные Российской Федерацией меры по защите интересов Калининградской области как субъекта Российской Федерации. В частности, не были рассмотрены предложенные российским правительством меры по упрощению грузового и пассажирского транзита. Напротив, Европейский союз согласился с предложенными Литвой и Польшей мерами по ужесточению визового, транзитного и пограничного режимов. Свои рекомендации Литва и Польша мотивировали стремлением нейтрализовать влияние России в регионе.

В итоге, предпринимаемые Европейским союзом, Литвой и Польшей меры привели к росту напряженности в их отношениях с Российской Федерацией.

Начавшийся в 2014 г. украинский кризис привел к еще большей конфронтации в отношениях между Российской Федерацией, Европейским союзом и государствами региона и актуализировал проблему «двойной периферии», то есть проблему региона, который находится на периферии как по отношению к основной территории страны, так и по отношении к соседним государствам — эксклав по отношению к России и анклав для Евросоюза [34]. Это привело не только к обострению межгосударственных отношений, но и к изменению роли Калининградской области, связанной с ее географическим положением. В условиях географической и экономической изоляции от основной части России, Калининградская область стала рассматриваться как «военный форпост» или «непотопляемый авианосец» России на Западе.

По мнению А. Себенцова и М. Зотовой [29] в условиях изоляции Калининградская область столкнулась с проблемами, вызванными ее географическим положением и ситуацией в регионе: проблемой доступа к территории в рамках пассажирских и грузовых перевозок; экономическими проблемами, связанными с санкционными ограничениями и издержками; зависимостью от поставок всех видов товаров с основной части России.

Таким образом можно констатировать, что Калининградская область, поэтапно проходя процесс «эксклавизации» после распада СССР, перешла от эксклавности юридической к эксклавности фактической [15].

Геополитическое значение Балтийского моря в дискурсе «Россия — Запад»

Не вызывает сомнения тот факт, что Балтийское море имеет важнейшее геополитическое значение как для России, так и для целого ряда европейских государств, являющихся членами НАТО. С одной стороны, именно в этом регионе напрямую соприкасаются силы Российской Федерации и Североатлантического альянса. С другой — неоспоримо значение Балтики для глобальной экономики, развития торговли, для прямого выхода России в Мировой океан [7].

Регион Балтийского моря является для Российской Федерации одним из важнейших транспортных коридоров, позволяющих России вести внешнеторговую деятельность в условиях беспрецедентной санкционной политики со стороны Европейского союза и США. При этом расположенные на Балтике российские порты входят в систему международных транспортных коридоров «Запад-Восток» и «Север-Юг», через которые осуществляется как экспорт российских грузов, так и грузовой транзит главным образом, из Китая в страны Европейского союза [33].

В условиях противостояния России с НАТО, а также в связи с проводимой политикой Финляндией, Швецией, Прибалтийскими государствами, значительно возросло стратегическое значение основных островов Балтийского моря — Готланда, Борнхольма, Сааремаа, которые позволяют полностью контролировать судоходство в акватории Балтийского моря и Финского залива.

После вступления в НАТО Швеции и Финляндии в Балтийском регионе не осталось государств, не являющихся членами НАТО, негативно сказывается как на позициях России в регионе, так и на ее стратегических интересах. Это может отразиться, прежде всего, на внешнеэкономических связях РФ и логистических цепочках с участием России. Возникла угроза блокады (экономической или военной) Финского залива и Калининграда, а также блокирования выхода для России из Балтийского моря в Атлантический океан [32].

Это открывает Европейскому союзу и НАТО возможности для оказания экономического давления на Российскую Федерацию в случае потенциального кризиса. Некоторые западные аналитики призывают НАТО к планированию запрета доступа России из Балтики в Северную Атлантику и далее в Баренцево море между Шпицбергеном и северным побережьем Норвегии [41].

В этой ситуации российские порты на Балтике (Усть-Луга, Санкт-Петербург, Приморск, Балтийск и Калининград), обладая развитой логистической сетью, тесно связанной с российскими производителями топлива и сырья, предоставляют услуги по перевалке грузов, которые отличались более низкой стоимостью и высоким качеством по сравнению с другими российскими портами [3]. Это способствовало реализации морских стратегий России, направленных на уменьшение зависимости от стран-транзитеров.

В этой связи порты Балтийского моря занимают лидирующие позиции по объему экспорта нефти, обеспечивая перевалку примерно половины всей российской нефти, экспортируемой морским транспортом, что обеспечивает порядка 1,5 % мирового рынка[1]. При этом одной из ключевых тенденций развития морских перевозок в Балтийском регионе является изменение структуры грузопотока, в частности увеличение доли углеводородного сырья, такого как нефть, нефтепродукты и сжиженный природный газ [27].

До февраля 2022 г. основная часть российской нефти, экспортируемой через порты Балтийского моря, поступала в страны Северной и Западной Европы. Однако с марта 2022 г. наблюдается резкое снижение поставок в эти регионы. После введения Евросоюзом нефтяного эмбарго появились сообщения о продолжении поставок российской нефти в Европу, главным образом морским транспортом [26]. Существенная часть таких поставок, как сообщают деловые издания, осуществляется через порты Финского залива[2].

Одновременно грузоперевозчики адаптировались к новым условиям, изменив номенклатуру вывозимых товаров через балтийские порты России, что позволило эффективно загрузить освободившиеся мощности [19].

В настоящее время российские порты на Балтийском море играют ключевую роль прежде всего в экспорте российских углеводородов, а также в контейнерных морских перевозках. Экспорт российской нефти из портов Балтики за 2022 г. составил 73,5 млн т, за 9 месяцев 2023 г. — 59 млн т (42 % российского экспорта по морю). Эти порты также остаются основным экспортным хабом для российских нефтепродуктов: 70,4 млн т в 2022 г., 67,5 млн т (или 47 % российского экспорта по морю) за 2023 г.[3] При этом в 2024 г. объем экспортируемых нефтепродуктов из балтийских портов России составил 61,96 млн т. То есть, около 60 % российской экспортируемой нефти, следует через Балтийское море[4].

Кроме того, в настоящее время в условиях ограничения железнодорожных перевозок со стороны ЕС, Балтийское море является ключевой транспортной артерией для снабжения Калининградской области, а количество судов, обеспечивающих перевозки, постепенно увеличивается [8].

---

[1] *Exclusive:* Russian fuel exports fall in 2024 as drone attacks, bans add to sanctions pressure. Reuters, January 17, 2025. URL: https://www.reuters.com/business/energy/russias-2024-seaborne-oil-product-exports-hit-by-headwinds-including-drone-2025-01-17/ (дата обращения: 10.03.2025) ; Энергокризис вновь начнется с Балтики. Финансы Mail.ru, 21 июня 2024. URL: https://finance.mail.ru/2024-06-21/energokrizis-vnov-nachinaetsya-s-baltiki-61575347/ (дата обращения: 10.03.2025).

[2] *Баррели* загрузили в танкеры. Коммерсантъ, 31.03.2025. URL: https://www.kommersant.ru/doc/7620983 (дата обращения: 31.03.2025).

[3] *Дания* на грани. Эксперты оценили последствия блокировки российской нефти Евросоюзом. Финансы Mail.ru, 15.12.2023. URL: https://finance.mail.ru/2023-11-15/daniya-na-strazhe-eksperty-ocenili-posledstvie-blokirovki-rossiyskoy-nefti-evrosoyuzom-58627149/ (дата обращения: 10.03.2025).

[4] *Exclusive:* Russian fuel exports fall in 2024 as drone attacks, bans add to sanctions pressure. Reuters, January 17, 2025. URL: https://www.reuters.com/business/energy/russias-2024-seaborne-oil-product-exports-hit-by-headwinds-including-drone-2025-01-17/ (дата обращения: 10.03.2025).

Также необходимо отметить, что с развитием Северного морского пути возрастает роль и значение портовой инфраструктуры, расположенной на побережье Балтийского моря, в том числе, в Калининградской области[1].

Санкции, транзитные ограничения и энергобезопасность — вызовы для анклавного региона России

Экономическое сотрудничество России с государствами Европейского союза начало ощутимо снижаться примерно с середины 2000-х гг. В это же время из общественного дискурса стала исчезать и идея создания в Калининградской области «региона сотрудничества» [35].

Начиная с 2014 г. Калининградская область испытала ряд экономических потрясений, вызванных геополитическими процессами на фоне начавшегося украинского кризиса. Во-первых, это было связано с санкционной политикой Соединенных Штатов и Европейского союза. Общее количество санкций, введенных в отношении российских физических и юридических лиц, по словам Президента Российской Федерации В. В. Путина достигло 28 595[2]. В ответ Россия была вынуждена ввести ответные контрсанкции, что оказало влияние как на ее экономику в целом, так и на экономику Калининградской области, которая оказалась не готова к столь масштабным изменениям [1]. Особенно сильное воздействие санкции Евросоюза оказали на транспортную отрасль, связанную с транзитом грузов между Калининградской областью и основной частью России.

Так, летом 2022 г., вопреки нормам международного права, Литва ввела ограничения на железнодорожный и автомобильный транзит между Калининградской областью и остальной частью Российской Федерации. В обоснование своих действий литовское руководство ссылалось на санкции и ограничения, введенные Европейским союзом в отношении Российской Федерации, которые Литва не может нарушать или трактовать самостоятельно.

Эти действия привели к резкому росту напряженности в отношениях Российской Федерации как с Литовской Республикой, так и с Евросоюзом. Полные ограничения были впоследствии заменены существенным снижением квот на грузоперевозки. В настоящее время в отношении около 80 % товаров действует запрет на транзит через территорию Литвы или снижение квоты в несколько раз, при этом стоимость транзита возросла на 60 %[3].

[1] *Развитие* инфраструктуры Северного морского пути как элемента единой Арктической транспортной системы России. Аналитическое Управление Аппарата Совета Федерации. URL: http://council.gov.ru/media/files/OSyfvhj7jATLDcjHeXRgdwxDMD1617jT.pdf (дата обращения: 10.03.2025).

[2] *Путин* назвал число санкций, введенных против России. РИА Новости. 18.03.2025. URL: https://ria.ru/20250318/putin-2005735698.html (дата обращения: 29.03.2025).

[3] *Решетников:* рестрикции ЕС коснулись 80 % грузов, ввозимых в Калининград по земле // ТАСС. 11.10.2023. URL: https://tass.ru/ekonomika/18982837 (дата обращения: 18.03.2025).

Под запрет попали нефть и нефтепродукты (13,3 % или 644,2 тыс. т), уголь (9,5 % или 457,8 тыс. т), цемент (8,2 % или 396,6 тыс. т), ввозимые в область, а также продукция калининградских предприятий, поставляемая на основную территорию Российской Федерации. Прежде всего это автомобили и прочий транспорт (10,2 % или 274 тыс. т), а также большой перечень иных товаров: кирпич строительный из керамики, изделия из дерева, мебель, торф и прочее, всего более 400 позиций [4].

Европейская комиссия смягчила ограничения 13 июля 2022 г., разрешив перевозить подсанкционные товары в Калининград через Литву только для нужд эксклава и только по железной дороге [8].

В итоге санкционная политика Евросоюза и Литвы привела к снижению автомобильного грузооборота между Калининградской областью и остальной частью России почти в полтора раза — с 6,4 млн т в 2014 г. до 4,7 млн т в 2023 г., а железнодорожного грузооборота — с 10,2 млн т в 2022 г. до 4,4 млн т за восемь месяцев 2024 г[1].

После введения ограничительных мер Калининградская область столкнулась с дефицитом основных групп товаров. В этих условиях Правительство Российской Федерации приняло решение об увеличении количества судов, задействованных на паромных линиях между Калининградом / Балтийском и портами Санкт-Петербург, Усть-Луга и Бронка. В настоящее время на линиях задействовано 19 судов паромного класса, при этом объем грузоперевозок морем увеличился с 4,65 млн т в 2021 г. до 9,2 млн т в 2023 г. [8].

Еще одна проблема, с которой столкнулась Калининградская область после ужесточения санкций, — это обеспечение энергобезопасности региона. Так как ограничения и квоты затронули энергоносители (мазут, уголь, топливо), возник риск их нехватки для обеспечения нужд населения и промышленности области. Однако эта проблема была решена за счет увеличения поставок энергоносителей морским транспортом.

Также угрозой для энергетической безопасности Калининградской области мог стать выход Прибалтийских республик из энергетического кольца БРЭЛЛ (Беларусь, Россия, Эстония, Литва, Латвия), которое обеспечивало область электроэнергией. Однако выход республик из энергокольца на обеспечении Калининградской области не сказался, так как совокупная мощность электростанций, находящихся на территории области, составляет 1,8 ГВт, что в два раза выше пикового потребления электроэнергии в области.

Необходимо отметить, что построенные после распада Советского Союза терминал СПГ и 10 электростанций (главным образом, ГЭС) стали превентивной мерой для энергообеспечения Калининградской области в автономном режиме на случай выхода Прибалтийских республик из БРЭЛЛ или других ситуаций, в результате которых область могла бы столкнуться с угрозами энергетической безопасности.

[1] Грузовой транспорт // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Калининградской области. 04.04.2024. URL: https://39.rosstat.gov.ru/statistical_news/document/233997 (дата обращения: 31.03.2025).

Таким образом, в экономическом секторе, сфере грузоперевозок и энергетическом секторе Калининградская область столкнулась с одной из ключевых проблем, которые свойственны анклавным — проблемой доступа, которая может послужить [24], и нередко служит, источником серьезных конфликтов [11].

Калининградская область — российский форпост на Балтике в условиях военной экспансии НАТО

Одной из ключевых проблем Балтийского региона является его милитаризация, которая началась после вступления в НАТО трех Прибалтийских республик. Как уже было отмечено выше, правительства Латвии, Литвы и Эстонии обосновывали свое вступление в Североатлантический альянс «угрозой с Востока» и рассматривали свое членство в нем исключительно как возможность обеспечить собственную безопасность за счет других членов Альянса.

Постепенно это привело к появлению военных контингентов НАТО вблизи границ Российской Федерации, которые были увеличены в два раза в Литве и в десять раз в Польше после начала украинского кризиса в 2014 г.[1]

Серьезным вызовом для России также стало вступление в НАТО Швеции и Финляндии. Если говорить об их решении о вступлении в НАТО, то оно стало продолжением тех шагов, которые предпринимались ими с 2014 г. по сближению с Альянсом — их активное участие в учениях, подписание соглашений о возможности размещения войск НАТО на своей территории. Было отчетливо понятно, что Швеция и Финляндия солидаризируются с Западом и их вступление в НАТО полностью укладывается в логику развития событий в Балтийском регионе.

В итоге это привело к тому, что Балтийский регион, недавно рассматривавшийся как макрорегион активного международного сотрудничества России с зарубежными странами, создающий надежду на реализацию лозунга «Балтийское море — море мира», превратился в один из наиболее конфликтогенных регионов по периметру российских границ, где усиливается противостояние России и стран Запада [10]. Для расположенных на побережье Балтийского моря субъектов РФ в данных условиях вопросы экономической безопасности становятся все более актуальными [28].

В сложившейся ситуации обеспечить безопасность Калининградской области и ее социально-экономическое развитие можно было только путем ее военного укрепления. Ввиду этого логичными выглядят заявления как российских экспертов, утверждающих о необходимости превращения Калининградской области в военный форпост России на

[1] *Генсек* НАТО заявил об увеличении контингента в Восточной Европе в 10 раз. Forbes, April 10, 2022. URL: https://www.forbes.ru/society/461983-gensek-nato-zaavil-ob-uvelicenii-kontingenta-v-vostocnoj-evrope-v-10-raz (дата обращения: 27.02.2025).

Западе [5], так и западных, в частности Chatham House[1] о том, что военная активность России в Калининграде является ответом на расширение НАТО и направлена на сдерживание альянса в Балтийском регионе [39]. В частности, речь идет об увеличении контингентов НАТО на территории Прибалтийских государств и Польши, размещении военных баз, проведении масштабных учений, а также о создании логистической инфраструктуры в регионе Балтийского моря.

В докладах Международного центра обороны и безопасности [14] и Военного колледжа Армии США «PROJECT 1721» предлагалось увеличить присутствие в Балтийском море постоянных военно-морских групп (*SNF*) для возможности нанесения дальних ударов по российской зоне ограничения и воспрещения доступа (в терминологии НАТО *Anti-Access and Area Denial – A2/AD*) в Калининградской области, а также для обеспечения господства в Балтийском море [33]. Как позднее заявили военные аналитики К. Хердт и М. Зублич[2] в своем докладе, Соединенным Штатам, НАТО, Европейскому союзу и партнерам по Балтии следует сосредоточиться на трех морских стратегиях: гибридных операциях в серой зоне, наступательном и оборонительном минировании, а также противоракетной обороне и РЭБ [40].

Кроме того, после вступления в НАТО Финляндии и Швеции многие западные политики стали заявлять[3] о том, что Балтийское море стало «внутренним озером» Альянса, в связи с чем их главной задачей стало вытеснение России из акватории моря. Наличие у Швеции и Финляндии достаточно сильных ВМС, по сравнению с другими странами региона, по составу как военно-морских флотов, так и береговых сил, может позволить НАТО закрыть для России как Финский залив, так и Балтийское море, в том числе для судоходства между Калининградской областью и основной частью России.

В ноябре 2023 г. ВМС НАТО в составе первой постоянной группы военно-морских сил НАТО (NATO SNMG 1) и первой постоянной группы НАТО по противоминной борьбе (NATO SNMCMG1) провели учения по патрулированию и постановке минных заграждений в акватории Финского залива и Архипелагового моря. Позднее в район Финского залива для патрулирования его восточной части была направлена группа

---

[1] *О признании* иностранных и международных неправительственных организаций, деятельность которых признана нежелательной на территории Российской Федерации : решение Минюст России от 01.04.2022 г. № 448-р. URL: https://minjust.gov.ru/ru/documents/7756/ (дата обращения: 16.03.2025).

[2] *О признании* иностранных и международных неправительственных организаций, деятельность которых признана нежелательной на территории Российской Федерации : решение Минюст России от 01.07.2024 г. № 783-р. URL: https://minjust.gov.ru/ru/documents/7756/ (дата обращения: 16.03.2025).

[3] *Sweden* joins ‘Nato lake’ on Moscow’s doorstep. The Financial Times, March 08, 2024. URL: https://www.ft.com/content/c6375406-df00-4e1d-801f-9435b6a8d253 (дата обращения: 16.03.2025) ; NATO Should Weigh Halting Russian Baltic Shipping, Latvia Says. Bloomberg, October 20, 2023. URL: https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-10-20/latvia-says-nato-should-close-baltic-if-russia-harmed-pipeline (дата обращения: 16.03.2025).

из состава Объединенных экспедиционных сил (JEF) численностью до 20 кораблей из состава ВМС Великобритании, Нидерландов, Швеции и Эстонии.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в своих планах НАТО делает упор на блокаду Балтийского моря прежде всего средствами минной войны, а также на использование противокорабельных ракетных комплексов, расположенных на побережье Эстонии, Финляндии и о. Готланд [9].

Кроме того, начиная с 2014 г. в регионе Балтийского моря кратно увеличились количество и интенсивность учений, проводимых под командованием НАТО и США. В частности, в 2023 г. прошли крупнейшие учения военно-морских сил НАТО «Freezing Winds 2023», в которых приняло участие более 30 надводных и подводных кораблей различного класса и 20 самолетов и вертолетов первой постоянной группы военно-морских сил НАТО (NATO SNMG 1). В 2024 г. проведены крупнейшие с момента окончания «холодной войны» учения «Steadfast Defender 2024», которые поэтапно проводились на территории всех государств региона и участие в которых приняло более 100 тыс. военнослужащих из 33 государств НАТО.

В целях защиты национальных интересов в регионе руководство Российской Федерации приняло решение о военном усилении Калининградской области, что привело в итоге, по мнению западных военных аналитиков, к созданию зоны *A2/AD*. Это позволило, с одной стороны, сдерживать агрессивные намерения НАТО, став для командования Альянса серьезным аргументом, а с другой стороны, позволило контролировать агрессивное поведение правительств соседних с Калининградской областью государств.

В частности, в 2016 г. на территории Калининградской области были размещены противокорабельные ракетные комплексы «Бастион», расчеты которых сразу приступили к слежению за кораблями НАТО в акватории Балтийского моря. В 2018 г. были размещены оперативно-тактические ракетные комплексы «Искандер», способные поражать объекты на расстоянии до 500 км, а также зенитно-ракетные комплексы С-400. Кроме того, на территории Калининградской области был сформирован 11-й армейский корпус [22].

Учитывая географическое положение Калининградской области, все указанные выше виды вооружений способны наносить огневое поражение по целям противника на всей территории Прибалтийских государств, Польши (включая Варшаву), восточной части Германии (включая Берлин) и южной части Швеции (включая о. Готланд). При этом адекватные средства реагирования и уничтожения российских средств поражения в составе ПРО-ПВО НАТО на сегодняшний день имеются в весьма ограниченном количестве, так как большая их часть была передана Украине и уничтожена на ее территории.

Таким образом, Российская Федерация вынужденно ответила на агрессивные действия НАТО и ее отдельных государств-членов по наращиванию сил и средств вблизи российских границ, что стало ответом России для соблюдения баланса сил в Балтийском регионе.

Заключение

В настоящее время на фоне обострения политических, экономических, социальных и этнических противоречий, геополитические процессы в Балтийском регионе приобрели характер эмержентности[1] и конфликтогенности, а непредсказуемость современных политических процессов привела к турбулентности и хаотизации геополитической и военно-политической обстановки как на глобальном, так и на региональном уровне.

Геополитические события, произошедшие в последние 20 лет, привели к отмене демилитаризации и восстановлению военного потенциала на островах Балтийского моря — Борнхольме и Готланде, что может оказать существенное влияние не только на ситуацию на море, но и на возможности размещенных на них ракетных систем поражать цели на территории Калининградской области. При этом исчезновение буфера между Россией и странами НАТО привело к возникновению угроз как для расположенных в Балтийском регионе субъектов Российской Федерации (прежде всего Калининградской и Ленинградской областей и Санкт-Петербургу), так и для морских пространств.

В сложившейся ситуации необходимо учитывать, что все государства Балтийского региона, проявляя крайнюю степень антироссийских настроений, активно принимают участие в проведении санкционной политики Европейского союза. При этом попытки Литвы устроить блокаду сухопутного транзита между Калининградской областью и основной территорией России едва не привели к открытому конфликту с Российской Федерацией, что могло привести в итоге к полномасштабному региональному конфликту (с участием НАТО или без него).

Можно предположить, что ключевой задачей для США по-прежнему будет оставаться снижение возможностей России поставлять углеводородные ресурсы на европейский и мировой рынки, в том числе с использованием танкерного флота. Кроме того, санкционная политика Европейского союза и примкнувшей к нему Великобритании фактически развязали против Российской Федерации «танкерную войну» с целью воспрепятствовать трансферу российской нефти и нефтепродуктов с использованием так называемого «теневого флота». В связи с чем сохраняется угроза попыток ограничить России судоходство через акваторию Балтийского моря, а также прохода через Датские проливы под предлогом отсутствия необходимых страховок, нарушения экологических норм, повреждения подводной инфраструктуры государств региона, или под любыми другими предлогами.

---

[1] Эмержентность (или эмергентность) в качестве теории предложил американский физик Ф. Андерсон, понимая под ней следующую идею: некая система достигает определенной степени сложности, ее уже невозможно свести к множеству работающих в ней элементов. В определенный момент сложность характеризует не количественные изменения в системе, а качественные. Этим снимается вопрос о зависимости сложной системы от своих базовых составляющих. Например, нельзя объяснить поведение общества, поведением каждого отдельного его члена или даже малых групп, в это общество входящих.

Необходимо также обратить на то, что блокирование железнодорожных и автомобильных перевозок в середине 2022 г., устроенное Литвой с молчаливого согласия Европейского союза под предлогом контроля исполнения его санкционной политики, является прощупыванием очередной «красной линии» в отношениях с Россией, как и последующее закрытие сухопутных пунктов пропуска Финляндией, Эстонией, Латвией и Польшей под видом борьбы с незаконной миграцией.

Кроме того, в условиях нарастающей конфронтации России с государствами региона, Европейским союзом и НАТО, санкционного противостояния и попыток организации экономической блокады значение Калининградской области как военного форпоста России будет безусловно повышаться. В связи с чем возрастает роль расположенных в Калининградской области военно-морской базы ВМС России, соединений и частей ПРО-ПВО, способных нанести поражение в случае проявления актов агрессии в отношении национальных интересов или безопасности Российской Федерации в Балтийском регионе.

Подводя итог, можно утверждать, что поскольку все государства региона входят в НАТО и Европейский союз, а антироссийская риторика стала обязательным элементом их внешней политики, то не стоит даже представлять, что какое-то из государств-членов этих организаций начнет проводить иную, отличную от современного западного курса, политику в отношении Российской Федерации. В этих условиях кратно увеличиваются риски перехода от политической или экономической конфронтации к прямому вооруженному конфликту, так как любой, даже непреднамеренный инцидент, может стать катализатором для перехода на новый уровень эскалации.

Поддержка данного исследования осуществлена на средства программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» БФУ им. И. Канта.

Список литературы

1. *Белова А. В., Усенко А. А., Федина-Журбина И. В., Белов Н. С.* Трансграничное сотрудничество Калининградской области в условиях геополитической трансформации // Сервис в России и за рубежом. 2024. Т. 18, №4. С. 36—43. doi: 10.5281/zenodo.14511111.

2. *Бразаускас А.* Пять лет президента: События, воспоминания, мысли. М., 2002.

3. *Вардомский Л. Б.* Между геополитикой и экономикой: вопросы развития международного транзита в СССР и России // Геоэкономика энергетики. 2022. Т. 13, №1. С. 24—42. doi: 10.48137/2687-0703_2021_13_1_24.

4. *Виленская Н. И., Божков Н. И.* Состояние транспортного комплекса Калининградской области в условиях геополитической нестабильности // Геополитика и геодинамика регионов. 2023. Т. 9, вып. 2. С. 213—231. EDN: AKGXER.

5. *Воловой В., Бартошина И. А.* Система безопасности в Балтийском регионе как проекция глобального противостояния России и США // Балтийский регион. 2017. №1. С. 27—43. doi: 10.5922/2074-9848-2017-1-2.

6. *Воротников В.В.* 25 лет независимости государств Балтии: из Советского в Европейский Союз // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2016. №9 (5). С. 7—23. doi: 10.23932/2542-0240-2016-9-5-7-23.

7. *Грибанова Г.И., Косов Ю.В.* Политика НАТО на Балтике — цели и приоритеты // Балтийский регион. 2018 Т. 10, №1. С. 56—72. doi: 10.5922/2074-9848-2018-1-4.

8. *Гуменюк И.С.* Мониторинг и анализ обеспечения транспортной безопасности на калининградском направлении : информационно-аналитический доклад. Калининград, 2024. EDN: AFOWFM.

9. *Зверев Ю.М.* НАТО бросает ракетный вызов России на Балтийском море: чья возьмет? // Евразия.Эксперт. 2024. URL: https://eurasia.expert/nato-brosaet-raketnyy-vyzov-rossii-na-baltiyskom-more/ (дата обращения: 26.03.2025).

10. *Зверев Ю.М.* Три российских региона на Балтике в условиях противостояния России и Запада // Балтийский регион. 2023. Т. 15, №4. С. 24—41. doi: 10.5922/2079-8555-2023-4-2.

11. *Зверев Ю.М., Клемешев А.П.* Проблемы анклавных территорий // Регион сотрудничества. 2004. №14. С. 25—32.

12. *Йокубайтис А., Лопата Р.* Геополитическая трансформация Калининградской области // Балтийский регион. 2010. №2 (4). С. 28—43. doi: 10.5922/2074-9848-2010-2-3.

13. *Каледин Н.В., Корнеевец В.С.* Трансграничное сотрудничество в Балтийском регионе — к новым пространственным формам международной экономической интеграции // Вестник Санкт-Петербургского Университета. 2007. Вып. 3. С. 80—90.

14. *Кларк У., Луйк Ю., Раммс Э., Ширрефф Р.* Заполняя балтийский пробел НАТО. ICDS — International Centre for Defence and Security. 2016. URL: https://icds.ee/wp-content/uploads/2016/ICDS_Report-Closing_NATO_s_Baltic_Gap-RUS.pdf (дата обращения: 26.03.2025).

15. *Клемешев А.П.* Эксклавность как фактор развития Калининградской области // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Гуманитарные и естественные науки. 2005. №3. С. 34—41. EDN: HVRIDN.

16. *Клемешев А.П.* Российский эксклав на Балтике: эволюция эксклавности и пути ее преодоления // Балтийский регион. 2009. №4. С. 102—115. EDN: KYPVIB.

17. *Клемешев А.П., Ворожеина Я.А.* Калининградская область в условиях изменения геополитической ситуации в Европе // Проблемы национальной стратегии. 2022. №4. С. 244—255. doi: 10.52311/2079-3359_2022_4_243.

18. *Колосов В., Бородулина Н.* Геополитический дискурс и отношения между Россией и странами Балтии // Мировая экономика и международные отношения. 2007. №9. С. 97—106. EDN: IBOSHB.

19. *Кувалин Д.Б., Щербинин Ю.А.* Адаптация экономики российских регионов к разрыву отношений с Европой (на примере портов Балтийского моря) // Балтийский регион. 2023. Т. 15, №4. С. 62—78. doi: 10.5922/2079-8555-2023-4-4.

20. *Лачининский С.С.* Геополитические риски и перспективы отношений России и Запада на Балтике // Псковский регионологический журнал. 2021. Т. 17, №4. С. 3—15. doi: 10.37490/S221979310017062-1.

21. *Лебедев А.С.* Санкции против «Северного потока-2». Экономические последствия // Современная Европа. 2020. №5. С. 173—181. doi: http://dx.doi.org/10.15211/soveurope52020173181.

22. *Зверев Ю.М.* НАТО вход воспрещен. «Искандеры» в Калининградской области — это только лишь часть стратегии России // Евразия Эксперт. 20 декабря 2017. URL: https://eurasia.expert/nato-vkhod-vospreshchen-iskandery-v-kaliningradskoy-oblasti-eto-lish-chast-strategii-rossii/ (дата обращения: 01.03.2025).

23. *Мозель Т.А.* Балтия, Россия и Запад в поисках модели безопасности в Европе. М., 2016.

24. *Нис С.* Калининград — не единственный анклав // Pro et Contra. 2003. Т. 8, №1. С. 90—109.

25. *Пальмовский Т.* Стратегия Европейского союза для региона Балтийского моря и ее реализация // Балтийский регион. 2021. Т. 13, №1. С. 138—152. doi: 10.5922/2079-8555-2021-1-8.

26. *Пономаренко И.А.* Экономико-географические факторы и тенденции развития морских перевозок на примере Балтийского региона // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7, №7. С. 571—584. doi: 10.55186/2413046X_2022_7_7_427.

27. *Разумовская Е.А., Князев П.П., Мурашова А.В., Сергеев В.В.* Северный поток-2 как инвестиционный международный проект // Журнал прикладных исследований. 2021. №6-7. С. 636—646. doi: 10.47576/2712-7516_2021_6_7_636.

28. *Рябинина О.К.* Геополитическая ситуация в Балтийском регионе: современные тенденции // Вестник дипломатической академии МИД России. Россия и мир. 2021. №4 (34). С. 174—184. EDN: QZVQWU.

29. *Себенцов А.Б., Зотова М.В.* Калининградская область: вызовы эксклавности и пути ее возможной компенсации // Балтийский регион. 2021. №1. С. 89—106. doi: 10.5922/2074-9848-2018-1-6.

30. *Сергунин А.А.* Социетальная безопасность в регионе Балтийского моря: российская перспектива // Балтийский регион. 2021. Т. 13, №3. С. 4—24. doi: 10.5922/2079-8555-2021-3-1.

31. *Смирнов В.А.* Проблемы выбора внешнеполитической ниши малыми государствами (на примере стран Балтии) // Вестник МГИМО-Университета. 2015. №6. С. 135—145. EDN: VHIXNR.

32. *Смирнов П.Е.* Вступление Финляндии и Швеции в НАТО: геополитические последствия для позиционирования России в Балтийском регионе // Балтийский регион. 2023. Т. 15, №4. С. 42—61. doi: 10.5922/2079-8555-2023-4-3.

33. *Стрюковатый В.В.* Геостратегическое положение России на Балтике как угроза морской блокады в современных условиях // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2024. №1. С. 57—75. doi: 10.5922/gikbfu-2024-1-4.

34. *Федоров Г.М.* Калининградская дилемма: «коридор развития» или двойная периферия? Геополитический фактор российского эксклава на Балтике // Балтийский регион. 2010. №2. С. 5—15. EDN: MMAZZZ.

35. *Федоров Г.М.* Три стратегии развития Калининградской области (1991—2018 годы) // Вестник Балтийского Федерального Университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2019. №3. С. 5—19.

36. *Юшков И.* Борьба за «Северный поток-2»: интересы игроков. Российский Совет по международным делам. 2018. URL: https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/borba-za-severnyy-potok-2-interesy-igrokov/ (дата обращения: 01.03.2025).

37. *Antsu G.* Estonia's security policy options 1991—1999: master thesis. University of Tartu, 2000.

38. *Miniotaite A.* The Security Policy of Lithuania and the "Integration Dilemma". NATO Individual Democratic Institutions Research Fellowship Report. Vilnius, 1999.

39. *Giles K.* Russia's Military Modernization: A Challenge for NATO. London, Chatham House. 2017. URL: https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/2016-03-russia-new-tools-giles.pdf (дата обращения: 16.03.2025).

40. *Herdt C., Zublic M.* Baltic Conflict: Russia's Goal to Distract NATO? Center for Strategic and International Studies (CSIS). 2022. URL: https://www.csis.org/analysis/baltic-conflict-russias-goal-distract-nato (дата обращения: 16.03.2025).

41. *Klein R., Lundqvist S., Sumangil E.* Baltic Left of Bang: The Role of NATO with Partners in Denial-Based Deterrence. Washington, DC, 2019.

Об авторе

Владимир Валерьевич Стрюковатый — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

ORCID: 0009-0006-1242-091X

E-mail: v.v.stryukovatyy@yandex.ru

SPIN-код: 3941-7775

V.V. Stryukovatyy

KALININGRAD REGION IN THE CONTEXT OF CURRENT GEOPOLITICAL CHALLENGES: DYNAMICS AND TRENDS

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia
Received 24 October 2025
Accepted 11 December 2025
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-1

To cite this article: Stryukovatyy V.V., 2026, Kaliningrad region in the context of current geopolitical challenges: dynamics and trends, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 5—24. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-1.

The Kaliningrad region, as a Russian exclave located at the center of the Baltic region, has found itself at the epicenter of geopolitical confrontation between the Russian Federation and the collective West. With the launch of the Special Military Operation in Ukraine, confrontation with NATO, the European Union, and regional states has reached its peak. The geographical position of the Kaliningrad region has generated threats of transport and economic blockade, while simultaneously enhancing its military and strategic significance as a Russian outpost. The article analyzes the key challenges facing the Kaliningrad region, including its exclave status, sanctions pressure, restrictions on cargo transit through Lithuania, the militarization of the region, and threats of a maritime blockade. It examines the evolution of policies pursued by the Baltic states aimed at isolating the region, as well as Russia's response measures, including military and political actions. Particular attention is paid to the region's economic adaptation, including the development of maritime transport, energy security, and the search for new logistics routes under the impact of sanctions. The growing importance of the Baltic Sea as a key transport corridor is emphasized. The study demonstrates that, amid escalating confrontation *with the West, the Kaliningrad region is compelled to combine the strengthening of its defense potential with the search for sustainable economic development models that make it possible to minimize risks and maintain control over key transport routes.*

Keywords: the Kaliningrad region, Baltic region, geopolitical challenges, security, development, exclave, crisis

The author

Vladimir V. Stryukovatyy, PhD Student, Immanuil Kant Baltic Federal University, Russia.

ORCID: 0009-0006-1242-091X

E-mail: v. v.stryukovatyy@yandex.ru

SPIN code: 3941-7775

УДК 911.7

Д. Н. Чертков

ТРАНСПОРТНАЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ОПОРНЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ ФЕДЕРАЛЬНОЙ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
Поступила в редакцию 30.06.2025 г.
Принята к публикации 19.09.2025 г.
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-2

Для цитирования: *Чертков Д. Н.* Транспортная обеспеченность опорных населенных пунктов в контексте развития федеральной автодорожной сети // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2026. №1. С. 25—40. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-2.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью сокращения межрегиональных диспропорций, закрепленной в документах стратегического планирования. Рассматривается обеспеченность опорных населенных пунктов Северо-Западного федерального округа федеральными автомобильными дорогами в контексте формирования устойчивой социально-экономической системы. Методологической основой работы стали сравнительно-географический метод и методы геоинформационного анализа, включающие построение буферных зон. В результате анализа показана существенная пространственная неоднородность транспортной сети округа, обусловленная историческими и природно-климатическими факторами, и выявлены территории с низкой обеспеченностью, требующие дополнительных мер стратегического планирования. Установлено, что, хотя федеральные магистрали и формируют транспортный каркас, обеспечивая связность, их высокая плотность и интеграция характерны преимущественно для юго-западных регионов округа. Подтверждена гипотеза о возможности использования федеральных дорог в качестве векторов социально-экономического развития территорий.

Ключевые слова: Северо-Западный федеральный округ, транспортная обеспеченность, федеральные автомобильные дороги, опорные населенные пункты, пространственное развитие, геоинформационный анализ, транспортный каркас

Введение

Согласно Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 г. с прогнозом до 2036 г., одним из ключевых приоритетов является достижение эффективности использования ресурсов за счет обеспечения максимальной загрузки существующих, а также планирования создания новых объектов инфраструктуры на основе их приоритизации с учетом оценки социально-экономических эффектов [21]. В этом контексте транспортные магистрали выступают активными организаторами пространства, реализуя районообразующие функции через формирование экономических осей. Кроме того, ключевым элементом освоенной территории выступает каркас, объединяющий города и дороги [2], который выполняет структурирующую, интегрирующую и морфологическую функции транспортная инфраструктура, бесспорно, имеет системное влияние на пространственную организацию территории размещения.

Современные исследования подтверждают, что транспортная инфраструктура оказывает значимое воздействие на социальную мобильность и демографическую стабильность малых и средних населенных пунктов. В частности, транспортная доступность является ключевым фактором для уменьшения депопуляции и повышения качества жизни в приграничных территориях, что требует интеграции транспортных проектов с развитием социальной инфраструктуры, включая образование и здравоохранение. Кроме того, подчеркивается важность комплексного подхода к оценке транспортной доступности, учитывающего не только физическую близость объектов, но и качество транспортных услуг, социальные барьеры и временные параметры передвижения [4; 13; 16; 17; 24].

Цель настоящего исследования — определение транспортной обеспеченности опорных населенных пунктов СЗФО федеральными автомобильными дорогами в контексте формирования устойчивой экономико-социальной системы. Кроме того, учитываются современные вызовы [6; 24; 26] территориального развития, включая демографические сдвиги и потребности в интеграции отдаленных районов, что требует адаптации федеральных дорожных стратегий с учетом специфики СЗФО и эффективного использования их потенциала как векторов социально-экономического развития [15]. Для этого была поставлена гипотеза о возможности использования федеральных магистралей в качестве векторов социально-экономического развития территорий. В рамках исследования решались следующие задачи:

- анализ Концепции пространственного развития на предмет определения опорных населенных пунктов СЗФО и целей их развития с составлением пространственного геоинформационного слоя;
- анализ федеральных дорог СЗФО с целью составления пространственного геоинформационного слоя;
- визуализация и количественный анализ данных с использованием геоинформационных систем;
- ГИС-анализ сформированных слоев через построение буферных зон для оценки обеспеченности федеральной дорожной инфраструктуры опорных населенных пунктов.

Материалы и методы исследования

Для корректного анализа необходимо разграничить ключевые понятия, используемые в транспортной географии. В рамках настоящей работы под транспортной обеспеченностью понимается наличие объектов федеральной автодорожной инфраструктуры в пределах нормативной пространственно-временной близости от опорных населенных пунктов. Транспортная доступность трактуется как возможность для населения участвовать в различных видах деятельности за пределами своего населенного пункта, что напрямую зависит от времени и удобства передвижения до магистральной сети [2]. Транспортная связанность, в свою очередь, характеризует топологическую структуру дорожной сети, то есть степень интеграции населенных пунктов между собой через транспортные коридоры [15]. Транспортная освоенность — комплексная характеристика, отражающая степень и конфигурацию проникновения транспортных путей на территорию [21; 23].

Для решения поставленных задач применена совокупность методов, основными из которых являются сравнительно-географический метод и метод пространственного ГИС-анализа на предмет определения соответствия геоинформационных слоев. Семантические данные для построения векторных моделей определены посредством обращения к официальным нормативно-статистическим источникам. Их обработка проводилась с применением программного обеспечения MapInfo 12.5.

Для анализа пространственного соответствия опорной сети автомобильных дорог и населенных пунктов СЗФО применен метод геоинформационного анализа. В качестве исходных материалов использовались топографические карты и космические снимки kosmosnimki.ru. Данные о федеральных автомобильных дорогах и опорных населенных пунктах получены из открытых источников Росстата и Федеральной геоинформационной системы «Система контроля дорожных фондов». Предобработка включала геопривязку растровых слоев, векторизацию дорожной сети и опорных населенных пунктов, а также создание атрибутивных таблиц.

Пространственный анализ выполнен методом построения буферных зон. Определены зоны доступности ключевых магистралей, что позволило оценить охват опорных городов автодорожной инфраструктурой. Для выявления «белых пятен» применялся изохронный анализ с учетом скоростных ограничений и категорий дорог. Для визуализации пространственных закономерностей использовалось тематическое картографирование: по регионам СЗФО построены карты плотности населенных пунктов и густоты дорожной сети.

Результаты

Пространственной стратегией Российской Федерации определено, что для обеспечения устойчивого и сбалансированного развития, направленного на сокращение межрегиональных различий в уровне и качестве жизни населения, ускорение темпов экономического роста и технологического развития, а также на обеспечение национальной безопасности страны, необходимо в первую очередь преодолеть инфраструктурные ограничения федерального значения и повысить доступность и качество магистральной инфраструктуры. Развитие автодорожного транспорта регламентируется транспортными стратегиями и не всегда учитывает цели пространственного развития, так как в настоящий момент сконцентрировано вокруг поддержания развитых и развивающихся территорий. Включение в качестве роли федеральных направлений возможности формировать векторы социально-экономического развития территорий увязывает планы ведомств между собой и повышает их пространственную интеграцию. Для оценки обеспеченности территорий и взаимосвязанности стратегий проведен геоинформационный анализ взаимного развития их ключевых объектов.

Следует отметить, что перечень опорных населенных пунктов СЗФО, как и в целом по России, включает значительную долю малых городов, поселков городского типа и сельских населенных пунктов [15]. Для таких ОНП ключевую роль в обеспечении повседневной мобильности населения и хозяйственной деятельности зачастую играет сеть автомобильных дорог регионального и местного значения [18].

В рамках настоящего исследования фокус анализа сознательно ограничен федеральными автомобильными дорогами. Данный выбор обусловлен тем, что именно федеральные трассы формируют макрорегиональный транспортный каркас, определяют основные векторы экономического развития, обеспечивают межрегиональную связанность и являются ключевыми элементами в реализации Стратегии пространственного развития РФ. Таким образом, оценка обеспеченности ОНП именно этой категорией дорог позволяет выявить стратегические диспропорции в развитии транспортной инфраструктуры макрорегиона.

В целях анализа предварительно стоит разделить такие объекты по группам для формирования геоинформационных слоев. Это необходимо ввиду разрозненности регионов СЗФО по своим социально-экономическим и физико-географическим характеристикам, а также ввиду специфики размещения автомобильных дорог. На транспортную доступность, помимо обозначенного влияют и численность населения рассматриваемого и соседних регионов и их географическое местоположение. Строительство и реконструкция автомобильных магистралей связаны с крупными инвестиционными затратами, которые в сложных условиях, имеют превалирующее значение над социально-экономическим эффектом, а следовательно, увеличивают комфортное расстояние до магистралей для менее развитых населенных пунктов. Напротив, общая тенденция к уменьшению буферной зоны такого расстояния на фоне автомобилизации диктуется стремлением населения и бизнеса к повышению качества жизни и уменьшению транспортных издержек. Подтверждение указанного тезиса продиктовано также исследованиями [3; 4; 11; 29].

Для проведения дифференцированного анализа регионы СЗФО были разделены на группы. В основу классификации положен характер формирования и пространственная структура опорной федеральной автодорожной сети, которая отражает как исторические, так и современные социально-экономические и физико-географические условия освоения территории. Такой подход позволяет сгруппировать регионы по типу их транспортного каркаса, что напрямую связано с целью исследования. Учитывались такие параметры, как плотность сети, ее конфигурация (радиально-кольцевая, линейная, сетчатая) и выполняемые ею функции (агломерационные, транзитные, ресурсообеспечивающие). Результаты классификации представлены в таблице.

**Группы регионов СЗФО
и их характеристики, сформированные для ГИС-анализа**

Группа	Регион	Тип транспортного каркаса и его характеристики	Социально-экономические и физико-географические условия
Высокоразвитые агломерационно-транзитные центры	Санкт-Петербург, Ленинградская область, Калининградская область	Радиально-кольцевой и плотный сетевой. Высокая плотность и связанность сети, ориентация на обслуживание агломерации и обеспечение международных транзитных потоков	Высокий уровень урбанизации, диверсифицированная экономика, приморское положение, благоприятный климат
Регионы очагового освоения с линейной структурой сети	Ненецкий АО, Мурманская область	Линейно-очаговый. Сеть представлена отдельными коридорами, связывающими центры добычи и порты с опорной сетью	Ресурсно-ориентированная экономика, очаговое расселение, экстремальные природные условия, удаленность от центра
Транзитные регионы с разреженной дорожной сетью	Республика Карелия, Республика Коми, Архангельская область	Магистрально-осевой. Каркас сформирован несколькими транзитными магистралями. Низкая плотность сети, большие разрывы в покрытии территории	Смешанная экономика (лесопромышленный комплекс, добыча), низкая плотность населения, суровые зимы
Регионы с исторически сложившимся сетчатым каркасом	Вологодская, Новгородская, Псковская области	Сетчатый (прямоугольно-веерный). Исторически сложившаяся, относительно плотная сеть, обеспечивающая как транзит между агломерациями, так и внутренние связи	Аграрно-промышленные и старопромышленные регионы, расположенные в межагломерационном пространстве. Равнинный рельеф

Исходя из положений стратегии[1], сформирован и отражен на карте макрорегиона список из 206 опорных населенных пунктов. Основа-

[1] *Стратегия* пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 13.03.2019 г. №207-р. URL: http://static.government.ru/media/files/UVAlqUtT08o60RktoOXl22JjAe7irNxc.pdf (дата обращения: 10.03.2025).

нием включения является соответствие одному или нескольким критериям. Независимо от объема соответствия критериям, важнейшая цель — уменьшение социально-экономического неравенства регионов, в рамках обеспечения пространственного развития и межгосударственного партнерства. Так, совместное развитие трансграничной транспортной инфраструктуры, устранение барьеров и формирование международных транспортных коридоров будут способствовать увеличению товарооборота и в перспективе приведут к созданию новых альтернативных маршрутов торговли [25]. Доказано, что даже транзитный статус направлений формирует положительную среду для развития районов размещения автомобильных дорог [21], что при участии государственного управления и формирования портфеля ГЧП позволит увести такие территории от «маргинальной освоенности» [15; 21] к соблюдению целей пространственного развития.

Собранные данные представлены в виде картографического изображения на рисунке 1.

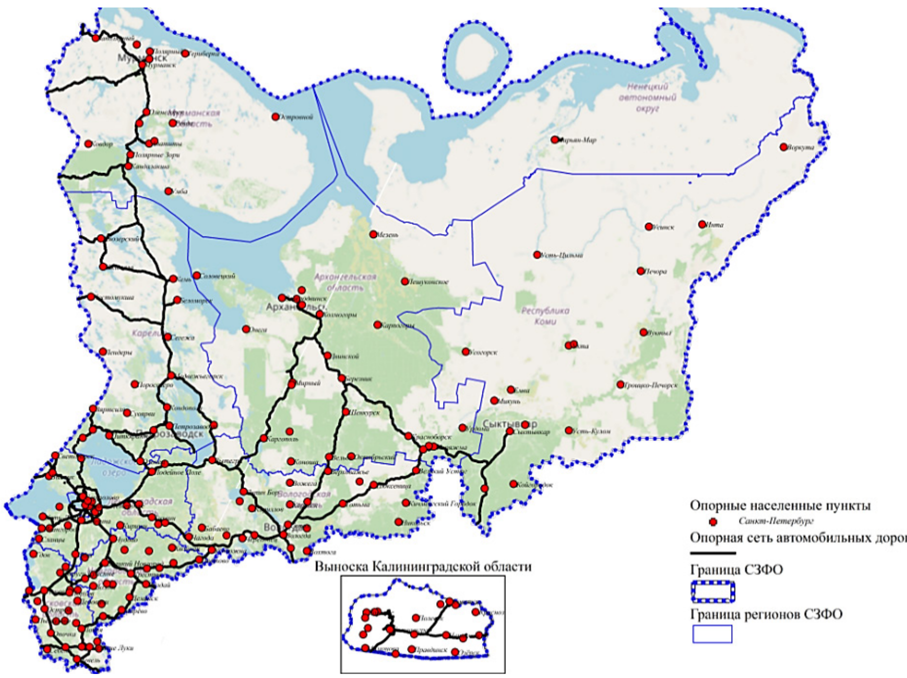


Рис. 1. Картографическое отображение обеспеченности опорных населенных пунктов федеральными автомобильными дорогами

Геоинформационный анализ позволил выявить преимущественное размещение опорных населенных пунктов вдоль ключевых транспортных коридоров. Транспортная инфраструктура Ленинградской, Псковской и Новгородской областей характеризуется высокой плотностью автомобильных дорог. Это связано с историческим развитием транспортной сети [1], высокой плотностью населения, значительным уровнем хозяйственной освоенности территории и наличием крупного экономического центра. В юго-западной части СЗФО ярко выражена радиально-кольцевая структура дорожной сети, что обеспечивает высокую связность между населенными пунктами, удобный доступ к федеральным трассам и выход к международным транспортным коридорам.

По мере продвижения на восток и северо-восток округа плотность дорог резко снижается, что отражает объективные природно-климатические ограничения, низкую плотность населения и слабую экономическую освоенность территорий. Здесь автомобильные дороги имеют преимущественно линейную структуру и соединяют между собой либо отдельные населенные пункты, либо важнейшие логистические узлы с федеральной сетью. Опорные населенные пункты, расположенные вдоль этих дорог, формируют своеобразный «каркас» транспортной доступности северных и восточных районов округа [3].

Схема наглядно демонстрирует, что основные транспортные потоки сосредоточены на юго-западе округа, вблизи крупных промышленных и административных центров, а также вдоль федеральных трасс. Такая структура полностью соответствует современным положениям Транспортной стратегии[1]. Доказано, что улучшение автодорожной инфраструктуры способствует сохранению поселенческой структуры и развитию хозяйственной деятельности [20]. В условиях центральной части СЗФО дорожная сеть обеспечивает экономическую активность даже в малых и средних населенных пунктах. В то же время на северо-востоке округа, как отмечено в исследовании [15], низкая плотность автомобильных дорог и слабая транспортная связность препятствуют эффективному освоению территории и ограничивают экономические возможности местных сообществ, что не обеспечивает соблюдения целей стратегии пространственного развития [30].

В условиях современного пространственного развития территорий СЗФО особую значимость приобретает междисциплинарное понимание транспортной инфраструктуры как неотъемлемого фактора социально-экономического благополучия регионов. Так, например, исследование [7] демонстрирует прямую взаимосвязь между качеством транспортной сети и трансформацией эпидемиологических процессов, что расширяет парадигму традиционного транспортного планирования, а также очень актуально в свете произошедших кризисных событий. Надежность и доступность транспортных коридоров существенно влияют не только на экономическую мобильность и миграционные потоки, но и на скорость распространения и локализацию болезней, формируя тем самым новые вызовы для инфраструктурного проектирования и управления территориями.

В частности, использование расширенного ГИС-анализа с учетом пространственно-временных корреляций социальных факторов служит

---

[1] *О Транспортной* стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 г. №3363-р. URL: http://static.government.ru/media/files/7cx0jh2RnvQ2dL0F2gs0zHPOX9e5vKN3.pdf (дата обращения: 10.05.2025).

методологическим ориентиром для повышения качества планирования федеральных автомобильных дорог СЗФО. Это особенно актуально для удаленных и ресурсно-ориентированных регионов, где транспортная изоляция усиливает социально-демографические и санитарно-гигиенические риски.

Интеграция подобных междисциплинарных подходов в транспортную стратегию способствует не только оптимизации логистических и экономических процессов, но и реализации концепции здорового и сбалансированного территориального развития, что является ключевым условием достижения целей национальной пространственной политики.

В качестве ключевого параметра для построения буферных зон было принято нормативное время доступности федеральной автомагистрали, которое, в соответствии с исследованиями в области транспортного планирования [5; 8; 14], не должно превышать 35 минут. Это время считается оптимальным для обеспечения эффективной маятниковой миграции и производственной логистики в опорных населенных пунктах [28].

Важно подчеркнуть, что современная транспортная география трактует доступность не только как объективную метрику времени и расстояния, но и как субъективно воспринимаемую возможность достижения целей [4; 9; 13]. Именно этот аспект объясняет дифференциацию радиусов буферных зон. В условиях плотных городских агломераций с развитой и разветвленной инфраструктурой формируются высокие социальные ожидания к скорости и комфорту передвижения. Длительное время подъезда к магистрали здесь воспринимается как серьезный недостаток, снижающий качество жизни. Напротив, в удаленных и менее освоенных регионах, где альтернативы отсутствуют, само наличие надежной федеральной трассы является ценностью, а приемлемая дальность поездки до нее значительно выше.

Исходя из этого, радиусы буферных зон были рассчитаны из единого временного норматива (35 минут), но с учетом различной средней скорости подъезда и социально приемлемого расстояния, отражающих специфику каждой группы:

— 15 км для высокоразвитых агломерационно-транзитных центров. Высокая плотность застройки и дорожной сети формирует повышенные требования к доступности. Низкая средняя скорость подъезда к трассе (~25—30 км/ч) из-за возможных заторов и ограничений делает даже небольшие расстояния времязатратными и социально неприемлемыми;

— 40 км для регионов очагового освоения. При отсутствии альтернатив и движении по менее загруженным дорогам (средняя скорость ~65—70 км/ч) такое расстояние преодолевается в пределах норматива и воспринимается как приемлемое условие для связи с «большой землей»;

— 25 км для транзитных регионов с разреженной сетью. Для данной группы принята средняя скорость ~40—45 км/ч;

— 20 км для регионов с исторически сложившимся сетчатым каркасом. Средняя скорость движения до магистрали оценена в ~35—40 км/ч.

Таким образом, дифференциация радиусов основана не только на физической скорости передвижения, но и на социально-географических различиях в восприятии и требованиях к транспортной доступности в регионах с разным уровнем освоенности.

На основании указанного утверждения относительно федеральных магистралей, построены и нанесены на карту буферы обеспечения рассматриваемой территории федеральными автомобильными дорогами.

Рисунок 2 отражает зоны обеспечения для группы «Высокоразвитые агломерационно-транзитные центры». Пространственная структура транспортного обеспечения опорных населенных пунктов в этих регионах характеризуется стремлением расселения к федеральному центру и высокой плотностью федеральных автомобильных дорог. Расположение на пересечении транспортных коридоров формирует мощный инфраструктурный каркас и обеспечивает эффективную транспортную связность. Формирование радиально-кольцевой дорожной структуры способствует высокой интеграции опорных населенных пунктов в грузо- и пассажирооборот на макроуровне [15; 19; 26].

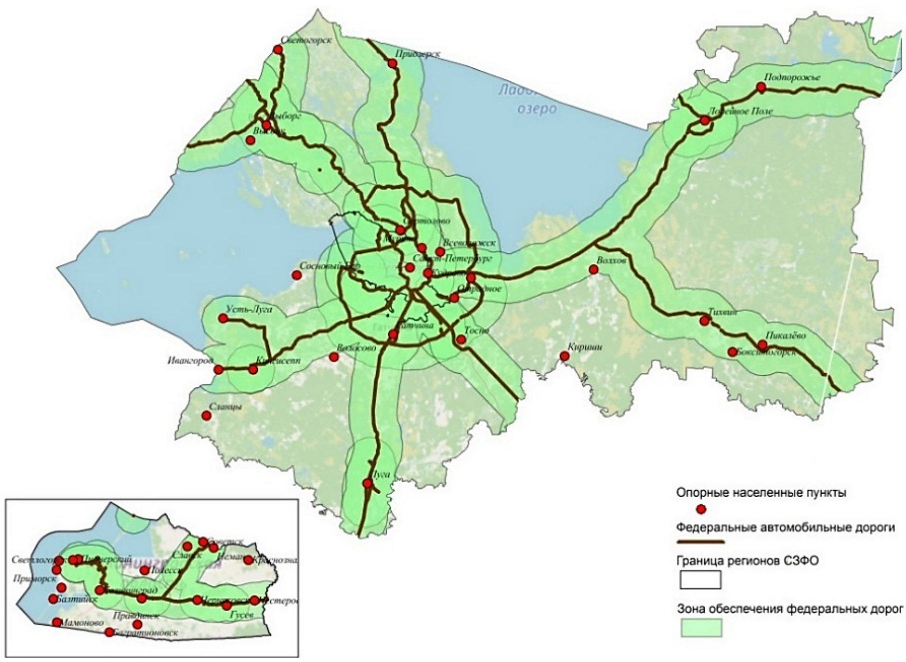


Рис. 2. Зоны обеспечения территории высокоразвитых агломерационно-транзитных центров федеральными автомобильными дорогами

Покрытие 76,3 % рассматриваемой территории буферными зонами подтверждает создание условий для стабильной логистики, межмуниципальных и межрегиональных связей, а также для привлечения инвестиций и развития промышленности.

По мере удаления от Санкт-Петербурга зоны обеспечения федеральными дорогами становятся более вытянутыми, формируя линейные транспортные коридоры, обеспечивающие межрегиональную взаимосвязанность. Опорные населенные пункты, расположенные вне зоны прямого транспортного влияния федеральных дорог, характеризуются снижением миграционной и инвестиционной привлекательности, что закономерно для восточных и северных районов СЗФО [20]. Таким образом, формируются отдельные транспортные «карманы», где транспортная доступность снижается. Обеспеченность опорных населенных пунктов возможностями для реализации потенциала автомобильного транспорта создает предпосылки для равномерного распределения хозяйственной активности, минимизации транспортных издержек и укрепления межрегиональных связей.

Представленные результаты согласуются с классическими работами по транспортной географии [21; 26; 27], где подчеркивается определяющая роль транспортных осей в организации территориальной структуры хозяйства и расселения.

Рисунок 3 демонстрирует зоны обеспечения для группы «Регионы очагового освоения с линейной структурой сети». В данном случае состав пользователей транспортной системы в первую очередь характеризуется ориентацией на обеспечение нужд добывающих предприятий; буфер покрытия федеральными дорогами расширен. Большинство опорных населенных пунктов здесь имеют доступ к магистралям для связи с региональными и федеральным центрами, что обеспечивает им хорошую транспортную доступность.

Рис. 3. Зоны обеспечения федеральными
автомобильными дорогами регионов очагового освоения
с линейной структурой сети

Вместе с тем на карте наглядно видна линейно-очаговая структура сети: значительная часть территории, особенно северные районы, остается вне зоны охвата федеральными автодорогами. Города Воркута, Усинск и Инта не имеют устойчивых транспортных связей, что подтверждается исследованиями [10; 12]. Анализ показывает, что Мурманская область имеет более развитую сеть федеральных автодорог по сравнению с Республикой Коми. Это связано с географическим положением области, наличием крупных промышленных центров и стратегическим значением региона. В то же время Республика Коми сталкивается с очевидными проблемами транспортной изоляции северных районов.

Рисунок 4 представляет зоны обеспечения для группы «Транзитные регионы с разреженной дорожной сетью». Транспортная инфраструктура там играет ключевую роль в обеспечении социально-экономического развития опорных населенных пунктов. Как видно на карте, транспортная система представлена транзитными магистралями и формирует разрозненный, веерный каркас, что является отличительной чертой данной группы.

Рис. 4. Зоны обеспечения федеральными автомобильными дорогами транзитных регионов с разреженной дорожной сетью

Федеральная дорожная система в значительной степени модернизирована, однако плотность автомобильных дорог с твердым покрытием невысока (48 км на 1000 км²), что ниже среднероссийского уровня. Вследствие этого обеспеченность федеральными автомобильными дорогами опорных населенных пунктов в рассматриваемых регионах остается на низком уровне. Это обусловлено как историческими особенностями развития транспортной сети, так и текущими проблемами финансирования и содержания инфраструктуры.

Рисунок 5 представляет зоны обеспечения для группы «Регионы с исторически сложившимся сетчатым каркасом». Исследования подчеркивают, что транспортная освоенность территорий определяется не только наличием транспортных магистралей, но и их конфигурацией, степенью внутренней связности и проницаемости территории [15]. Сеть федеральных дорог в этих регионах исторически сформирована как прямоугольно-веерный каркас. Подобная структура обеспечивает меньше половины опорных населенных пунктов, что обосновывается структурой их хозяйственной деятельности. Несмотря на характерную развитость транспортной сети, в рассматриваемых территориях зоны «маргинальной» освоенности представлены в первую очередь объектами дорожного сервиса низкого качества.

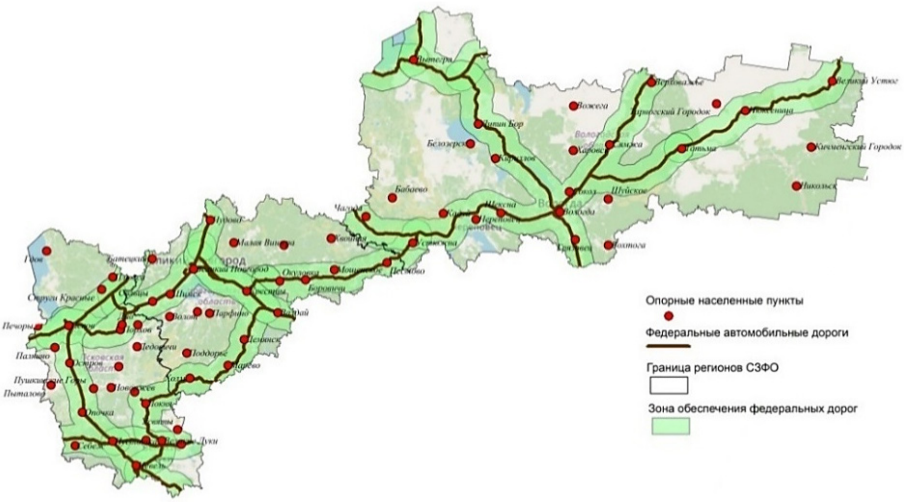


Рис. 5. Зоны обеспечения федеральными автомобильными дорогами регионов с исторически сложившимся сетчатым каркасом

Выводы

Проведенное исследование транспортной обеспеченности опорных населенных пунктов СЗФО подтвердило существенную территориальную дифференциацию. На основе анализа пространственной организации федеральной автодорожной сети было выделено четыре основных типа транспортного каркаса: высокоинтегрированный агломерационно-транзитный, линейно-очаговый в регионах освоения ресурсов, магистрально-осевой в транзитных регионах и исторически сложившийся сетчатый.

В частности, северные и северо-восточные территории округа характеризуются низкой плотностью транспортной сети, линейной структурой дорожных направлений и значительными зонами транспортной изоляции. Наличие крупных ресурсных центров в условиях экстремального климата требует особого подхода к развитию транспортной инфраструктуры, учитывающего не только экономическую целесообразность, но и социальную значимость обеспечения доступности удаленных населенных пунктов.

Анализ выявил ряд несоответствий между текущим состоянием инфраструктуры и целями стратегического планирования. Так, цели стратегии пространственного развития на территории рассматриваемых регионов (в частности, транзитных с разреженной сетью) не выполняются. Создание векторного направления по территории Республики Коми позволило бы укрепить транспортный каркас и связать населенные пункты, формирующие промышленную основу СЗФО. Развитие северных опорных населенных пунктов замедленно, в том числе из-за отсутствия устойчивых транспортных связей [12]. При этом даже для высокоразвитых территорий стратегией не предусмотрено развитие автомобильных направлений в отдаленных районах, что показывает разногласия в стратегиях развития транспорта и населенных пунктов.

Классификация регионов по типу сложившегося транспортного каркаса позволила уточнить параметры транспортной доступности и построить буферные зоны оптимального охвата федеральными автодорогами.

Подтверждена гипотеза о том, что федеральные автомобильные дороги могут выступать не только инфраструктурными элементами, но и векторами социально-экономического развития, формируя предпосылки для уменьшения территориальных диспропорций, повышения инвестиционной привлекательности и ускорения хозяйственного освоения отдаленных районов.

Особое значение приобретает взаимосвязанное развитие транспортной инфраструктуры и системы опорных населенных пунктов. Эффективное территориальное развитие возможно лишь при синхронизации планов строительства и модернизации транспортных коридоров с системным совершенствованием сети опорных и промежуточных населенных пунктов. Отсутствие согласованности между стратегиями [22] приводит к нарушению связности пространства и снижению эффективности государственных инвестиций.

В частности, важным аспектом устойчивого развития приграничных районов является улучшение приграничных транспортных связей. Однако, в условиях геополитической напряженности, следует рассматривать иные варианты усиления роста приграничного движения, в целях поддержания целей территориального развития, туризма и повышения мобильности населения. Как пример стоит рассмотреть стремительный прогресс приграничных населенных пунктов Псковской области (Печоры, Ивангород), которые, принимая возрастающие туристические потоки, формируют новую качественную инфраструктуру для жизни. Однако транспортная сеть в данном случае не успевает за социально-экономическим эффектом, замедляя его динамику.

Помимо традиционного развития транспортной сети, стратегические программы должны включать модернизацию IT-инфраструктуры на дорогах, внедрение интеллектуальных транспортных систем и развитие механизмов государственно-частного партнерства. На фоне непрекращающейся автомобилизации в урбанизированных районах следует рассмотреть возможность развития «зеленых» транспортных коридоров, включающих использование экологически чистых видов транспорта и внедрение инфраструктуры для электромобилей. Эти меры снижают углеродный след транспортного комплекса, что становится одним из приоритетных направлений в региональных планах устойчивого развития.

Список литературы

1. *Баранский Н.Н.* Экономическая география СССР: обзор по областям Госплана. М. ; Л., 1927.

2. *Баранский Н.Н.* Избранные труды. Становление советской экономической географии. М., 1929.

3. *Вызовы* и политика пространственного развития России в XXI веке / ред. В.М. Котляков, А.Н. Швецов, О.Б. Глезер. М., 2020. 365 с.

4. *Геурс К.Т. ван Вее Б.* Оценка доступности стратегий землепользования и транспорта: обзор и направления исследований // Журнал транспортной географии. 2013. Т. 24. С. 24—34.

5. *Дабиев Д.Ф., Дабиева У.М.* Оценка транспортной инфраструктуры макрорегионов России // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. №11-2. С. 283—284. EDN: UMALLP.

6. *Дементьев А.В., Изряднова О.И., Реус А.Г.* Пристяжные экономики. Автомобильный транспорт и дорожное хозяйство в транспортном комплексе Российской Федерации // Российское предпринимательство. 2004. №1. С. 65—70. EDN: HUARIH.

7. *Донченко В.В.* Понятие доступности в транспортном планировании: анализ современных зарубежных подходов // Научный вестник автомобильного транспорта. 2022. №3. С. 5—13. EDN: UBHDJC.

8. *Каленицкий О.А., Карама Л.Л.* Стратегия пространственного развития Российской Федерации: проблемы и реалии // Вестник Калининградского филиала Санкт-Петербургского университета МВД России. 2021. №4 (66). С. 85—89. EDN: YRXJYQ.

9. *Капский Д.В.* Транспортные передвижения для построения сети городского пассажирского транспорта и транспортной системы в целом // Вестник Белорусско-Российского университета. 2022. №1 (74). С. 17—30. doi: 10.53078/20778481_2022_1_17.

10. *Кудревич А.Ю.* Транспортная доступность объектов туристского интереса Мурманской области // Российская Арктика. 2024. Т. 6, №2. С. 5—19. doi: 10.24412/2658-42552024-2-05-19.

11. *Лавриненко П.А., Ромашина А.А., Степанов П.С., Чистяков П.А.* Транспортная доступность как индикатор развития региона // Проблемы прогнозирования. 2019. №6. С. 136—146. EDN: ECPMCF.

12. *Лаженцев В.Н.* Экономико-географические аспекты развития Севера России. Сыктывкар, 2018.

13. *Литман Т.* Оценка доступности в транспортном планировании: измерение возможностей людей достигать необходимых товаров, услуг, видов деятельности и пунктов назначения. 2025. URL: https://vtpi.org/access.pdf (дата обращения: 27.04.2024).

14. *Лосин Л.А., Солодилов В.В., Ляпунова Г.П.* Административно-территориальные преобразования и формирование локальных центров расселения на территории Санкт-Петербургской городской агломерации // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2020. №2 (61). С. 33—46. EDN: DRUSTI.

15. *Хуснуллин М.* Перечень опорных населенных пунктов более чем наполовину состоит из малых городов и сел. 2025. URL: http://government.ru/news/54893/ (дата обращения: 12.09.2025).

16. *Неретин А.С., Зотова М.В., Ломакина А.И., Тархов С.А.* Транспортная связность и освоенность восточных регионов России // Известия РАН. Серия географическая. 2019. №6. С. 35—52. doi: 10.31857/S2587-55662019635-52.

17. *Нефедова Т. Г.* Факторы и тенденции изменения сельского расселения в России // Социально-экономическая география. Вестник Ассоциации российских географов-обществоведов. 2019. №7. С. 1—12. EDN: OTZFVP.

18. *Огурцов А. Н., Дмитриев В. В., Каледин Н. В.* Пространственно-временной анализ роли социальных детерминант общественного здоровья в распространении COVID-19 в Северо-Западном федеральном округе // InterCarto. InterGIS. 2024. Т. 30, ч. 1. С. 128—144. doi: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-128-144.

19. *Родриг Ю. П.* География транспортных систем. URL: https://transportgeography.org/ (дата обращения: 27.04.2024).

20. *Каледин Н. В., Фелисеева А. А.* Санкционная геополитика как фактор трансграничного сотрудничества // Балтийский регион — регион сотрудничества : материалы V междунар. науч.-практ. конф. Калининград, 2021. Т. 5. С. 29—35. EDN: UPXVML.

21. *Сосенков Ф. С.* Транспортная малодоступность региона как предпосылка сепаратизма: проблема анклава и пути ее нормативно-правового регулирования // Научные проблемы водного транспорта. 2013. №36. С. 124—128. EDN: SOAWDR.

22. *Стратегия* пространственного развития Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства РФ от 13.12.2019 г. №3086-р. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201912200013 (дата обращения: 15.06.2025).

23. *Тархов С. А.* Транспортная освоенность территории // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2018. №2. С. 3—9. EDN: YUUDFZ.

24. *Трейвиш А. И.* Город, район, страна и мир : развитие России глазами страноведа. М., 2009.

25. *Федоров Г. М., Кузнецова Т. Ю.* Население и расселение Калининградской области на начало 2023 года // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2023. №2. С. 18—30. doi: 10.5922/gikbfu-2023-2-2.

26. *Чертков Д. Н.* Социально-экономические факторы функционирования и развития сети автомобильного транспорта Северо-Западного федерального округа Российской Федерации // Тренды современной географии и географического образования : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2023. С. 283—290.

27. *Чертков Д. Н.* Влияние развития сети автомобильных дорог на социально-экономические характеристики регионов Северо-Западного федерального округа Российской Федерации // География, экология, туризм: новые горизонты исследований : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной 90-летию создания факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ : в 3 т. Воронеж, 2024. Т. 2. С. 178—184. EDN: EPWOFE.

28. *Вострикова Е. О., Мешкова А. П.* Транспортно-логистическая инфраструктура как фактор устойчивого развития региона // Экономическая безопасность. 2022. Т. 5, №3. С. 1073—1092. doi: 10.18334/ecsec.5.3.114847.

29. *Яковлева С. И.* Географические функции транспорта // Вестник Тверского государственного университета. Сер.: География и геоэкология. 2022. №1 (37). С. 38—46. doi: 10.26456/2226-7719-2022-1-38-46.

30. *Gumenyuk I., Kuznetsova T., Osmolovskaya L.* Local border traffic as an efficient tool for developing cross-border cooperation // Baltic Region. 2016. Vol. 8, №1. P. 67—82. doi: 10.5922/2079-8555-2016-1-6.

Об авторах

Даниил Николаевич Чертков — асп., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия.
ORCID: 0009-0008-9603-9909
E-mail: daniilaz13@gmail.com
SPIN-код: 8428-2088

D. N. Chertkov

TRANSPORT ACCESSIBILITY OF KEY SETTLEMENTS IN THE CONTEXT OF THE FEDERAL HIGHWAY NETWORK DEVELOPMENT

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia
Received 30 June 2025
Accepted 19 September 2025
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-2

For cite this article: Chertkov D. N., 2026, Transport accessibility of key settlements in the context of the federal highway network development, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural Sciences*, №1. P. 25—40. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-2.

The relevance of the study stems from the need to reduce interregional disparities, as stipulated in strategic planning documents. The article examines the provision of federal highways for key settlement centers in the Northwestern Federal District in the context of forming a sustainable socio-economic system. The methodological framework relies on the comparative geographical method and methods of geoinformation analysis, including the construction of buffer zones. The analysis reveals significant spatial heterogeneity in the district's transport network, driven by historical and natural-climatic factors, and identifies territories with low levels of provision that require additional strategic planning measures. The study establishes that, although federal highways form the transport framework and ensure connectivity, their high density and level of integration are characteristic primarily of the southwestern regions of the district. The findings confirm the hypothesis that federal roads can serve as vectors of socio-economic development for territories.

Keywords: Northwestern Federal District, transport accessibility, federal highways, key settlements, spatial development, geoinformation analysis, transport framework

The authors

Daniil N. Chertkov, PhD student, Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.
ORCID: 0009-0008-9603-9909
E-mail: daniilaz13@gmail.com
SPIN code: 8428-2088

УДК 504.453

М.А. Смирнов, С.С. Кладова, Ю.В. Королёва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В АНАЛИЗЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АЗОТНО-ФОСФОРНОГО ЦИКЛА В БАССЕЙНЕ РЕКИ ПРЕГОЛИ

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
Поступила в редакцию 08.09.2025 г.
Принята к публикации 25.11.2025 г.
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-3

Для цитирования: *Смирнов М.А., Кладова С.С., Королёва Ю.В.* Использование математических методов в анализе и прогнозировании показателей азотно-фосфорного цикла в бассейне реки Преголи // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2026. №1. С. 41—53. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-3.

Для анализа многомерных необработанных данных состояния водных экосистем зачастую требуется применение современных аналитических инструментов, способных выявлять скрытые закономерности. Цель настоящего исследования — анализ многолетних данных мониторинга качества воды р. Преголи (г. Калининград) для выявления основных факторов, определяющих изменчивость гидрохимического режима, и оценки их временной динамики. Для анализа данных по показателям азотного и фосфорного циклов были применены методы многомерной статистики: иерархический кластерный анализ (метод Уорда), факторный анализ (метод минимальных остатков с вращением «varimax») и анализ временных рядов (LOESS-сглаживание). В результате кластерного анализа было выделено три группы наблюдений, отражающих различные периоды поступления биогенных элементов. Факторный анализ позволил идентифицировать два латентных фактора: азотную нагрузку от органических источников и соотношение органических и минеральных форм азота. Анализ временных рядов факторных оценок выявил нелинейную динамику и долгосрочные тренды в изменении качества воды. Продемонстрировано, что комплексное применение хемометрических методов является эффективным инструментом для диагностики состояния городских водных объектов, идентификации источников загрязнения и обеспечивает научную основу для разработки управленческих решений в области охраны водных ресурсов.

Ключевые слова: многомерный статистический анализ, факторный анализ, кластерный анализ, качество воды, соединения азота и фосфора

Введение

В условиях интенсивного антропогенного воздействия на окружающую среду водные экосистемы подвергаются значительной нагрузке, что приводит к ухудшению их экологического состояния. Вода является основным ресурсом, необходимым для существования всех живых организмов. На качество природных вод влияют различные факторы, включая атмосферные условия, геологические особенности и растительность, но в городской среде доминирующим становится антропогенный фактор. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка эффективных методов мониторинга, анализа и прогнозирования состояния водных объектов.

Традиционно для оценки качества природных вод используются классификации, основанные на нормативно-правовых документах. Водный кодекс Российской Федерации устанавливает критерии качества водных объектов по физико-химическим и биологическим показателям, определяя соответствие различным категориям водопользования. Классический подход к оценке качества воды также включает использование комплексных индексов, таких как индекс загрязненности воды (далее — ИЗВ), который позволяет получить интегральную оценку состояния водного объекта на основе нескольких ключевых показателей. Данные подходы, хотя и обеспечивают стандартизированную оценку, имеют ограничения в выявлении скрытых взаимосвязей между параметрами качества воды [1].

Альтернативным подходом является применение хемометрических методов, которые позволяют извлекать скрытую информацию из многомерных данных мониторинга. В мировой практике успешно применяются исследования с использованием кластерного анализа и анализа главных компонент для характеризации подземных вод различных регионов, где выявляются группы наблюдений с разной степенью минерализации и источниками формирования химического состава. Анализ поверхностных вод урбанизированных территорий с применением факторного анализа позволяет идентифицировать основные параметры, ответственные за вариабельность качества воды, и сократить количество показателей, необходимых для эффективного мониторинга.

Оценка качества воды необходима не только для удовлетворения текущих потребностей, но и для прогнозирования состояния водных объектов в будущем. Такой прогноз позволяет предотвращать превышение ассимиляционной емкости водных экосистем, а регулярный мониторинг способствует выявлению закономерностей в изменениях их состояния. Традиционные подходы, основанные на анализе отдельных параметров, зачастую не позволяют выявить скрытые взаимосвязи между переменными, характеризующими качество воды. Следовательно, применение современных методов многомерного статистического анализа становится необходимым этапом в комплексной оценке состояния водных объектов [2].

Задача анализа и прогнозирования качества природных вод часто осложняется спецификой данных мониторинга, которые характеризуются наличием пропусков, высокой размерностью и сложными нелинейными взаимосвязями между гидрохимическими, гидрологическими и другими показателями. Оценка качества воды требует мониторинга широкого спектра физических, химических и биологических параметров, что приводит к формированию сложных матриц данных для анализа качества воды [3; 4]. Долгосрочные программы мониторинга качества воды генерируют большие массивы данных, которые часто трудно интерпретировать. Для автоматизации этого процесса и поиска скрытых взаимосвязей между показателями успешно применяются современные статистические подходы и методы. Среди них выделяются кластерный анализ (далее — CA), анализ главных компонент (далее — PCA), факторный анализ (далее — FA) и метод множественной импутации (далее — MI) [5—7].

CA представляет собой метод классификации без предварительных гипотез о распределении данных, позволяющий группировать данные мониторинга на основе их сходства. Хемометрические методы идентифицируют естественные кластерные структуры и группируют переменные на основе сходства между образцами [8; 9]. Существуют два основных подхода к CA: иерархический и неиерархический. В иерархическом подходе анализ начинается с того, что каждый объект представляется отдельным кластером, затем объекты последовательно объединяются на основе их сходства, пока все они не будут объединены в один кластер. Алгоритм кластеризации базируется на вычислении матрицы расстояний между объектами с использованием различных метрик расстояния [10].

PCA является одним из наиболее эффективных методов снижения размерности данных и считается методом без каких-либо предположений, что делает его более надежным по сравнению с FA при отклонениях от нормального распределения. Математически PCA основан на сингулярном разложении матрицы данных или на собственном разложении ковариационной матрицы. Метод основан на ортогональном преобразовании исходных, возможно, коррелирующих, переменных в набор линейно некоррелирующих переменных, называемых главными компонентами. Число главных компонент всегда меньше или равно числу исходных переменных.

Такой подход способствует оперативному и точному диагностированию экологической ситуации [11], что особенно важно в условиях быстрого изменения среды под влиянием как антропогенных, так и природных факторов.

Настоящее исследование посвящено анализу многолетних данных, собранных в рамках мониторинга состояния воды на р. Преголе, расположенной в черте г. Калининграда. Пробоотбор проводился по 21 гидрохимическому показателю, включая параметры азотного и фосфорного цикла, концентрации тяжелых металлов и общие физико-химические характеристики.

Материалы и методы

Отбор проб проводился в районе морского торгового порта ежемесячно с марта 2013 г. по декабрь 2024 г. (рис. 1) по 21 показателю: азотного и фосфорного циклов, металлам, физическим параметрам: температура (°C), pH, ион аммония (мг/дм^3), нитрит-ионы (мг/дм^3), нитрат-ионы (мг/дм^3), фосфат-ионы, железо общее (мг/дм^3), марганец (мг/дм^3), общий фосфор (мг/дм^3), нефтепродукты (мг/дм^3), кислород растворенный, взвешенные вещества, хлориды (мг/дм^3), БПК 5 (мг/дм^3), азот общий (мг/дм^3), медь (мг/дм^3), цинк (мг/дм^3), никель (мг/дм^3), фенолы (мг/дм^3), сульфат-ионы (мг/дм^3), формальдегид (мг/дм^3).

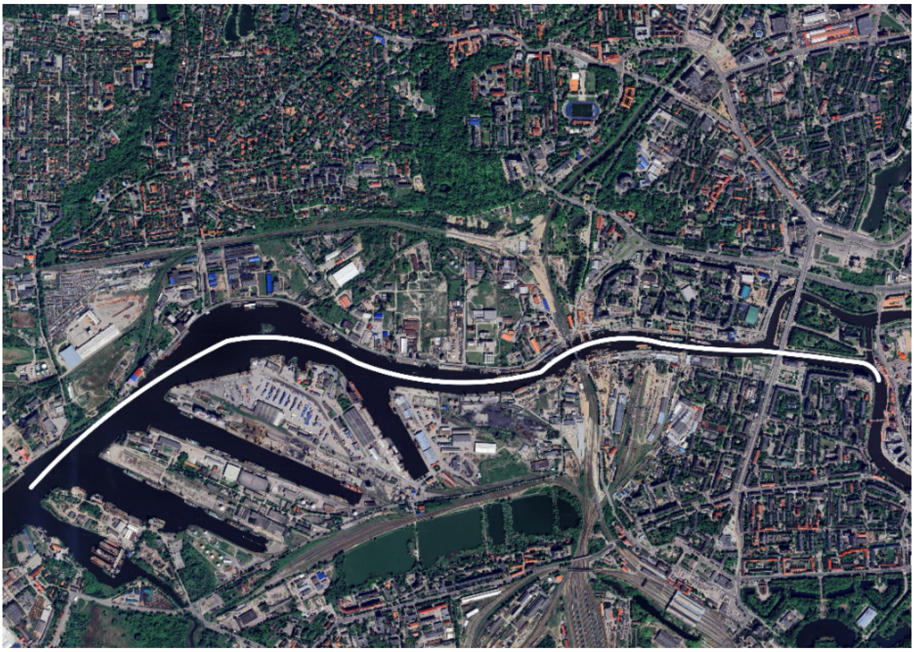


Рис. 1. Картосхема района исследования

Из общего массива данных были выделены показатели азотного и фосфорного циклов как наиболее информативные для характеристики экологического состояния водной среды. Анализ проводился по следующим показателям: ион аммония, нитрит-ионы, нитрат-ионы, фосфат-ионы, общий фосфор и азот общий. Выбор данных показателей обусловлен их ключевой ролью в оценке эвтрофикации водных объектов и определении основных источников загрязнения. Показатели азотного и фосфорного циклов являются лимитирующими биогенными элементами в пресноводных экосистемах и служат индикаторами антропогенного воздействия на водные объекты.

Для прогнозирования данных выбран промежуток с января по декабрь 2023 г. с целью использования в модели как прошлых, так и будущих данных и сравнения прогнозируемых данных с реальными.

Применены следующие методы статистического анализа:

— иерархический CA методом Уорда с евклидовым расстоянием для выявления групп наблюдений со схожими характеристиками;

— FA методом минимальных остатков с вращением «varimax» для снижения размерности данных и выявления латентных факторов;

— анализ временных рядов с применением LOESS-сглаживания для исследования динамики факторов во времени;

— MI для прогнозирования значений гидрохимических показателей.

Статистический анализ выполнен в программной среде R версии 4.3.0 с использованием пакетов cluster, psych, forecast, mice, ggplot2.

FA тесно связан с PCA, но имеет свои концептуальные особенности и математические преимущества в контексте обнаружения латентных структур. Он направлен на выявление скрытых (латентных) переменных, которые объясняют взаимосвязи между наблюдаемыми параметрами и имеют определенный физический или химический смысл. Модель FA предполагает, что наблюдаемые переменные являются линейными комбинациями небольшого числа общих и специфических факторов [6; 7; 12]. Общие факторы объясняют корреляции между переменными, а специфические — отвечают за остаточную дисперсию, включая ошибку измерения и уникальную вариабельность каждой переменной. В математическом выражении модель FA представляется как $X = LFм + \varepsilon$, где X — матрица наблюдаемых переменных (исходные гидрохимические показатели), L — матрица факторных нагрузок, F — матрица общих факторов, ε — вектор остатков, включающий специфические факторы и ошибки измерения [13].

Метод MI представляет собой современный статистический подход к определению пропущенных данных и прогнозированию будущих значений, основанный на байесовской статистике. Хотя классические методы PCA и FA широко используются для анализа качества воды, они имеют существенные ограничения при работе с неполными данными, которые часто встречаются в долгосрочных исследованиях мониторинга. Процесс MI состоит из трех основных этапов: импутация (создание заполненных наборов данных), анализ (применение статистических методов к каждому набору) и объединение (комбинирование результатов). На этапе импутации создается несколько (обычно от 5 до 20) заполненных наборов данных, где пропущенные значения заменяются различными правдоподобными значениями, полученными из наблюдаемых данных. Затем каждый заполненный набор данных анализируется отдельно с использованием стандартных статистических методов. Наконец, результаты всех анализов объединяются для получения итоговых оценок параметров и их стандартных ошибок [14; 15].

Результаты

1. Дендрограмма и иерархический кластерный анализ CA.

Для выявления групп наблюдений со схожими характеристиками применен иерархический кластерный анализ методом Уорда. Результаты кластеризации визуализированы в виде дендрограммы, где по горизонтальной оси расположены даты наблюдений, а по вертикальной — высота кластеризации (рис. 2). Для определения оптимального числа кластеров проведен анализ структуры дендрограммы с выделением трех основных групп наблюдений.

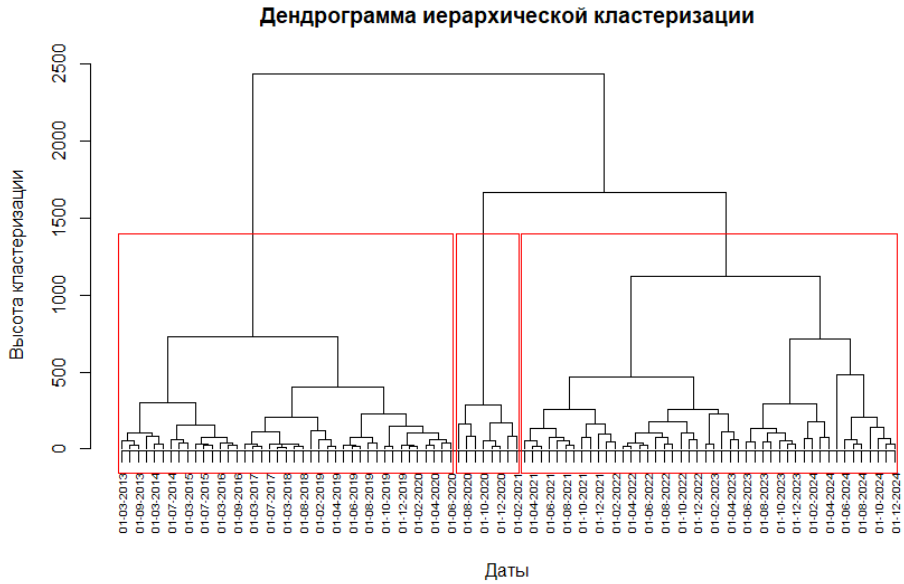


Рис. 2. Дендрограмма иерархической кластеризации

По оси абсцисс расположены даты отбора проб, по оси ординат — высота кластеризации, отражающая степень различия между кластерами. Выделены три основных кластера, отражающие периоды с различными гидрохимическими режимами.

Высота кластеризации варьируется от 0 до 2500 единиц. Выявлены три основных кластера с высотой слияния, равной 1400. Первый кластер включает наблюдения с 1 по 42, характеризующиеся относительно низкими значениями азотных показателей. Третий кластер охватывает период с 50 по 96 наблюдения и соответствует максимальным концентрациям биогенных элементов. Второй кластер содержит данные, сильно отличающиеся от остальных. Продемонстрировано четкое разделение данных на временные группы с различными гидрохимическими характеристиками. Структура дендрограммы указывает на наличие периодов с контрастными режимами поступления биогенных элементов в водную среду.

2. FA.

Для снижения размерности данных и выявления латентных факторов применен FA методом минимальных остатков с вращением «varimax». Предварительно проведена стандартизация данных и проверка пригодности выборки для факторного анализа. Метод минимальных остатков обеспечивает устойчивые результаты при отклонениях от нормального распределения. Выделено два фактора, объясняющих основную долю дисперсии в данных по показателям азота и фосфора (рис. 3).

В математическом выражении модель FA можно представить как $X = LF + \varepsilon$, где X — матрица наблюдаемых переменных (исходные гидрохимические показатели), L — матрица факторных нагрузок, F — матрица факторов, ε — вектор остатков (уникальных компонент).

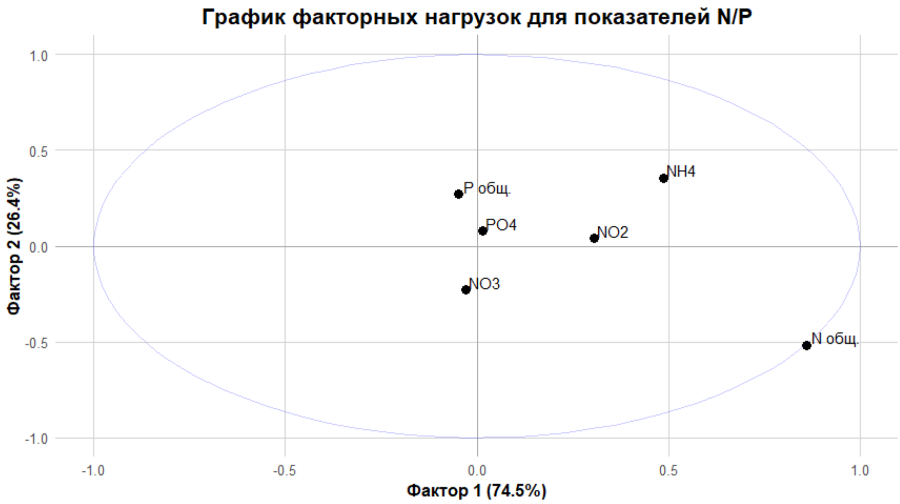


Рис. 3. График факторных нагрузок

Расчет факторных оценок для каждого наблюдения позволил перейти от исходных шести переменных к двум интегральным показателям. Факторные оценки нормализованы со средним значением 0 и стандартным отклонением 1. Это обеспечивает сопоставимость результатов анализа временных рядов.

FA выделил два основных фактора, объясняющих 26,7 % общей дисперсии данных. Первый фактор (MR1) объясняет 17,9 % дисперсии, второй фактор (MR2) — 8,8 % дисперсии.

Фактор 1 характеризуется высокими положительными нагрузками по азоту общему (0,861), иону аммония (0,487) и нитрит-ионам (0,307). Данная структура нагрузок отражает процессы поступления и трансформации органического азота. Высокая корреляция общего азота с аммонием указывает на деструкцию органических соединений с образованием аммиака. Положительная связь с нитритами свидетельствует о протекании первой стадии нитрификации. Фактор интерпретируется как азотная нагрузка от органических источников.

Фактор 2 демонстрирует контрастную структуру нагрузок: положительную по иону аммония (0,357) и отрицательную по общему азоту (– 0,517). Такое соотношение указывает на различные механизмы поступления этих форм азота. Отрицательная корреляция между аммонием и общим азотом может отражать поступление неорганических форм азота на фоне снижения органической составляющей. Фактор интерпретируется как соотношение органических и минеральных форм азота.

Нитрат-ионы, фосфат-ионы и общий фосфор не продемонстрировали значимых факторных нагрузок: фосфат-ионы — 0,156 на первый фактор, общий фосфор — 0,198 на первый фактор. Это указывает на независимость динамики фосфорных соединений от азотного цикла в данных условиях.

3. Анализ временных рядов.

Для исследования динамики выделенных факторов во времени построены временные ряды факторных оценок (рис. 4, 5). Применение LOESS-сглаживания проводилось с параметром сглаживания 0,3, что обеспечило оптимальный баланс между выделением долгосрочного тренда и сохранением значимых краткосрочных колебаний. Статистическая значимость трендов оценивалась через доверительные интервалы сглаженных кривых.

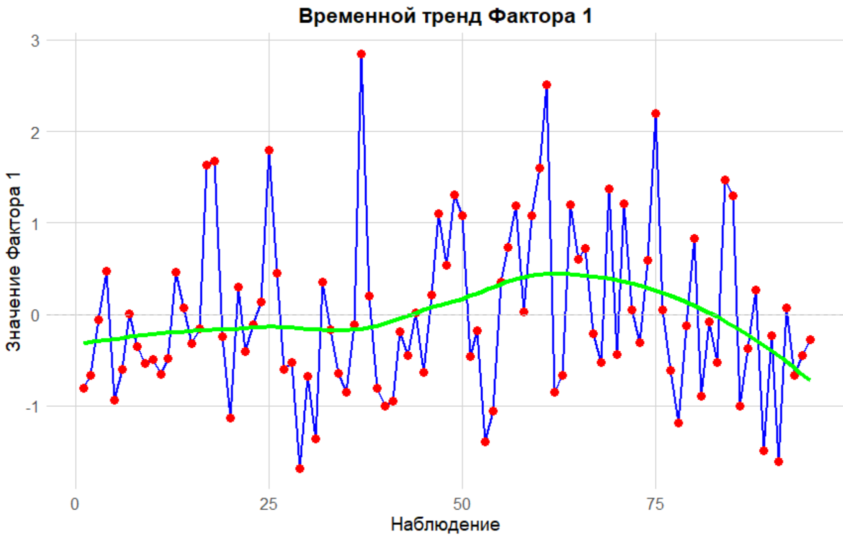


Рис. 4. Временной тренд фактора 1

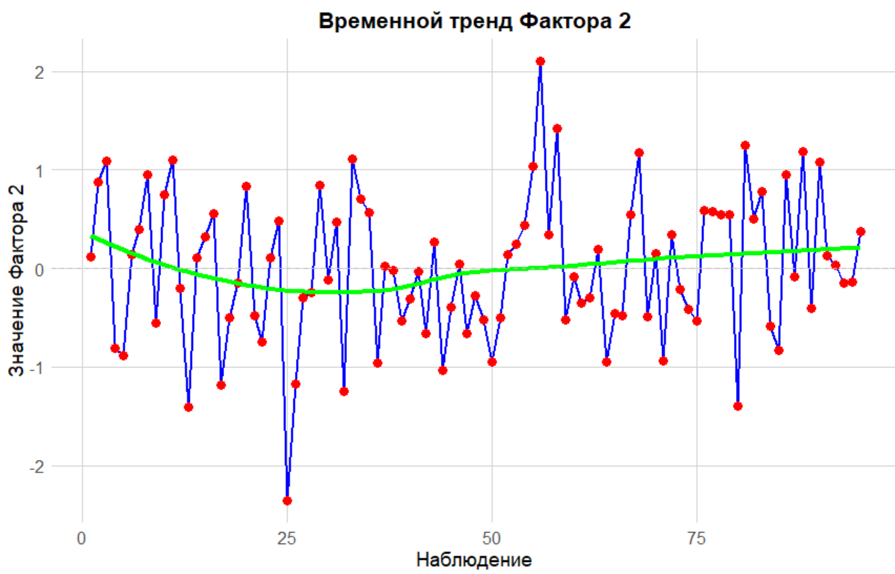


Рис. 5. Временной тренд фактора 2

4. Прогностическая модель.

Для прогнозирования значений гидрохимических показателей разработана модель на основе множественной импутации. Метод позволяет учесть неопределенность в данных и получить более робастные прогнозы по сравнению с детерминистическими подходами. Модель использует информацию о временной структуре данных и взаимосвязях между показателями для восстановления пропущенных значений и прогнозирования будущих наблюдений. Качество модели оценивалось с помощью кросс-валидации и сравнения прогнозных значений с фактическими данными. Однако, поскольку на данный момент не существует «универсальной» модели прогнозирования, результаты множественной импутации носят рекомендательный характер и позволяют лишь предположить состояние водного объекта в рамках исследуемого отрезка времени.

Временной тренд фактора 1 демонстрирует нелинейную динамику с выраженными пиковыми значениями. Максимальное значение фактора 1 достигает 2,84 единиц на 42-м наблюдении, что соответствует периоду максимальной азотной нагрузки. Минимальные значения (–1,67) зафиксированы в начальный период наблюдений. Амплитуда колебаний составляет 4,51 единиц, что превышает утроенное стандартное отклонение. LOESS-сглаживание выявляет куполообразную тенденцию с подъемом в средний период и снижением к концу наблюдений. Высокочастотные колебания указывают на эпизодический характер поступления азотных соединений. Сглаженный тренд фактора 1 показывает подъем с 15-е по 60-е наблюдение с последующим спадом до конца периода. Максимум тренда (0,52) приходится на 58-е наблюдение. Коэффициент автокорреляции первого порядка составляет 0,23, указывая на слабую временную зависимость.

Фактор 2 демонстрирует меньшую изменчивость с максимумом 2,11 на 56-м наблюдении и минимумом –2,31 на 25-м наблюдении. Тренд характеризуется начальным снижением до 25-го наблюдения с последующей стабилизацией около нулевого уровня. Стандартное отклонение составляет 0,89 единиц против 1,12 для первого фактора. Синхронность отдельных пиков с фактором 1 свидетельствует о комплексном воздействии источников загрязнения на различные формы азота.

Среднеквадратичная ошибка (далее — RMSE) представляет собой меру точности модели сглаживания. Для фактора 1 RMSE составила 0,978, для фактора 2 — 0,812. Меньшее значение RMSE для второго фактора указывает на более регулярный характер процессов, им описываемых.

Коэффициент детерминации (далее — R^2) отражает долю дисперсии, объясняемую трендовой составляющей. Значения R^2 равны 0,216 для фактора 1 и 0,123 для фактора 2. Относительно низкие значения соответствуют высокой изменчивости гидрохимических показателей в речных системах.

Тест Дики — Фуллера является статистическим критерием проверки стационарности временных рядов. Результаты теста (p-value $< 0{,}05$ для обоих факторов) подтверждают стационарность рядов после удаления трендовой составляющей. Это позволяет применять стандартные методы анализа временных рядов для дальнейшего исследования.

5. Источники загрязнения.

Структура факторных нагрузок позволяет идентифицировать основные источники поступления азотных соединений. Фактор 1 отражает влияние коммунально-бытовых сточных вод, содержащих органические соединения азота. Пиковые значения могут соответствовать периодам залповых сбросов или снижения эффективности очистки.

Фактор 2 может отражать воздействие атмосферных осадков и поверхностного стока, приносящих минеральные формы азота. Отрицательная корреляция с общим азотом указывает на разбавление органических загрязнителей при поступлении поверхностных вод.

Сезонная динамика факторов обусловлена температурной зависимостью биохимических процессов трансформации азота, изменениями водности реки и вариациями антропогенной нагрузки. Интенсификация процессов аммонификации и нитрификации в теплый период года объясняет сезонные колебания соотношения различных форм азота.

Заключение

Применение статистических методов анализа обработанных гидрохимических данных реки Преголя за период 2013—2024 гг. позволяет сформулировать следующие выводы.

Иерархический СА методом Уорда выявил три основных кластера наблюдений, отражающих различные режимы поступления биогенных элементов в водную среду. Структура дендрограммы демонстрирует четкое временное разделение данных с высотой кластеризации от 0 до 2500 единиц, указывая на наличие периодов с контрастными гидрохимическими характеристиками.

FA идентифицировал два латентных фактора, объясняющих 26,7 % общей дисперсии показателей азотного и фосфорного цикла. Первый фактор (17,9 % дисперсии) интерпретируется как азотная нагрузка от органических источников с доминированием общего азота, аммония и нитритов. Второй фактор (8,8 % дисперсии) отражает соотношение органических и минеральных форм азота, характеризуясь контрастными нагрузками по аммонию и общему азоту.

Анализ временных рядов факторных оценок с применением LOESS-сглаживания выявил нелинейную динамику с выраженными пиковыми значениями и куполообразными трендами. Статистические характеристики временных рядов (RMSE 0,978 и 0,812; R^2 0,216 и 0,123) соответствуют высокой природной изменчивости гидрохимических показателей речных систем.

Фосфорные соединения продемонстрировали независимость от динамики азотного цикла, не показав значимых факторных нагрузок. Данная особенность указывает на различные механизмы и источники поступления соединений фосфора в водную среду.

Структура факторных нагрузок позволяет идентифицировать основные источники загрязнения: коммунально-бытовые сточные воды (органические соединения азота), атмосферные осадки и поверхностный сток (минеральные формы), сезонные изменения.

Интегрированный подход к анализу качества природных вод, сочетающий иерархический CA, FA, исследование временных рядов и прогностическое моделирование, представляет собой эффективный инструментарий для комплексной оценки состояния водных объектов в условиях антропогенного воздействия.

Применение метода Уорда для кластеризации обеспечивает выявление временных групп с различными гидрохимическими характеристиками, позволяя идентифицировать периоды аномального поступления загрязняющих веществ. Факторный анализ с вращением «varimax» эффективно редуцирует размерность данных и выявляет латентные факторы, отражающие основные процессы формирования качества воды.

MI демонстрирует преимущества перед детерминистическими подходами при работе с неполными данными мониторинга, обеспечивая корректную оценку неопределенности результатов. Метод позволяет учитывать временную структуру данных и взаимосвязи между показателями, однако не дает гарантированной точности.

Используемый подход обеспечивает выявление скрытых взаимосвязей между показателями, идентификацию источников загрязнения и разработку научно обоснованных рекомендаций по управлению качеством водных ресурсов.

Список литературы

1. *РД 52.24.643-2002.* Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям : руководящий документ. Утв. и введ. в действие Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды 4 декабря 2002 г. М., 2002.

2. *Ngwenya B., Paepae T., Bokoro P.N.* Monitoring ambient water quality using machine learning and IoT: A review and recommendations for advancing SDG indicator 6.3.2 // Journal of Water Process Engineering. 2025. Vol. 73. P. 107664. doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107664.

3. *Шелутко В.А.* Методы обработки и анализа геоэкологической информации. СПб., 2020.

4. *Шилина М.В., Мусатова О.В., Ивановский В.В.* Биометрия : учеб.-метод. комплекс. Витебск, 2011.

5. *Kannel P.R., Lee S., Kanel S.R., Khan S.P.* Chemometric application in classification and assessment of monitoring locations of an urban river system // Analytica Chimica Acta. 2007. Vol. 582, №2. doi: 10.1016/j.aca.2006.09.006.

6. *Belkhiri L., Boudoukha A., Mouni L., Baouz T.* Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater — A case study: Ain Azel plain (Algeria) // Geoderma. 2010. Vol. 159, №3-4. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.08.016.

7. *Singh Y., Kumar M.* Interpretation of water quality parameters for Villages of Sanganer Tehsil, by using Multivariate Statistical analysis // Journal of Water Resource and Protection. 2010. Vol. 02, №10. doi: 10.4236/jwarp.2010.210102.

8. *Kausher R., Sinha A. Kr., Singh R.* Chemometric appraisal of groundwater and surface water quality for domestic, irrigation and industrial purposes in the coal mining province of Mahan River catchment area // Desalination and Water Treatment. 2023. Vol. 311. doi: 10.5004/dwt.2023.29971.

9. *Sharma S.* Use of Multivariate Analytical Methods in Assessment of River Water Quality // International Journal of Earth Sciences and Engineering. 2017. Vol. 10, №02. doi: 10.21276/ijee.2017.10.0236.

10. *Gajbhiye S., Sharma S.K., Awasthi M.K.* Application of Principal Components Analysis for Interpretation and Grouping of Water Quality Parameters // International Journal of Hybrid Information Technology. 2015. Vol. 8, №4. doi: 10.14257/ijhit.2015.8.4.11.

11. *Ling T.Y., Soo C.L., Liew J.J. et al.* Application of Multivariate Statistical Analysis in Evaluation of Surface River Water Quality of a Tropical River // Journal of Chemistry. 2017. Vol. 2017. doi: 10.1155/2017/5737452.

12. *Михальчук А.А.* Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Ч. II : Ординация и классификация. СПб., 2012.

13. *Ouyang Y., Nkedi-Kizza P., Wu Q.T. et al.* Assessment of seasonal variations in surface water quality // Water research. 2006. Vol. 40, №20. P. 3800—3810. doi: 10.1016/j.watres.2006.08.030.

14. *Subba Rao N.* Application of Principal Components Analysis for Interpretation and Grouping of Water Quality Parameters // Oriental Journal of Chemistry. 2012. Vol. 28. P. 1749—1751. doi: 10.14257/ijhit.2015.8.4.11.

15. *ГОСТ* Р 58556-2019. Оценка качества воды водных объектов с экологических позиций : национальный стандарт Российской Федерации. Утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 октября 2019 г. №965-ст. М., 2019.

Об авторах

Матвей Александрович Смирнов — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: maasmirnov@stud.kantiana.ru

Софья Сергеевна Кладова — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: sonickm12@gmail.com

Юлия Владимировна Королева — канд. геогр. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

ORCID: 0000-0001-7612-4454

E-mail: yu.koroleff@yandex.ru

SPIN-код: 6276-7017

M. A. Smirnov, S. S. Kladova, Y. V. Koroleva

USE OF MATHEMATICAL METHODS IN THE ANALYSIS AND FORECASTING OF NITROGEN-PHOSPHORUS CYCLE INDICATORS IN THE PREGOLYA RIVER BASIN

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia
Received 08 September 2025
Accepted 25 November 2025
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-3

To cite this article: Smirnov M. A., Kladova S. S., Koroleva Y. V., 2026, Use of mathematical methods in the analysis and forecasting of nitrogen-phosphorus cycle indicators in the Pregolya river basin, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural Sciences*, №1. P. 41—53. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-4.

The analysis of multidimensional raw data on the state of aquatic ecosystems often requires the use of modern analytical tools capable of identifying hidden patterns. The purpose of this study is to analyze long-term water quality monitoring data for the Pregolya River (Kaliningrad) in order to identify the main factors determining variability in the hydrochemical regime and to assess their temporal dynamics. To analyze data on indicators of the nitrogen and phosphorus cycles, methods of multivariate statistics were applied, including hierarchical cluster analysis (Ward's method), factor analysis (minimum residual method with varimax rotation), and time-series analysis (LOESS smoothing). As a result of the cluster analysis, three groups of observations were identified, reflecting different periods of nutrient input. Factor analysis made it possible to identify two latent factors: "nitrogen load from organic sources" and "the ratio of organic and mineral forms of nitrogen." Time-series analysis of factor scores revealed nonlinear dynamics and long-term trends in changes in water quality. The study demonstrates that the integrated application of chemometric methods serves as an effective tool for diagnosing the condition of urban water bodies, identifying pollution sources, and providing a scientific basis for the development of management decisions in the field of water resource protection.

Keywords: multivariate statistical analysis, factor analysis, cluster analysis, water quality, nitrogen and phosphorus compounds

The authors

Matvey A. Smirnov, master's student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: maasmirnov@stud.kantiana.ru

Sofia S. Kladova, PhD student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: sonickm12@gmail.com

Yulia V. Koroleva, PhD in Geography, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
ORCID: 0000-0001-7612-4454
E-mail: yu.koroleff@yandex.ru
SPIN code: 6276-7017

УДК 638.12:592:57.033

А. Б. Третьякова[1], М. Н. Мукминов[1], Н. Д. Шамаев[2]

НЕОНИКОТИНОИДЫ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МЕДОНОСНЫХ ПЧЕЛ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСТРОЙ ПЕРОРАЛЬНОЙ ТОКСИЧНОСТИ ИМИДАКЛОПРИДА И ТИАКЛОПРИДА

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
[2] Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА им. К. И. Скрябина, Москва, Россия
Поступила в редакцию 19.06.2025 г.
Принята к публикации 28.09.2025 г.
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-4

Для цитирования: *Третьякова А. Б., Мукминов М. Н., Шамаев Н. Д.* Неоникотиноиды и их воздействие на медоносных пчел: сравнительный анализ острой пероральной токсичности имидаклоприда и тиаклоприда // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2026. №1. С. 54—69. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-4.

*Проведено сравнительное исследование острой пероральной токсичности неоникотиноидных инсектицидов — имидаклоприда и тиаклоприда — в отношении медоносных пчел (*Apis mellifera*). В лабораторных условиях изучены динамика выживаемости, изменение двигательной активности и репеллентный эффект при воздействии различных концентраций данных препаратов. Установлено, что оба препарата обладают выраженной токсичностью в отношении медоносных пчел, однако характер их действия различается. Имидаклоприд проявляет более быстрое начало токсического эффекта, тиаклоприд развивает токсическое действие постепенно. Анализ поведенческой активности показал, что оба инсектицида вызывают последовательное угнетение двигательных функций, за которым следует развитие гиперактивности, типичной для нейротоксических эффектов неоникотиноидов. Оценка репеллентной активности через коэффициент защитного действия продемонстрировала дозозависимое снижение потребления пищи у пчел под действием обоих веществ.*

Ключевые слова: медоносные пчелы, *Apis mellifera*, острая пероральная токсичность, неоникотиноиды, имидаклоприд, тиаклоприд

Введение

Неоникотиноиды представляют собой одну из наиболее широко используемых групп инсектицидов в современной сельскохозяйственной практике. Их высокая эффективность в борьбе с фитофагами обусловлена селективным воздействием на никотиновые ацетилхолиновые рецепторы нервной системы насекомых [1]. К числу наиболее распространенных представителей данной группы относятся имидаклоприд и тиаклоприд, применяемые для защиты культурных растений от вредителей как в виде предпосевного протравливания семян, так и при обработке вегетирующих растений. Однако все большее количество исследований указывает на потенциальную опасность неоникотиноидов для нецелевых видов, особенно для важнейших опылителей — медоносных пчел, которые играют ключевую роль в поддержании экосистемной устойчивости и продуктивности сельскохозяйственных культур [2]. Пчелы могут подвергаться воздействию этих химических веществ через загрязненный нектар, пыльцу и воду, что создает риск как острой, так и хронической токсичности. Острая пероральная токсичность характеризуется быстрым развитием токсического эффекта после однократного приема вещества и может проявляться как немедленной гибелью особей, так и выраженными сублетальными эффектами, влияющими на поведение, двигательную активность и способность к выживанию.

Ранее нам удалось оценить скорость развития токсического эффекта, степень летальности и характер поведенческих изменений, что имеет важное значение для экологической оценки безопасности применения данных пестицидов в условиях реального сельскохозяйственного производства [3]. Кроме того, актуальным направлением исследований остается сравнительный анализ острой токсичности этих соединений в условиях строго контролируемого перорального воздействия. В настоящее время исследователями выявлены особенности поведения и эволюционной адаптации пчел [4—7]. Изучение динамики выживаемости, изменений двигательной активности и репеллентного поведения позволяет получить комплексное представление о токсикологическом профиле препаратов и их потенциальном воздействии на популяции опылителей [8; 9]. Настоящее исследование направлено на сравнительную оценку острой пероральной токсичности имидаклоприда и тиаклоприда в отношении рабочих пчел *Apis mellifera*, с акцентом на динамику выживаемости, изменение двигательного поведения и репеллентную активность.

Материалы и методы

Отбор медоносных пчел. В исследовании использовались молодые, физиологически зрелые рабочие особи западной медоносной пчелы (*Apis mellifera Linnaeus*, 1758), взятые с пасеки расположенной в Верхнеуслонском районе Республики Татарстан. Использование особей из одной пасеки позволяло минимизировать генетическое и физиологическое разнообразие. Сбор насекомых проводился вечером накануне экспериментальных тестов, чтобы обеспечить их переход в естественное ночное состояние покоя и снизить уровень стресса перед началом исследований. Отобранные пчелы были доставлены в лабораторию с использованием хорошо проветриваемых пластиковых контейнеров. После сбора пчелы содержались в лабораторных условиях с контролируемыми параметрами: температура поддерживалась на уровне 25±2 °C, относительная влажность воздуха составляла 50—70 %.

Для проведения опытов пчелы случайным образом распределялись по группам по 30 особей в каждой, включая контрольную группу [10]. Такой подход к распределению способствовал соблюдению условий равномерности тестирования и снижал влияние внешних факторов на получаемые результаты. За два часа до начала воздействия исследуемых веществ все особи были лишены доступа к пище. Эта мера была направлена на стандартизацию физиологического состояния насекомых, обеспечивая одинаковое наполнение кишечника у всех испытуемых на момент начала эксперимента, что исключало возможное влияние различий в питании на его результаты.

Рабочие растворы инсектицидов неоникотиноидной группы. В качестве модельных соединений для оценки токсического воздействия на медоносных пчел были выбраны два коммерческих препарата из группы неоникотиноидов: «Калипсо» (Bayer) и «Кофидор Экстра» (Bayer). Данные препараты содержали в качестве активных действующих веществ имидаклоприд (700 г/л) и тиаклоприд (480 г/л) соответственно (табл. 1). Все рабочие растворы готовились непосредственно перед проведением экспериментов с использованием дистиллированной воды, что обеспечивало воспроизводимость условий тестирования и минимизировало влияние посторонних факторов.

Таблица 1

Концентрации рабочих растворов инсектицидов неоникотиноидной группы

Наименование	Активное вещество	Содержание (мкг/объект)
И1	Имидаклоприд	0,2
И2		0,1
И3		0,05
Т1	Тиаклоприд	10
Т2		5
Т3		2,5

Согласно классификации токсичности пестицидов для пчел, имидаклоприд относится к первому классу опасности — веществам с чрезвычайно высокой токсичностью, при этом его медианная летальная доза (далее — LD_{50}) составляет менее 0,1 мкг на особь. Тиаклоприд характеризуется более низкой токсичностью и отнесен к третьему классу опасности, LD_{50} в диапазоне от 1,1 до 10,0 мкг на насекомое [11]. Подготовленные концентрации тестовых растворов позволили смоделировать условия острого воздействия, соответствующего случаю прямого контакта с обработанными поверхностями или потребления нектара и пыльцы, содержащих остаточные количества пестицидов.

Анализ острой пероральной токсичности. Для моделирования условий воздействия химических веществ, содержащихся в нектаре, на медоносных пчел в лабораторных условиях использовали метод кормления через кормушку. В качестве модельного нектара применяли водный раствор сахарозы с концентрацией 500 г/л (50 % масс/об) [12]. В указанный раствор добавляли исследуемые химические соединения в заданных концентрациях.

Пчелы имели свободный доступ к обработанному корму в течение 4 часов. По истечении этого времени кормушка с раствором, содержащим испытуемое вещество, удалялась из экспериментального садка и заменялась на новую, содержащую чистый раствор сахарозы без добавок. Наблюдение за состоянием пчел проводилось в течение 48 часов с момента начала экспозиции. Показатели регистрировались на фиксированных временных интервалах: через 4, 24 и 48 часов от начала эксперимента. Оценивали поведенческие реакции, уровень общей двигательной активности и количество потребленного корма в каждой тестовой группе. Средний уровень смертности (M) рассчитывался как среднее арифметическое значение процентов гибели по всем повторностям и определялся по формуле

$$M = \frac{\sum V}{n},$$

где V — процент гибели в каждом опыте, n –число повторов [13].

На основании данных, полученных при проведении острого перорального воздействия, рассчитывали инсектицидную активность вещества (Y) для каждой опытной группы по следующей формуле

$$Y = \frac{BO}{AO} \cdot \left(1 - \frac{BK}{AK}\right) \cdot 100\,\%,$$

где AO — исходное число особей в опыте, AK — исходное число особей в контроле, BO — число погибших в опыте, BK — число погибших в контроле [14].

Оценка поведенческих реакций и двигательной активности. Для анализа поведенческих реакций и уровня общей двигательной активности медоносных пчел применяли метод визуального наблюдения в условиях строгого контроля микроклимата. Экспериментальные особи содержались в садках при температуре 25 ± 2 °C и относительной влажности воздуха 50—70 %, с соблюдением стандартного фотопериода — 12 часов света / 12 часов темноты. Регистрация поведенческих показателей осуществлялась однократно в течение суток в один и тот же временной интервал, соответствующий периоду максимальной естественной активности насекомых. В ходе наблюдения фиксировали наличие или отсутствие двигательной активности, характер передвижений (ходьба, взмахи крыльями, попытки к взлету), а также степень координации движений. На основании зарегистрированных данных выделены три категории поведенческой активности:

1) нормальная активность — характеризуется высокой подвижностью, сохранением равновесия, адекватной ориентировочной реакцией на внешние раздражители, сопоставимой с показателями контрольных особей;

2) повышенная активность — проявляется в усиленной двигательной активности, частыми и хаотичными взмахами крыльев, беспокойным поведением, гиперреактивностью к внешним стимулам;

3) сниженная активность — определяется по уменьшению двигательной активности, отсутствию реакций на внешние раздражители, нарушению координации движений, а также по замедленной или полностью утраченной способности к ориентации.

Такой подход позволяет объективно оценить влияние исследуемых факторов на поведенческий статус пчел и использовать полученные данные в качестве интегративного индикатора их физиологического состояния.

Определение репеллентной активности. Определялось фактическое количество потребленного водного раствора сахарозы в группах с химическим веществом и чистого раствора сахарозы после обработки инсектицидом через 48 часов после начала эксперимента. На основе экспериментальных данных был рассчитан коэффициент защитного действия (*КЗД*, %) для каждой испытанной концентрации по формуле

$$КЗД = 100 - \frac{0 \cdot 100}{K},$$

где *О* — количество сахарного сиропа, потребленного пчелами из опытной кормушки, *К* — количество сахарного сиропа, потребленного пчелами из контрольной кормушки [11].

Результаты и обсуждение

Анализ острой пероральной токсичности. В рамках исследования острой пероральной токсичности неоникотиноидных инсектицидов — имидаклоприда и тиаклоприда — были изучены их эффекты на выживаемость особей *Apis mellifera* в контролируемых лабораторных условиях. Через 4 часа после воздействия имидаклоприда наблюдалось достоверное снижение выживаемости пчел во всех опытных группах, при этом степень летальности положительно коррелировала с концентрацией вещества. Среднее количество живых особей составило в группе с дозой 0,2 мкг/объект — 12,5, в группе с дозой 0,1 мкг/объект — 17,3, в группе с дозой 0,05 мкг/объект — 14,6 (рис. 1). Данные свидетельствуют о раннем проявлении токсического действия имидаклоприда, при этом наиболее выраженный эффект был зарегистрирован при максимальной испытанной концентрации. Полученные результаты позволяют предположить, что вещество начинает проявлять свое нейротоксическое действие уже в первые часы после контакта, что подтверждается дозозависимым характером снижения выживаемости.

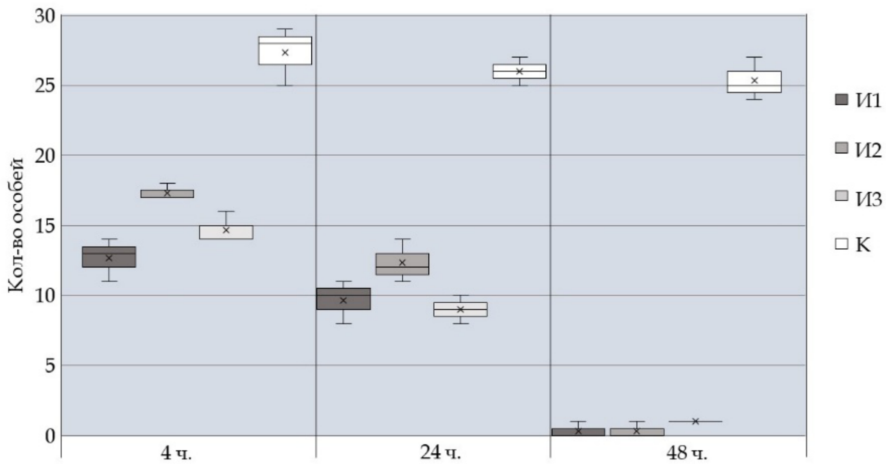


Рис. 1. Динамика выживаемости рабочих пчел *Apis mellifera* в течение 48 часов после острого однократного перорального воздействия различных доз имидаклоприда: И1 — имидаклоприд, 0,2 мкг/объект; И2 — имидаклоприд, 0,1 мкг/объект; И3 — имидаклоприд, 0,05 мкг/объект; К — контроль

К 24 часам после начала эксперимента наблюдалось значительное усиление нейротоксического действия имидаклоприда. Число живых особей в опытных группах снизилось до следующих значений: для группы 0,2 мкг/объект — 9,5; для группы 0,1 мкг/объект — 12,2; для группы 0,05 мкг/объект — 8,9. Эти результаты свидетельствуют о системном характере токсического действия препарата, проявляющегося спустя определенное время после его принятия. Постепенное нарастание эффекта указывает на последовательное развитие патофизиологических изменений в центральной нервной системе насекомых, вызванных стимуляцией никотиновых ацетилхолиновых рецепторов и последующей дезорганизацией нейронной передачи. Отсутствие полной гибели особей на данном этапе может быть связано с индивидуальной вариабельностью физиологической чувствительности пчел к действию неоникотиноидов, что, вероятно, обусловлено генетической или метаболической гетерогенностью особей внутри популяции. По прошествии 48 часов зафиксировано практически полное прекращение жизнедеятельности особей во всех опытных группах. Эти данные подтверждают высокую степень чувствительности *Apis mellifera* к имидаклоприду даже при минимальных дозах, что имеет важное значение с точки зрения экотоксикологической оценки рисков применения рассматриваемого инсектицида в сельскохозяйственной практике.

При оценке острой пероральной токсичности тиаклоприда на начальном этапе эксперимента через 4 часа было отмечено умеренное снижение выживаемости пчел преимущественно в группе с максимальной концентрацией вещества. Количество живых особей составило для группы 10 мкг/объект — 17,2; для группы 5 мкг/объект — 18,4; для группы

2,5 мкг/объект — 20,3 (рис. 2). Указанные показатели свидетельствуют о более мягком начале токсического действия тиаклоприда по сравнению с имидаклопридом, что может быть связано с различиями в скорости связывания с целевыми нейронными структурами, а также особенностями фармакокинетики и метаболизма препарата в организме насекомых.

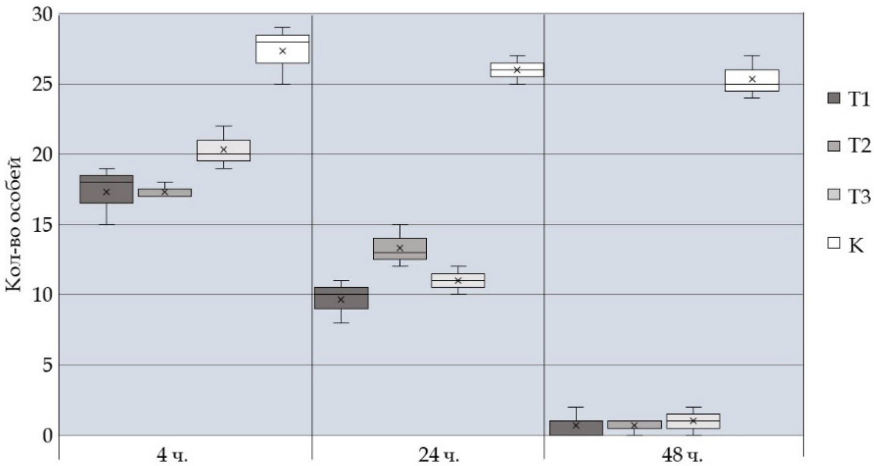


Рис. 2. Динамика выживаемости рабочих пчел *Apis mellifera* в течение 48 часов после острого однократного перорального воздействия различных доз имидаклоприда: T1 — тиаклоприд, 10,0 мкг/объект; T2 — тиаклоприд, 5,0 мкг/объект; T3 — тиаклоприд, 2,5 мкг/объект; K — контроль

Между двумя исследуемыми неоникотиноидами наблюдались выраженные различия как в скорости развития токсических симптомов, так и в степени летальности, что позволяет предположить разный механизм действия или различную степень активности препаратов в условиях острой интоксикации у медоносных пчел. Через 24 часа после воздействия тиаклоприда наблюдалось дальнейшее усиление проявлений токсического действия. Однако скорость гибели пчел оставалась меньшей по сравнению с имидаклопридом, что указывает на различия в кинетике развития нейротоксических эффектов у данных соединений. Среднее количество живых особей в опытных группах составило для группы 10 мкг/объект — 9,5; для группы 5 мкг/объект — 13,2; для группы 2,5 мкг/объект — 10,9. Эти данные демонстрируют выраженную, но относительно замедленную динамику развития токсических симптомов под действием тиаклоприда особенно при снижении концентрации вещества. К 48 часам после начала эксперимента во всех опытных группах наблюдалось практически полное прекращение жизнедеятельности пчел. В группе с минимальной концентрацией 2,5 мкг/объект в двух из трех повторностей были зафиксированы единичные живые особи, что свидетельствует о потенциально более низкой системной токсичности этого препарата (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительные показатели инсектицидной активности и летальности имидаклоприда и тиаклоприда в отношении медоносной пчелы *Apis mellifera*

Активное вещество	Концентрация, мкг/объект	Средняя инсектицидная активность, %			Средняя величина гибели насекомых, %		
		4 часа	24 часа	48 часов	4 часа	24 часа	48 часов
Имидаклоприд	0,2	37,4	58,4	82,3	42,2	67,7	97,7
	0,1	28,1	33,5	55,6	37,8	55,6	96,7
	0,05	26,6	49,8	67,5	32,2	63,3	95,6
Тиаклоприд	10	46,0	59,5	74,4	47,8	75,6	100,0
	5	39,7	54,5	80,3	42,2	58,9	97,8
	2,5	43,3	56,5	70,9	39,7	54,6	80,3

Полученные результаты показали, что оба исследуемых неоникотиноида — имидаклоприд и тиаклоприд — обладают выраженной острой пероральной токсичностью в отношении медоносных пчел. Однако между ними выявлены существенные различия в фармакодинамике действия. Основное различие заключается в скорости проявления токсических эффектов и эффективности при низких дозах. Имидаклоприд характеризуется более быстрым началом действия и высокой активностью даже при микроконцентрациях, тогда как тиаклоприд развивает свой токсический эффект постепенно, и его эффективность при минимальной дозе оказывается несколько ниже. Эти различия могут быть связаны с разной аффинностью к никотиновым ацетилхолиновым рецепторам, скоростью проникновения через гемолимфический барьер и особенностями метаболизма в организме насекомого [15].

Оценка поведенческих реакций и двигательной активности. Через 4 часа после перорального воздействия имидаклоприда у *Apis mellifera* наблюдалось выраженное влияние на двигательную активность. При всех испытанных концентрациях препарата зафиксировано значительное увеличение доли особей со сниженной двигательной активностью, при этом максимальный эффект был зарегистрирован при самой высокой дозе. В группе, обработанной имидаклопридом в концентрации 0,2 мкг/объект, более половины особей демонстрировали снижение двигательной активности, тогда как в контрольной группе этот показатель составлял лишь 11,0 %. Вместе с тем, отмечено существенное сокращение числа пчел с нормальной двигательной активностью, уровень особей с повышенной активностью оставался низким или практически не изменялся по сравнению с контролем (рис. 3).

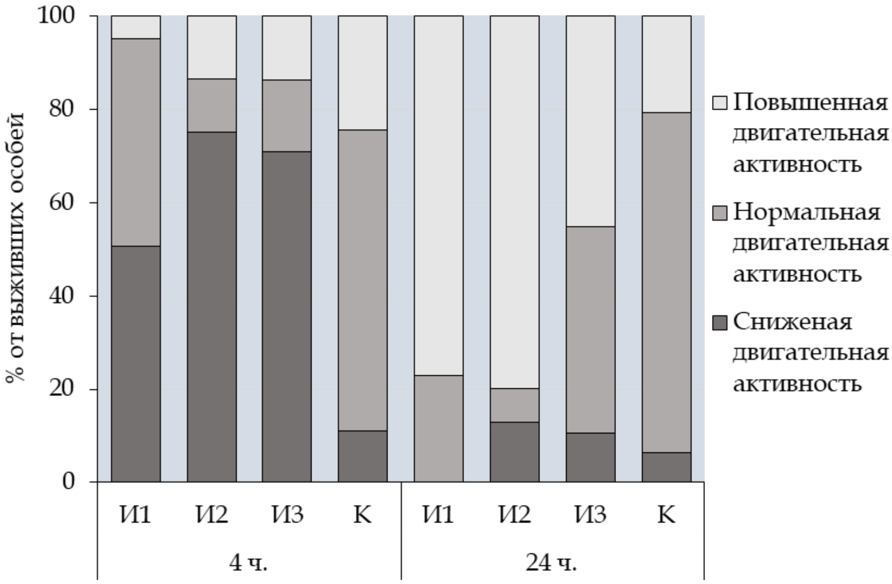


Рис. 3. Распределение двигательной активности пчел *Apis mellifera* после острого перорального воздействия имидаклоприда в различных концентрация: И1 — имидаклоприд, 0,2 мкг/объект; И2 — имидаклоприд, 0,1 мкг/объект; И3 — имидаклоприд, 0,05 мкг/объект; К — контроль

Полученные данные свидетельствуют о быстром начале действия имидаклоприда, проявляющемся уже через несколько часов после контакта и характеризующемся выраженным угнетением двигательных функций насекомых. Особенно ярко эффект проявляется при высоких дозах, что указывает на его дозозависимый токсикологический профиль. Вероятно, это связано с ранним взаимодействием вещества с нейронными структурами центральной нервной системы, приводящим к нарушению передачи нервных импульсов и снижению общей двигательной реактивности пчел. Через 24 часа после воздействия имидаклоприда наблюдалось дальнейшее развитие его токсического действия, выражающееся в существенных изменениях двигательного поведения пчел. На данном этапе отмечено резкое перераспределение между категориями активности. Если на ранних сроках преобладала угнетенная двигательная реакция, то к 24 часам основной тенденцией стало развитие повышенной двигательной активности, что может быть связано с характерными для неоникотиноидов судорожными явлениями или пароксизмальной нейронной стимуляцией. В группе с максимальной концентрацией имидаклоприда 0,2 мкг/объект у 77,0 % особей была зарегистрирована повышенная двигательная активность — наиболее выраженный эффект среди всех опытных групп. В группах со средней (0,1 мкг/объект) и минимальной (0,05 мкг/объект) дозами препарат также вызвал значительное преобладание гиперактивности, что указывает на системный характер его действия на центральную нервную системy насекомых. Одновременно с этим число особей с нормальной двигательной активностью резко снижалось во всех опытных группах, что свидетельствует о глубоких функциональных нарушениях. В контрольной группе сохранялось относительно стабильное распределение между особями с нормальной и повышенной двигательной активностью, что подтверждает специфический токсический эффект имидаклоприда, а не случайные колебания поведенческой реакции.

Аналогичная закономерность была выявлена и при воздействии тиаклоприда: через 4 часа при всех испытанных концентрациях наблюдалось достоверное увеличение доли особей с сниженной двигательной активностью, особенно выраженное в группе со средней дозой. Максимальное снижение двигательной активности зафиксировано в группе 5,0 мкг/объект, где 79,2 % особей демонстрировали угнетенное двигательное состояние (рис. 4). Эти данные позволяют предположить, что оба неоникотиноида — имидаклоприд и тиаклоприд — оказывают значительное влияние на нейрофизиологические процессы, регулирующие двигательное поведение пчел, однако механизм и временная динамика этих изменений могут различаться в зависимости от химической структуры и фармакокинетических свойств препарата.

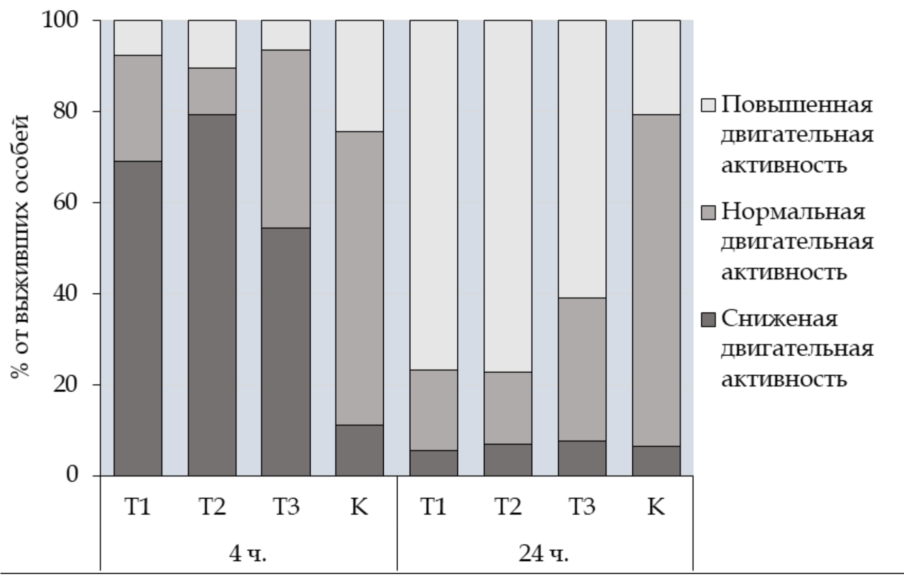


Рис. 4. Распределение двигательной активности пчел *Apis mellifera* после острого перорального воздействия имидаклоприда в различных концентрация (Т1–Т3): Т1 — тиаклоприд, 10,0 мкг/объект; Т2 — тиаклоприд, 5,0 мкг/объект; Т3 — тиаклоприд, 2,5 мкг/объект; К — контроль

Через 24 часа после воздействия тиаклоприда во всех опытных группах наблюдалось выраженное изменение двигательного поведения пчел. В группах с высокими концентрациями инсектицида 10,0 и 5,0 мкг/объект преобладающей формой реакции стала повышенная двигательная активность, составляющая 76,7 и 77,2 % особей соответственно. Эти данные свидетельствуют о развитии выраженного нейротоксического эффекта, который может быть связан с чрезмерной стимуляцией никотиновых ацетилхолиновых рецепторов и последующей дезорганизацией нейронной передачи [16]. В группе с минимальной концентрацией тиаклоприда 2,5 мкг/объект также отмечено значительное увеличение числа особей с повышенной активностью, хотя его уровень был несколько ниже по сравнению с более высокими дозами 61,0 %. Это указывает на концентрационно-зависимый характер действия препарата, при котором максимальные эффекты развиваются при наиболее высоких дозировках. Одновременно с ростом гиперактивности было зафиксировано значительное снижение доли пчел с нормальной двигательной активностью во всех опытных группах. В контрольной группе сохранялось относительно стабильное распределение между особями с нормальной и повышенной активностью, что позволяет исключить неспецифические факторы и подтвердить фармакологическую обусловленность наблюдаемых изменений.

В связи с влиянием неоникотиноидных инсектицидов на поведенческие реакции и двигательную активность, особую актуальность приобретает вопрос о потенциале восстановления пчелиных семей после прекращения воздействия токсикантов. Некоторые исследования дают основания полагать, что при устранении источника загрязнения пчелиные семьи способны частично восстанавливать свои функции — от сбора корма до поддержания социальной структуры [17]. Однако эффективность и темпы восстановления определяются рядом факторов: длительностью и интенсивностью предшествующей экспозиции, возрастом и физиологическим состоянием семьи, доступностью качественных источников нектара и пыльцы, а также наличием сопутствующих стрессоров — вирусных инфекций или экстремальных климатических условий [18; 19].

Определение репеллентной активности. Оба исследуемых неоникотиноидных инсектицида — имидаклоприд и тиаклоприд — вызывают достоверное снижение потребления водного сахарного раствора у западной медоносной пчелы по сравнению с контрольной группой. Это указывает на их способность оказывать репеллентное действие, что может иметь важные экологические последствия для поведения и выживания опылителей в условиях воздействия данных пестицидов. Имидаклоприд проявляет наиболее выраженный эффект при максимальной концентрации 0,2 мкг/объект, где среднее количество потребляемого раствора составило 900 мкл, что на 30,1 % ниже, чем в контрольной группе. Тиаклоприд также снижает потребление пищи, но его влияние менее выражено: при дозе 10,0 мкг/объект пчелы потребили 980 мкл раствора, что соответствует снижению на 23,8 % относительно контроля (рис. 5). Эти различия могут быть связаны с особенностями фармакокинетики и фармакодинамики обоих веществ, включая степень связывания с нейронными рецепторами и скорость проникновения в центральную нервную систему насекомых.

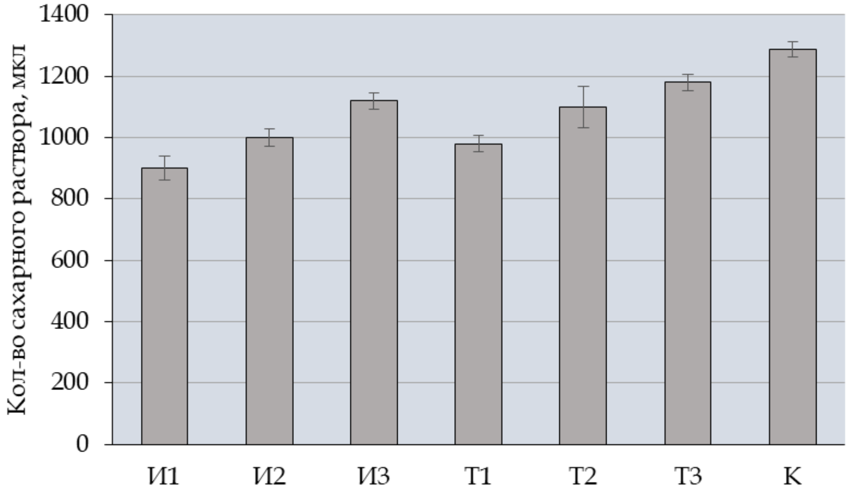


Рис. 5. Количество сахарного раствора, потребленного медоносными пчелами через 48 часов после начала эксперимента (%): И1 — имидаклоприд, 0,2 мкг/ объект; И2 — имидаклоприд, 0,1 мкг/ объект; И3 — имидаклоприд, 0,05 мкг/ объект; Т1 — тиаклоприд, 10,0 мкг/объект; Т2 — тиаклоприд, 5,0 мкг/объект; Т3 — тиаклоприд, 2,5 мкг/объект; К — контроль

Репеллентный эффект препаратов был количественно оценен с использованием коэффициента защитного действия, рассчитанного как процентное снижение потребления пищевого раствора в опытных группах по отношению к контролю. Высокие значения свидетельствуют о значительном угнетении аппетита у обработанных пчел. У имидаклоприда максимальный коэффициент зарегистрирован при самой высокой дозе 0,2 мкг/объект и составил 30,1 %. При снижении дозы до 0,1 мкг/объект и 0,05 мкг/объект коэффициент защитного действия составил 22,3 % и 13,0 % соответственно. Таким образом, имидаклоприд демонстрирует дозозависимое снижение потребления пищи, сохраняя стабильную репеллентную активность при всех испытанных концентрациях, хотя максимальный эффект достигается именно при высокой дозе (табл. 3)

Таблица 3

Коэффициент защитного действия имидаклоприда и тиаклоприда в отношении медоносных пчел

Активное вещество	Концентрация, мкг/объект	КЗД, %
Имидаклоприд	0,2	30,1
	0,1	22,3
	0,05	13,0
Тиаклоприд	10	23,8
	5	14,5
	2,5	8,3

У тиаклоприда наибольшее снижение потребления отмечено при средней дозе 10,0 мкг/объект, где КЗД составил 23,8 %, что значительно превышает показатели при минимальной дозе 2,5 мкг/объект — 8,3 %. Эта закономерность указывает на линейную зависимость «доза — эффект», характерную для тиаклоприда, которая может быть обусловлена особенностями его взаимодействия с нейронными структурами или изменением восприятия пищи у пчел при различных уровнях интоксикации. Имидаклоприд также демонстрирует стабильную и предсказуемую репеллентную активность, с максимумом действия при высоких дозах. Это указывает на его высокую эффективность в формировании поведенческой избегающей реакции у пчел.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить, что оба изучаемых неоникотиноидных инсектицида — имидаклоприд и тиаклоприд — обладают выраженной острой пероральной токсичностью в отношении медоносных пчел. Оба вещества вызывают достоверное снижение выживаемости насекомых, изменяют двигательную активность и подавляют потребление пищи, что свидетельствует о системном характере их действия на центральную нервную систему пчел. Однако между препаратами наблюдаются значимые различия в скорости проявления токсических симптомов, степени летальности и эффективности при низких дозах. Имидаклоприд действует быстрее и демонстрирует более высокую эффективность. Тиаклоприд, напротив, развивает свой токсический эффект постепенно.

Анализ поведенческой реакции показал, что оба препарата вызывают значительные изменения двигательной активности: от начального угнетения к развитию гиперактивности. Это указывает на единый механизм действия неоникотиноидов, связанный с модуляцией никотиновых ацетилхолиновых рецепторов, однако кинетика развития эффектов у этих веществ различается. Результаты также продемонстрировали репеллентный эффект обоих соединений, выраженный в снижении потребления сахарного раствора. Полученные результаты подтверждают необходимость строгого регулирования использования неоникотиноидов, особенно в периоды цветения культур, когда существует высокий риск контакта с опылителями.

Список литературы

1. *Lu W., Liu Z., Fan X. et al.* Nicotinic acetylcholine receptor modulator insecticides act on diverse receptor subtypes with distinct subunit compositions // PLoS Genet. 2022. Vol. 18 (1). doi: 10.1371/journal.pgen.1009920.

2. *Klingelhöfer D., Braun M., Brüggmann D., Groneberg D. A.* Neonicotinoids: A critical assessment of the global research landscape of the most extensively used insecticide // Environmental Research. 2022. Vol. 213. doi: 10.1016/j.envres.2022.113727.

3. *Третьякова А. Б., Мукминов М. Н., Шамаев Н. Д.* Оценка острой контактной токсичности имидаклоприда и тиаклоприда в отношении медоносных пчел:

сравнительный анализ влияния на выживаемость и поведенческую активность // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2025. №4. С. 130—142. doi: 10.5922/vestniknat-2025-4-9.

4. *Шамаев Н. Д.* Методы биотехнологии в изучении экологии и биогеографии медоносной пчелы и решении проблем интенсификации пчеловодства // Пчеловодство и апитерапия: актуальные вопросы, достижения и инновации : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Рыбное, 15—16 декабря 2023 года. Рыбное, 2024. С. 194—198. EDN: ISBLYO.

5. *Шамаев Н. Д., Кошпаева Е. С., Сычев К. В., Иванов А. В.* Молекулярная фитотерапия и применение пищевых добавок, направленные на борьбу с ваириморфозом у медоносных пчел // Пчеловодство и апитерапия: актуальные вопросы, достижения и инновации : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Рыбное, 15—16 декабря 2023 года. Рыбное, 2024. С. 198—204. EDN: NASOBM.

6. *Шамаев Н. Д., Шуралев Э. А., Мукминов М. Н.* Эффективность использования *Apis Mellifera* в паразитологических исследованиях *in vitro* // XI Международная конференция молодых ученых: биоинформатиков, биотехнологов, биофизиков, вирусологов, молекулярных биологов и специалистов фундаментальной медицины : сб. тезисов, Наукоград Кольцово, 24—27 сентября 2024 года. Новосибирск, 2024. С. 242—243. doi: 10.25205/978-5-4437-1691-6-118. EDN: IVDPGF.

7. *Киркина Е. Г., Богомолов А. И., Воронежская Е. Е. и др.* Использованиеальтернативных тест-систем в доклинической практике // Консультант GLP-Planet 2024. Мнение фармацевтической отрасли. СПб., 2024. С. 299—319. doi: 10.57034/978-5-6048955-9-7-s8. EDN: ZBNVUS.

8. *Газетдинов Ф. И., Шуралев Э. А., Шамаев Н. Д.* Подбор моделей для агентного моделирования рисков изменения экологии инфекционных заболеваний у медоносной пчелы // Обеспечение безопасности: производственной, пожарной, экологической : материалы II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ростов н/Д, 2025. С. 328—331. EDN: WJOLZB.

9. *Третьякова А. Б., Шамаев Н. Д.* Системы мониторинга технологий и оптимизация ухода в современном пчеловодстве // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии : сб. науч. тр. 2025. №123. С. 92—97. doi: 10.31016/vet.san.2025-123-17. EDN: RVRCAZ.

10. *Abay Z., Bezabeh A., Gela A., Tassew A.* Evaluating the Impact of Commonly Used Pesticides on Honeybees (Apis mellifera) in North Gonder of Amhara Region, Ethiopia // J. Toxicol. 2023. Vol. 2634158. doi: 10.1155/2023/2634158.

11. *Методические* рекомендации по оценке действия и потенциальной опасности пестицидов для медоносных пчел. М., 2001.

12. *ГОСТ* 33038-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. М., 2019.

13. *Непоклонов А. А., Таланов Г. А.* Методические указания по испытанию инсектицидов, предназначенных для борьбы с эктопаразитами животных. М., 1973.

14. *Павлов С. Д.* Методические рекомендации по изучению эффективности репеллентов и инсектицидов в ветеринарии. М., 1982.

15. *Papke R. L.* Merging old and new perspectives on nicotinic acetylcholine receptors // Biochem Pharmacol. 2014. Vol. 89 (1).

16. *Terry A. V., Jones K., Bertrand D.* Nicotinic acetylcholine receptors in neurological and psychiatric diseases // Pharmacol Res. 2023. Vol. 191. doi: 10.1016/j.phrs.2023.106764.

17. *Di N., Zhu C., Hu Z. et al.* Honeybee colony soundscapes: Decoding distance-based cues and environmental stressors // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2025. Vol. 297. doi: 10.1016/j.ecoenv.2025.118241.

18. *Colin T., Meikle W. G., Paten A. M., Barron A. B.* Long-term dynamics of honey bee colonies following exposure to chemical stress // Sci. Total Environ. 2019. Vol. 677. P. 660—670. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.402.

19. *Wang Y., Li X., Miao C. et al.* Varroa destructor infestation amplifies imidacloprid vulnerability in Apis mellifera // Pestic. Biochem. Physiol. 2025. Vol. 214. doi: 10.1016/j.pestbp.2025.106616.

Об авторах

Анна Борисовна Третьякова — асп., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия.

ORCID: 0000-0002-0359-4049

E-mail: annatretyackowa@yandex.ru

Малик Нилович Мукминов — д-р биол. наук, проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия.

ORCID: 0000-0002-5996-0271

E-mail: malik-bee@mail.ru

Николай Дмитриевич Шамаев — канд. биол. наук, доц., Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА им. К. И. Скрябина, Россия.

ORCID: 0000-0002-0575-3760

E-mail: nikolai.shamaev94@mail.ru

***A.B Tretiakova*[1], *M. N. Mukminov*[1], *N. D. Shamaev*[2]**

NEONICOTINOIDS AND THEIR EFFECTS ON HONEY BEES: A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ACUTE ORAL TOXICITY OF IMIDACLOPRID AND THIACLOPRID

[1] Kazan (Volga Region) Federal University, Russia

[2] Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K. I. Scryabin, Russia

Received 19 July 2025

Accepted 28 Septemder 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-4

To cite this article: Tretiakova A. B., Mukminov M. N., Shamaev N. D., 2026, Neonicotinoids and their effects on honey bees: a comparative analysis of the acute oral toxicity of imidacloprid and thiacloprid, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural Sciences*, №1. P. 54—69. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-4.

A comparative study of the acute oral toxicity of the neonicotinoid insecticides imidacloprid and thiacloprid with respect to honey bees (Apis mellifera) was conducted. Under laboratory conditions, survival dynamics, changes in locomotor activity, and *the repellent effect were examined under exposure to various concentrations of these compounds. The study established that both insecticides exhibit pronounced toxicity toward honey bees; however, their modes of action differ. Imidacloprid shows a more rapid onset of toxic effects, whereas thiacloprid develops toxicity more gradually. Analysis of behavioral activity demonstrated that both insecticides cause a sequential suppression of locomotor functions, followed by the development of hyperactivity typical of the neurotoxic effects of neonicotinoids. Assessment of repellent activity using the coefficient of protective action revealed a dose-dependent reduction in food consumption by bees under the influence of both substances.*

Keywords: honey bees, *Apis mellifera,* acute oral toxicity, neonicotinoids, imidacloprid, thiacloprid

The authors

Anna B. Tretiakova, PhD student, Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.

ORCID: 0000-0002-0359-4049

E-mail: annatretyackowa@yandex.ru

Prof. Malik N. Mukminov, Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.

ORCID: 0000-0002-5996-0271

E-mail: malik-bee@mail.ru

Dr Nikolai D. Shamaev,Associate Professor, Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K. I. Scryabin, Russia.

ORCID: 0000-0002-0575-3760

E-mail: nikolai.shamaev94@mail.ru

УДК 574.24.611.316

О. В. Мячина, А. Н. Пашков, Е. В. Обыденных
Н. В. Парфенова, А. А. Чепрасова

ВЛИЯНИЕ СВЕТОВЫХ РЕЖИМОВ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ НА АДАПТАЦИОННЫЕ СПОСОБНОСТИ МОЛОДЫХ ЛЮДЕЙ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Воронежский государственный медицинский университет
им. Н. Н. Бурденко, Воронеж, Россия
Поступила в редакцию 01.07.2025 г.
Принята к публикации 29.09.2025 г.
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-5

Для цитирования: *Мячина О. В., Пашков А. Н., Обыденных Е. В., Парфенова Н. В., Чепрасова А. А.* Влияние световых режимов городской среды на адаптационные способности молодых людей: экологический аспект // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2026. №1. С. 70—78. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-5.

Современные городские условия характеризуются высоким уровнем светового загрязнения, которое отрицательно воздействует на адаптационные механизмы организма человека, вызывая различные расстройства и нарушения жизнедеятельности. Исследование посвящено изучению изменений адаптационных процессов в организме молодых людей при воздействии различных уровней освещенности: естественного освещения и полного отсутствия света. Исследование проводилось методом анализа вариабельности сердечного ритма (HRV) с применением специализированного оборудования («Омега-М»). Полученные данные свидетельствуют о значительных различиях в функционировании основных регуляторных систем организма при смене условий освещения. Было выявлено, что искусственная световая нагрузка нарушает нормальные биоритмологические процессы, ослабляя устойчивость организма к внешним воздействиям и повышая риск развития патологических состояний. Полученные результаты подчеркивают роль естественных циклов освещенности в поддержании нормального гомеостаза и экологической устойчивости человеческого организма в современной урбанизированной среде обитания. Длительное пребывание в условиях полного отсутствия света оказывает дестабилизирующее воздействие на вегетативную нервную систему, снижая адаптационные возможности организма. Это приводит к нарушению баланса между симпатической и парасимпатической регуляцией, что проявляется в увеличении активности стрессовых механизмов.

Ключевые слова: урбанизированная среда, уровень адаптации, психоэмоциональное состояние, интегральный показатель

Введение

Основой медико-биологических исследований экологии адаптации на свету и в темноте является глубокое понимание взаимосвязи между организмами и окружающей их средой. Свет и темнота оказывают значительное влияние на физиологические процессы, поведение и биологические ритмы живых существ. Так, реакция организмов на изменение длины светового дня (фотопериодизм) важна для понимания репродуктивных циклов, метаболических изменений и адаптации к сезонным колебаниям. Эксперименты в условиях световой и темной среды позволяют выявить механизмы адаптации, которые имеют критическое значение для выживания видов в различных экосистемах. Изменения в уровне освещенности могут провоцировать стрессовые реакции, что инициирует изучение взаимодействия между светом, депрессией и активацией генов, отвечающих за защитные механизмы [1; 2]. Это имеет большое значение в контексте изменения климата и урбанизации, поскольку многие виды оказываются под угрозой. Так, известно, что при появлении различных раздражителей наблюдается рефлекторное сужение сосудов [3]. Изменяется также химический состав биологических жидкостей. Ответные реакции на различные воздействия обеспечиваются координацией работы нервной системы и желез внутренней секреции, поскольку каждый орган и система находятся под влиянием как нервных, так и гуморальных факторов. Регуляция работы сетчатки происходит в автоматическом режиме, при этом формируется как световая, так и темновая адаптация. Человек находится в непрерывном движении, подвержен воздействию различных факторов, которые исходят из окружающей среды. В связи с этим адаптивный потенциал определяет возможность как отдельной личности, так и группы людей эффективно реагировать на изменения, происходящие в окружающем мире [4—6].

Цель: оценить особенности адаптационного потенциала у молодых людей на свету и после 40-минутного пребывания в темноте.

Материалы и методы

В работу были включены 20 практически здоровых молодых людей мужского пола (средний возраст — 17,5±0,5 лет). Важно отметить, что у мужчин гормональная система функционирует в тоническом режиме. Это означает, что уровень гормонов в их организме остается относительно стабильным и постоянным, что способствует поддержанию равновесия в обмене веществ и других физиологических функциях, в отличие от женщин, имеющих циклическую гормональную систему. Эти изменения могут влиять на физическое и эмоциональное состояние, что делает их гормональный фон более подверженным колебаниям. Оценка адаптационного потенциала осуществлялась с применением специализированного комплекса «Омега-М» путем регистрации сердечного ритма через наложение датчиков на запястья непосредственно в начале исследования на свету и после 40-минутного пребывания в темноте. Анализ вариабельности кардиоинтервалов позволил оценить общий уровень адаптации организма, состояние вегетативной и центральной регуляции, психоэмоциональное состояние, а также интегральный показатель функционального состояния у молодых людей [7; 8].

Обработка статистических данных была выполнена с применением Microsoft Office Excel (2007) и программного пакета Statistica SPSS 17. Для вариационных рядов, которые следуют нормальному распределению, проверка статистических гипотез осуществлялась с использованием параметрического t-критерия Стьюдента для независимых выборок ($p < 0{,}05$). Результаты представлены в виде среднего арифметического с ошибкой среднего значения. Различия считались статистически значительными при уровне значимости $p < 0{,}05$.

Также были проведены корреляционные исследования для выявления взаимосвязей между показателями на свету и в темноте.

Результаты и обсуждение

Адаптационный потенциал оценивался по интегральным показателям функционального состояния организма: УА — уровень адаптации сердечно-сосудистой системы; ВР — показатель вегетативной регуляции; ЦР — показатель центральной регуляции; ПА — психоэмоциональная активность; Н — интегральный показатель функционального состояния организма. Норма — 50—100 %.

Оценка адаптационного потенциала обследуемых юношей на программно-аппаратном комплексе «Омега-М» представлена на рисунке (рис.).

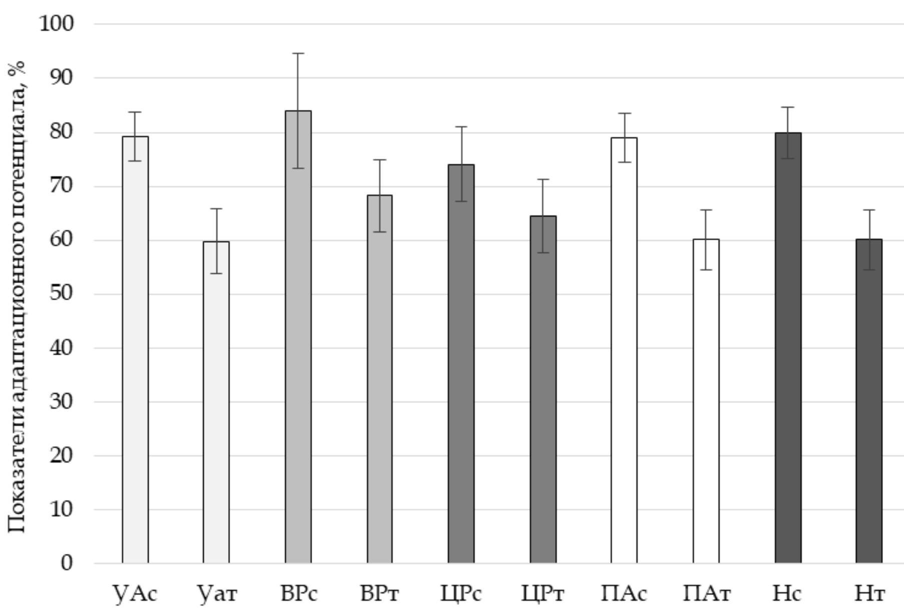


Рис. Показатели адаптационного потенциала у юношей на свету (с) и в темноте (т)

Данные свидетельствуют о значительных различиях в уровнях адаптации к свету и темноте, а также в функционировании вегетативной и центральной регуляции. Высокий уровень адаптации к свету, равный 79,2 %, в сочетании с показателем вегетативной регуляции, равным 84 % ($p \leq 0{,}05$), указывает на важность оптимального освещения для поддержания психоэмоционального состояния. Темнота, хотя и менее предпочтительна, демонстрирует более низкие значения адаптации, что может указывать на повышенную стрессогенность и необходимость дополнительной поддержки в таких условиях. Психоэмоциональная регуляция на свету также отмечается на уровне 79 %, что подчеркивает необходимость освещения как фактора, влияющего на эмоциональное благополучие. В целом полученные результаты исследования указывают на важность изучения звеньев адаптации к освещению и темноте для лучшего понимания их влияния на вегетативные и психоэмоциональные процессы [9—12].

Анализ корреляционных связей между различными показателями адаптации у юношей на свету и в темноте демонстрирует их значительную зависимость (табл.). В условиях освещения наблюдается высокая корреляция по всем изученным параметрам, что указывает на то, что ПА в большей степени способствует лучшей интеграции вегетативной и центральной регуляции, а также общему адаптационному потенциалу.

Корреляционные связи адаптационного потенциала у юношей на свету

Показатель	На свету	В темноте
УА	ВР ($r = +0{,}52$; $p \leq 0{,}01$) ЦР ($r = +0{,}37$; $p \leq 0{,}001$) ПА ($r = +0{,}99$; $p \leq 0{,}001$) ИП ($r = +0{,}95$; $p \leq 0{,}001$)	ВР ($r = +0{,}51$; $p \leq 0{,}01$) ЦР ($r = +0{,}41$; $p \leq 0{,}01$) ПА ($r = +0{,}96$; $p \leq 0{,}001$) ИП ($r = +0{,}88$; $p \leq 0{,}001$)
ВР	ЦР ($r = +0{,}42$; $p \leq 0{,}01$) ПА ($r = +0{,}51$; $p \leq 0{,}01$) ИП ($r = +0{,}55$; $p \leq 0{,}01$)	ЦР ($r = +0{,}72$; $p \leq 0{,}001$) ПА ($r = +0{,}59$; $p \leq 0{,}01$) ИП ($r = +0{,}49$; $p \leq 0{,}01$)
ЦР	ПА ($r = +0{,}42$; $p \leq 0{,}01$) ИП ($r = +0{,}37$; $p \leq 0{,}01$)	ПА ($r = +0{,}42$; $p \leq 0{,}01$) ИП ($r = +0{,}44$; $p \leq 0{,}01$)
ПА	ИП ($r = +0{,}94$; $p \leq 0{,}001$)	ИП ($r = +0{,}83$; $p \leq 0{,}001$)

Примечание: сила взаимосвязи при $0{,}35 < r < 0{,}70$ средняя; при $r > 0{,}70$ — высокая.

В темноте корреляционные связи остаются выраженными, однако их значения несколько меняются. Это может свидетельствовать о том, что условия окружающей среды оказывают влияние на психоэмоциональное состояние юношей, что, в свою очередь, воздействует на адаптивные способности. Высокая степень корреляции между интегральным показателем и другими параметрами подтверждает значимость комплексного анализа адаптивных механизмов [13—16].

В условиях света и темноты наблюдается сильная корреляция между УА и ИП, что свидетельствует о значительном влиянии общего состояния адаптации на вегетативные и центральные механизмы регуляции.

В условиях света более выражена связь между ПА и ВР. Это может указывать на то, что освещенность окружающей среды усиливает влияние эмоционального состояния на физиологические процессы [17]. В темноте корреляция между УА и ВР снижается, однако важными становятся и другие соотношения, такие как связь между ПА и ИП, которая также остается на достоверном уровне значимости. Корреляция между ПА и ИП в обеих условиях была высокой ($r = +0{,}94$ и $r = +0{,}83$ соответственно), что может свидетельствовать о значительном влиянии психоэмоционального состояния на общую адаптацию. В темноте наблюдаются более сильные корреляционные связи, что может объясняться специфическими адаптационными механизмами, задействованными в условиях недостатка света, что подтверждено результатами других исследований [18; 19].

Полученные результаты подчеркивают важность фактора освещенности окружающей среды в процессе изучения адаптационных возможностей молодых людей, что может иметь практическое значение для разработки методов коррекции и поддержки их психоэмоционального здоровья. Важно также отметить значимость оценки адаптационных механизмов как в условиях света, так и темноты для понимания механизмов вегетативной и психоэмоциональной регуляции. В темноте корреляции остаются высокими, но отмечается увеличение значений по показателям ВР и ЦР. Это может свидетельствовать о том, что в условиях ограниченной видимости психоэмоциональная стабильность становится особенно важной для адаптационного потенциала [21].

Взаимосвязь света и темноты в восприятии мира может быть рассмотрена как основной элемент, влияющий на функционирование коры головного мозга. Исследования показывают, что свет активно стимулирует вегетативные системы, что, в свою очередь, сказывается на психоэмоциональном состоянии человека. Взаимосвязь между уровнем освещения и функциональным состоянием организма указывает на важную роль правильного регулирования светового окружения. Известно, что центр регуляции воспринимает изменения во внешней среде и адаптирует внутренние процессы, напрямую влияя как на физическое, так и на психологическое состояние индивида [22—24]. Этот процесс является частью сложной системы, которая реагирует на световые и теневые сигналы, обеспечивая гармоничное взаимодействие с окружающей средой [25].

Выводы

Проведенное исследование показало, что реакция организма на изменение освещенности (наличие света и пребывание в темноте) носит индивидуальный характер и зависит от множества факторов, включая исходное состояние здоровья, половую принадлежность, возраст и предшествующий опыт адаптации к данным условиям.

Результаты подтвердили необходимость дальнейших исследований по изучению адаптации организма человека к контрастным режимам освещения с учетом экологических и антропогенных факторов городской среды. Особое внимание следует уделить дифференциальному подходу к оценке адаптационного потенциала различных категорий населения, проживающего в зонах повышенного светового загрязнения.

Полученные данные свидетельствуют о потенциальной возможности разработки специализированных методов коррекции адаптационных нарушений, направленных на повышение устойчивости организма к негативным последствиям постоянного воздействия городской среды, включая риск развития стресс-индуцированных заболеваний и снижение иммунитета.

Дальнейшие исследования в данном направлении имеют большое теоретическое и практическое значение для реализации концепции устойчивого развития и охраны здоровья населения в условиях постоянно увеличивающейся урбанизации и глобальных климатических изменений.

Список литературы

1. *Сычев Д. А., Шуев Г. Н., Торбенков Е. С., Адриянова М. А.* Персонализированная медицина: взгляд клинического фармаколога // Consilium Medicum. 2017. Т. 19, №1. С. 61—68. EDN: YSQFFL.

2. *Dresp-Langley B., Reeves A. J.* Environmental Lighting Conditions, Phenomenal Contrast, and the Conscious Perception of Near and Far // Brain Science. 2024. Vol. 14, №10. Art. №47. doi: 10.3390/brainsci14100966.

3. *Masin S. C.* Luminance Determinants of Perceived Surface Stratification in Two-Dimensional Achromatic Transparent Patterns // Perception. 2000. Vol. 29, iss. 7. P. 853—861. doi: 10.1068/p3042.

4. *Кочурова Е. В., Козлов С. В.* Диагностические возможности слюны // Клиническая лабораторная диагностика. 2014. №1. С. 13—15. EDN: RWTWSV.

5. *Khurshid Z., Warsi I., Moin S. F. et al.* Biochemical Analysis of Oral Fluids for Disease Detection // Advances in Clinical Chemistry. 2021. Vol. 100. P. 205—253. doi: 10.1016/bs.acc.2020.04.005.

6. *Gardner A., Carpenter G., Po-Wah So.* Salivary Metabolomics: From Diagnostic Biomarker Discovery to Investigating Biological Function // Metabolites. 2020. Vol. 10, iss. 2. Art. №47. doi: 10.3390/metabo10020047.

7. *Борисова О. В., Маковецкая Г. А., Гильмиярова Ф. Н. и др.* Современный взгляд на клиническую ценность исследования ротовой жидкости в практике врача-педиатра // Медицинский Совет. 2022. №16 (19). С. 139—145. doi: 10.21518/2079-701X-2022-16-19-139-145.

8. *Кругленя В. А.* Оценка изменения функционального состояния студентов за время занятий по данным программно-аппаратного комплекса «Омега-М» // Проблемы здоровья и экологии. 2010. №4 (26). С. 141—144. EDN: UYWSYB.

9. *Микаелян Н. П., Комаров О. С., Давыдов В. В., Мейснер И. С.* Биохимия ротовой жидкости в норме и при патологии : учеб.-метод. пособие. М., 2017.

10. *Бельская Л. В., Сарф Е. А., Косенок В. К., Массард Ж.* Хронофизиологические особенности электролитного состава слюны человека в норме // Экология человека. 2018. №5. С. 28—40. doi: 10.33396/1728-0869-2018-5-28-32. EDN: XNZLAT.

11. *Турлак И. В.* Слюна — основные направления исследования ее свойств // Современные проблемы науки и образования. 2020. №4. doi: https://doi.org/10.17513/spno.29934.

12. *Шилович Л. Л.* Оценка текущего состояния функциональной и физической формы спортсменов с применением программно-аппаратного комплекса «Омега-С» // Проблемы здоровья и экологии. 2010. №1 (23). С. 77—80. EDN: UYAZIH.

13. *Boswell-Casteel R. C., Hays F. A.* Equilibrative Nucleoside Transporters — a Review // Nucleosides Nucleotides & Nucleic Acids. 2017. Vol. 36, iss. 1. P. 7—30. doi: 10.1080/15257770.2016.1210805.

14. *Flyer J. N., Zuckerman W. A., Richmond M. E. et al.* Prospective Study of Adenosine on Atrioventricular Nodal Conduction in Pediatric and Young Adult Patients After Heart Transplantation // Circulation. 2017. Vol. 135, iss. 25. P. 2485—2493. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.117.028087.

15. *Коробова В. Н., Михин В. П.* Применение программно-аппаратного комплекса «Омега-М» для оценки функционального состояния больных острым коронарным синдромом // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». 2016. №2. С. 61—63. EDN: XHJEMJ.

16. *Крестьянинова Т. Ю.* Дозированная нагрузка и функциональное состояние организма (по данным тестов программно-аппаратного комплекса «Омега-М») // Наука — образованию, производству, экономике : материалы XIX(66) Регион. науч.-практ. конф. препод., науч. сотр. и асп. : в 2 т. 2014. С. 392—394. EDN: YLNSOL.

17. *Орлова Е. В., Кащук А. Е., Завьялова Т. Н.* Оценка адаптации иностранных обучающихся методом анализа вариабельности сердечного ритма // Научные исследования: от теории к практике. 2016. №4-1 (10). С. 10—13. EDN: WYNKQT.

18. *Муха А. И., Голубев Б. С., Зиновьев М. Ю.* Патент РФ №2290 938; 2004.

19. *Бароненко В. А., Рапопорт Л. А.* Здоровье и физическая культура студента. М., 2009.

20. 2*Еловикова Т. М.* Слюна как биологическая жидкость и ее роль в здоровье полости рта : учеб. пособие. Екатеринбург, 2018.

21. *Трегуб А. С., Кузнецова Н. В., Бутовец Г. В.* Оценка общего функционального состояния и адаптационных резервов организма человека методом вариабельности сердечного ритма // Международный студенческий научный вестник. 2018. №4 (1). С. 80—83. EDN: XNNCXR.

22. *Шлык Н. И.* Сердечный ритм и тип регуляции у детей, подростков и спортсменов. Ижевск, 2009. EDN: QLVYBB.

23. *Баевский Р. М., Берсенева А. П.* Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М., 1997.

24. *Липунова О. В.* Роль эмоциональной сферы в структуре адаптивного поведения личности // Современные проблемы науки и образования. 2012. №6. EDN: TODUML.

25. *Макеева В. С.* Мониторинг физического состояния : учеб. пособие. Орел, 2013.

Об авторах

Ольга Владимировна Мячина — д-р мед. наук, зав. кафедрой биологии, Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко, Россия.

ORCID: 0000-0002-6124-4469

E-mail: vgmu@yandex.ru

SPIN-код: 6814-8345

Александр Николаевич Пашков — д-р биол. наук, проф. кафедры биологии, Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко, Россия.
ORCID: 0000-0003-2454-0397
E-mail: vgmu@yandex.ru
SPIN-код: 1089-6438

Екатерина Викторовна Обыденных — инженер кафедры биологии, Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко, Россия.
ORCID: 0009-0003-0957-2507
E-mail: obidennyh.e@yandex.ru
SPIN-код: 4851-6392

Наталья Владимировна Парфенова — канд. биол. наук, доц. кафедры биологии, Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко, Россия.
ORCID: 0000-0003-1917-0256
E-mail: assistent78.9@mail.ru
SPIN-код: 4673-6594

Анна Александровна Чепрасова — ассистент кафедры биологии, Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко, Россия.
ORCID: 0000-0001-7275-4635
E-mail: cheprasova_81@mail.ru
SPIN-код: 3024-2770

O. V. Myachina, A. N. Pashkov, E. V. Obydennykh
N. V. Parfenova, A. A. Cheprasova

THE IMPACT OF LIGHTING MODES IN URBAN ENVIRONMENT ON ADAPTATION CAPABILITIES OF YOUNG PEOPLE: AN ECOLOGICAL ASPECT

Voronezh State Medical University named after N. N. Burdenko, Voronezh, Russia
Received 01 Julay 2025
Accepted 29 September 2025
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-5

To cite this article: Myachina O. V., Pashkov A. N., Obydennykh E. V., Parfenova N. V., Cheprasova A. A., 2026, The impact of lighting modes in urban environment on adaptation capabilities of young people: an ecological aspect, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural Sciences*, №1. P. 70—78. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-5.

Modern urban environments are characterized by high levels of light pollution, which negatively affect the adaptive mechanisms of the human body and cause various disorders and impairments of vital functions. This study focuses on changes in adaptive processes in the bodies of young people exposed to different lighting conditions — natural illumination and complete absence of light. The research employed heart rate variability (HRV) analysis using specialized *equipment (Omega-M). The obtained data indicate significant differences in the functioning of the main regulatory systems of the body under changing lighting conditions. The study reveals that artificial light exposure disrupts normal biorhythmological processes, weakens the body's resistance to external stressors, and increases the risk of pathological conditions. The results highlight the role of natural lighting cycles in maintaining normal homeostasis and ecological stability of the human body in a modern urbanized environment. Prolonged exposure to complete darkness exerts a destabilizing effect on the autonomic nervous system, reducing the body's adaptive capacity. This leads to an imbalance between sympathetic and parasympathetic regulation, manifested in increased activity of stress-related mechanisms.*

Keywords: urbanized environment, adaptation level, psycho-emotional state, indices of vegetative and central regulation, integral index

The authors

Prof. Olga V. Myachina, Head of Biology Department, Burdenko Voronezh State Medical University, Russia.

ORCID: 0000-0002-6124-4469

E-mail: vgmu@yandex.ru

SPIN code: 6814-8345

Prof. Alexander N. Pashkov, Professor of Biology Department, Burdenko Voronezh State Medical University, Russia.

ORCID: 0000-0003-2454-0397

E-mail: vgmu@yandex.ru

SPIN code: 1089-6438

Ekaterina V. Obydennykh, Engineer of Biology Department, Burdenko Voronezh State Medical University, Russia.

ORCID: 0009-0003-0957-2507

E-mail: obidennyh.e@yandex.ru

SPIN code: 4851-6392

Dr Natalya V. Parfenova, Associate Professor of Biology Department, Burdenko Voronezh State Medical University, Russia.

ORCID: 0000-0003-1917-0256

E-mail: assistent78.9@mail.ru

SPIN code: 4673-6594

Anna A. Cheprasova, Assistant at the Department of Biology, Burdenko Voronezh State Medical University, Russia.

ORCID: 0000-0001-7275-4635

E-mail: cheprasova_81@mail.ru

SPIN code: 3024-2770

УДК 635.654.3 631.524.85 581.162.41

Ц. Сунь[1], Ю. В. Фотев[2, 3]

ВЗАИМОСВЯЗЬ УСТОЙЧИВОСТИ ОБРАЗЦОВ ВИГНЫ (*VIGNA UNGUICULATA*) К НИЗКИМ ТЕМПЕРАТУРАМ И БОЛЕЗНЯМ В СИБИРИ

[1] Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
[2] Центральный сибирский ботанический сад СО РАН,
Новосибирск, Россия
[3] Новосибирский государственный аграрный университет,
Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 21.10.2025 г.
Принята к публикации 12.12.2025 г.
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-6

Для цитирования: *Сунь Ц., Фотев Ю. В.* Взаимосвязь устойчивости образцов вигны (*Vigna unguiculata*) к низким температурам и болезням в Сибири // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2026. №1. С. 79—94. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-6.

*Цель исследования — изучение взаимосвязи между устойчивостью образцов вигны к низким температурам и пораженности их патогенными микромицетами. Использовано 10 образцов вигны (*Vigna unguiculata*). Жизнеспособность пыльцы* in vitro *оценивали в 20%-ном растворе ПЭГ 6000 при 25°C в течение 3 часов (контроль) и при 6°C в течение 24 часов (оценка холодоустойчивости). Способность семян к прорастанию при низкой температуре оценивали методом их проращивания на фильтровальной бумаге при температуре (T) 10, 12 и 25°C (контроль) и в почве при постоянной T 25°C, а также в режиме 10°C в течение 10 дней + при 25°C). Адаптивность корневой системы к низким температурам определяли по скорости роста при обработке в режиме 25°C → 14°C и соотношению скоростей роста при низкой / оптимальной температуре. Взаимосвязь признаков анализировали с помощью корреляционного анализа в программах SPSS и Excel. Установлены значительные различия в устойчивости образцов вигны к низким температурам и патогенным микромицетам. Выявлена достоверная отрицательная корреляция между холодоустойчивостью пыльцы (0—97,9%) и процентом поражения семян микромицетами, а также между всхожестью семян при низкой температуре (0—77,7%) и процентом их поражения. Холодоустойчивость пыльцы имела достоверно положительную корреляцию как со всхожестью семян на фильтровальной бумаге при 10°C ($r = 0,787$; $p < 0,01$), так и с их холодоустойчивостью ($r = 0,757$; $p < 0,05$). Образцы с высокой всхожестью после восстановления после холодового воздействия имели более низкий процент загнивания семян. Кроме того, выявлена взаимосвязь показателей холодоустойчивости пыльцы, семян и корневой системы. Сорта* Zinder *и Факир показали* *наилучшие комплексные результаты, сочетая высокую устойчивость к низким температурам и низкий процент загнивания. Данное исследование обеспечивает теоретическую основу для селекции вигны на устойчивость к стрессам.*

Ключевые слова: *Vigna unguiculata*, вигна, устойчивость к микромицетам, прорастание, семена, пыльца *in vitro*, холодостойкость

Введение

Вигна (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) — важная бобовая культура тропического происхождения, широко интродуцируется в умеренные зоны благодаря высокому содержанию белка и экологической пластичности [1]. В Сибири короткий вегетационный период, весенние колебания низких температур (среднесуточная ≤12 °C) и высокая влажность создают двойную угрозу для вигны: ингибирование роста и развития, вызванное холодовым стрессом, и вспышки болезней [2]. Низкие температуры не только негативно влияют на стабильность клеточных мембран и активность ферментов [3], но и ослабляют иммунный ответ растений, что увеличивает риск заражения патогенами, такими как *Pythium* spp. и *Fusarium* spp. [4].

Исследования последних лет показали, что у сельскохозяйственных культур может существовать синергетический механизм регуляции холодоустойчивости и устойчивости к болезням. Чувствительность пыльцы к низким температурам может служить ранним индикатором холодостойкости в репродуктивной фазе [5], тогда как реакция на холод на стадии прорастания семян и со стороны корневой системы определяет успех вегетативного развития [6]. В практике интродукции вигны в Сибири было отмечено, что некоторые генотипы, способные прорастать при низких температурах, в период восстановления температурного режима оказались подвержены поражению патогенными микромицетами, что указывает на сложное взаимодействие между холодоустойчивостью и устойчивостью к болезням [7]. Это взаимодействие может быть следствием вызванного холодовым стрессом дисбаланса распределения углерода, который ослабляет метаболические пути, связанные с устойчивостью к болезням [8], или изменений в ризосферном микробиоме, способствующих размножению патогенов [9].

Текущие исследования вигны в основном сосредоточены на реакции на единичный стрессор [10], при этом недостаточно изучены синергетические механизмы повреждений от холода и болезней [11]. Особенно в условиях сибирского климата с весенним чередованием холода и засухи закономерности коэволюции признаков устойчивости к абиотическим стрессам остаются неясными [12]. Настоящее исследование ставит целью путем интеграции многомерной оценки жизнеспособности пыльцы, кинетики прорастания семян, моделей роста корневой системы и частоты возникновения гнилей выявить взаимосвязь и независимость холодоустойчивости различных органов (репродуктивных / вегетативных) вигны; отобрать генотипы вигны, адаптированные к стрессовым условиям Сибири. Результаты могут служить теоретической основой для селекции на устойчивость к стресс-факторам.

Материалы и методы

Исследования проведены в лаборатории интродукции пищевых растений Центрального Сибирского ботанического сада СО РАН (ЦСБС СО РАН). Материалом для испытаний послужили 10 образцов вигны (*Vigna unguiculata*) разного происхождения, включая Коллекции живых растений открытого и защищенного грунта ЦСБС СО РАН УНУ № USU 440534 (табл. 1).

Таблица 1

Образцы, использованные в работе, и их происхождение

Номер	Образцы	Происхождение
1	Сибирский размер	УНУ № USU 440534 ЦСБС
2	Юньнаньская	УНУ № USU 440534 ЦСБС
3	Графиня	ООО «Научно-исследовательский институт селекции овощных культур»; ООО «Агрофирма Гавриш»
4	Zinder	УНУ № USU 440534 ЦСБС / получен по Делектусу / Дания
5	Факир	ООО «СДК-СИДС»
6	Лилиана	ООО «АГРОФИРМА ПОИСК»
7	Макаретти	ООО «Научно-исследовательский институт селекции овощных культур»; ООО «Агрофирма Гавриш»
8	Блэк Сид	ООО «Плазменные Семена»
9	Кудесница	ООО «СДК-СИДС»
10	Нежная	ООО «Селекционная фирма Гавриш»

Растения, использовавшиеся в качестве источника пыльцы, выращивали в необогреваемой пленочной теплице ЦСБС СО РАН (54°82′ в. д., 83°12′ с. ш.). В 10:00 утра собирали пыльцу вигны из цветков. Для определения холодоустойчивости использовали питательную среду, содержащую полиэтиленгликоль (ПЭГ 6000) с молекулярной массой 6000 в концентрации 20 % с добавлением борной кислоты (0,006 %). ПЭГ 6000 является синтетическим осмотиком и не участвует в метаболизме растительных клеток. Пыльцу помещали в каплю среды на предметном стекле в закрытой чашке Петри со смоченной водой фильтровальной бумагой на дне. После этого оценивали ее прорастание при оптимальной (25 °С в течение 3 часов) и при низкой температуре (6 °С в течение 24 часов). По завершении инкубации каплю среды с пыльцой исследовали под световым микроскопом Carl Zeiss Primo Star (Германия) при увеличении ×100. Пыльцевое зерно считали проросшим, если длина пыльцевой трубки превышала ½ диаметра пыльцевого зерна [13]. Каждый опытный вариант повторяли 3 раза, случайным образом выбирая по 3 поля зрения. В каждом поле зрения учитывали не менее 50 пыльцевых зерен, после чего рассчитывали средний показатель прорастания пыльцы и холодоустойчивость. Процент прорастания пыльцы (жизнеспособность) и холодоустойчивость рассчитывали по формулам (1) и (2) соответственно [14]:

$$\text{Жизнеспособность (\%)} = \left(\frac{\text{Количество проросшей пыльцы}}{\text{Общее количество пыльцы}}\right) \cdot 100; \quad (1)$$

$$\text{Холодоустойчивость (\%)} = \left(\frac{\text{Скорость прорастания пыльцы при } 6\,^{\circ}\text{C}}{\text{Скорость прорастания пыльцы при } 25\,^{\circ}\text{C}}\right) \cdot 100. \quad (2)$$

Способность к прорастанию и пораженность патогенными микромицетами семян различных образцов вигны оценивали в условиях, имитирующих оптимальную температуру и низкотемпературный стресс. При закладке семян на проращивание руководствовались ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести» [15]. Из каждого образца случайным образом отбирали «типичные» для конкретного образца семена без механических повреждений. Отобранные семена погружали в 1%-ный раствор перманганата калия ($KMnO_4$) на 30 минут, затем пять раз промывали стерильной дистиллированной водой и подсушивали до сыпучего состояния для последующего использования. Каждый исследуемый образец и каждый температурный режим / температурная схема эксперимента включал 3 повторности, по 15 семян в каждой.

Метод культивирования на фильтровальной бумаге. На дно чашки Петри (диаметром 9 см) укладывали 3 слоя увлажненной стандартной фильтровальной бумаги без свободной воды в качестве ложа для проращивания. Степень увлажнения определяли по отсутствию капель при поднятии бумаги. Стерильным пинцетом подготовленные семена равномерно размещали на увлажненной бумаге с соблюдением интервалов для предотвращения контакта семян друг с другом. Чашку закрывали крышкой и маркировали с указанием номера образца, температурного режима и номера повторности. Три группы чашек Петри помещали в климатические камеры в соответствии с установленными температурными режимами: контроль 25±1 °C, низкотемпературные обработки 12±1 и 10±1 °C; для всех камер поддерживали фотопериод 16 часов света / 8 часов темноты при интенсивности освещения ~2000 люкс. В течение всего периода культивирования контролировали влажность в камерах, регулярно проверяя и увлажняя фильтровальную бумагу. На 10-е сутки проводили основной учет: фиксировали количество проросших и загнивших семян в каждой повторности.

Метод культивирования в почве с восстановлением после низкотемпературного стресса. Для имитации условий прорастания, близких к полевым, параллельно проводили эксперимент с культивированием в почве на основе холодового теста, разработанного в конце 1940-х — начале 1950-х гг. в США [16]. Использовали стандартный почвенный субстрат для рассады на основе верхового торфа. Увлажненную почву (влажность ~60—70 % от полной влагоемкости) помещали в ячейки рассадной кассеты на глубину 5 см. Стерильным пинцетом подготовленные семена высевали в почву точечно на глубину ~1 см с соблюдением интервалов. Кассеты маркировали с указанием номера образца и повторности, затем помещали в условия с различной температурой.

1. Группа постоянной температуры (25 °C).

Кассеты помещали в климатическую камеру с температурой 25 ± 1 °C (контроль). Количество проросших и сгнивших семян в каждой повторности фиксировали на 5-е и 10-е сутки.

2. Группа восстановления после низкотемпературного стресса.

Кассеты сначала помещали в климатическую камеру с температурой 10 ± 1 °C на 10 суток. Затем все кассеты переносили в камеру с температурой 25 ± 1 °C (фотопериод 16 часов света / 8 часов темноты, ~2000 люкс) для восстановления. На 4-е сутки восстановительного периода (14-е сутки эксперимента в целом) фиксировали количество проросших и загнивших семян в каждой повторности.

Критерии оценки при учете.

Проросшим считали семя, у которого длина корешка ≥ длины семени, длина побега ≥ 0,5 длины семени, при этом основные структуры проростка (корешок, побег) были здоровыми, целыми и без дефектов. Семена, не соответствующие всем перечисленным критериям, считали непроросшими.

Загнившим считали семя с явными признаками размягчения, изменением цвета (например, побурение, почернение), наличием видимых гиф грибов или плесневого налета на поверхности / внутри, и утратившее жизнеспособность.

На основе этих наблюдений рассчитывали среднюю всхожесть (%) и частоту загнивания семян (%) для каждой повторности, а затем определяли холодоустойчивость (%). Всхожесть семян, частоту загнивания и холодоустойчивость рассчитывали по формулам (3), (4) и (5) соответственно:

$$\text{Всхожесть (\%)} = \left(\frac{\text{Общее количество нормально проросших семян}}{\text{Общее количество семян в пробе}}\right) \cdot 100; \quad (3)$$

$$\text{Частота загнивания (\%)} = \left(\frac{\text{Общее количество загнивших семян}}{\text{Общее количество семян в пробе}}\right) \cdot 100; \quad (4)$$

$$\text{Холодоустойчивость (\%)} = \left(\frac{\text{Всхожесть семян при низкой температуре}}{\text{“Всхожесть семян при 25 °C}}\right) \cdot 100. \quad (5)$$

Для группы восстановления после низкотемпературного стресса рассчитывали дополнительно:

Изменение всхожести после восстановления (%) =
= Всхожесть на 4-е сутки восстановительного периода – (6)
Всхожесть на 10-е сутки в группе постоянной температуры 25 °C.

Изменение частоты загнивания семян после восстановления (%) =
Частота загнивания на 4-е сутки восстановительного периода – (7)
Частота загнивания на 10-е сутки в группе постоянной
температуры 25 °C.

Положительное значение указывает на увеличение всхожести / частоты загнивания после восстановления, а отрицательное — на уменьшение.

Оценка скорости роста корневой системы при оптимальной и низкой температурах. Данный этап эксперимента также проводился по стандарту ГОСТ 12038-84 [15] с применением рулонного метода проращивания. Для каждого исследуемого образца и каждого температурного режима (25 и 14 °С) использовали по 3 повторности по 15 семян. Семена равномерно распределяли на увлажненной фильтровальной бумаге стандартного размера. Бумагу аккуратно сворачивали в рулон и устанавливали вертикально в высоком мерном стакане с небольшим количеством стерильной дистиллированной воды на дне (1—2 см). Верх рулона оставался открытым. Рулоны помещали в термостатированную камеру при слабом рассеянном освещении. Уровень воды поддерживали постоянным. После проращивания рулон осторожно разворачивали. Длину главного корня каждого проросшего семени измеряли линейкой с точностью 1 мм. Измерения длины первичного корня (мм) проводили трижды: на 3-и и 7-е сутки культивирования при постоянной температуре 25 ± 1 °С, а также на 13-е сутки после переноса проростков в условия низкой температуры 14 ± 1 °С.

Скорость роста корней в оптимальных условиях (25 °С) рассчитывали как средний суточный прирост за период с 3-х по 7-е сутки. Скорость роста корней в условиях холодового стресса (14 °С) определяли как средний суточный прирост с 7-х по 13-е сутки.

Относительная способность роста корней при низкотемпературном стрессе — показатель, оценивающий способность корневой системы поддерживать рост при холодовом стрессе в процентах относительно ее ростового потенциала при оптимальной температуре. Скорость роста корневой системы и относительную способность роста корней при низкотемпературном стрессе рассчитывали по формулам (8) и (9) соответственно:

$$Vt\ (\%) = \left(\frac{Lt2 - Lt1}{t2 - t1}\right), \qquad (8)$$

где Lt1, Lt2 — длина корня на момент измерений в дни t1 и t2; t2–t1 — интервал между измерениями (сут).

$$\text{Относительная скорость роста корня (\%)} = \left(\frac{\text{Скорость роста корня при 14 °C}}{\text{Скорость роста корня при 25 °C}}\right) \cdot 100. \qquad (9)$$

Статистическая обработка опытных данных включала использование программ Excel, SPSS для корреляционного анализа и анализа значимости.

Результаты

1. *Влияние низкой температуры на жизнеспособность пыльцы образцов вигны.*

В таблице 2 показаны достоверные различия ($p < 0{,}05$) в жизнеспособности пыльцы различных образцов вигны при 25 °С. Наибольшая жизнеспособность отмечена у образца Блэк Сид (88,4 %), наименьшая — у образца Юньнаньская (10,2 %). При низкотемпературном стрессе (6 °C) максимальная всхожесть пыльцы зафиксирована у образца Кудесница (57,9 %), тогда как образец Юньнаньская не прорастал (0 %). Показатели холодоустойчивости пыльцы демонстрируют: образец Zinder обладал максимальной устойчивостью (97,9 %), образец Юньнаньская — нулевой (0 %). Примечательно, что образцы с высокой жизнеспособностью при 25 °C (например, Блэк Сид и Кудесница) сохраняют высокую способность к прорастанию в условиях низкой температуры, однако образец Zinder (жизнеспособность 44,6 %) проявлял исключительную адаптивность к холоду. Корреляционный анализ выявил достоверную положительную связь между жизнеспособностью пыльцы при 25 и 6 °C ($r = 0{,}830$, $p < 0{,}01$), в то время как корреляция между жизнеспособностью при 25 °C и общей холодоустойчивостью пыльцы была менее выраженной ($r = 0{,}432$), что подчеркивает комплексный характер холодоустойчивости, не сводимый только к исходной жизнеспособности в оптимальных условиях.

Таблица 2

Ранжированные показатели жизнеспособности (при 25 и 6 °C) и холодостойкости пыльцы разных образцов вигны

Образцы	Прорастание пыльцы при 25 °C, %	Образцы	Прорастание пыльцы при 6 °C, %	Образцы	Холодостойкость по пыльце, %
8	↓88,4 ± 5,8a	9	↓57,9 ± 4,8a	4	↓97,9 ± 15,0a
9	81,7 ± 9,2ab	4	41,1 ± 2,6b	6	81,7 ± 10,1ab
5	70,8 ± 5,3b	5	40,2 ± 3,9b	9	73,8 ± 13,1abc
1	67,9 ± 3,1b	6	39,9 ± 7,0b	7	69,2 ± 13,4abc
6	48,9 ± 5,4c	8	34,4 ± 8,3bc	5	58,1 ± 9,7bc
4	44,6 ± 8,6c	1	32,9 ± 8,9bcd	10	50,9 ± 9,0bc
10	38,9 ± 2,8c	7	23,1 ± 2,8cd	1	48,9 ± 13,5bcd
7	34,3 ± 2,5c	10	19,1 ± 1,3d	8	40,4 ± 11,2cd
3	17,4 ± 1,3d	3	2,2 ± 1,0d	3	14,5 ± 7,7de
2	10,2 ± 0,6d	2	0,0 ± 0,0d	2	0,0 ± 0,0e

Примечание: 1 — Сибирский размер; *2* — Юньнаньская; *3* — Графиня; *4* — Zinder; *5* — Факир; *6* — Лилиана; *7* — Макаретти; *8* — Блэк Сид; *9* — Кудесница; *10* — Нежная. Разные буквы в одном столбце обозначают существенные различия при 0,05 % уровне значимости, одинаковые буквы — отсутствие различий; данные ранжированы по убыванию.

2. *Прорастание и загнивание семян при низких температурах.*

В таблице 3 при проращивании семян на фильтровальной бумаге при 25 °C всхожесть всех образцов была ≥72,2 %, частота загнивания ≤8,3 %, что свидетельствует о хорошем качестве семян. При 12 °C всхожесть достоверно снизилась (8,3—77,7 %). Образец Zinder показал наилучший результат (77,7 %), тогда как у образцов Макаретти, Блэк Сид, Кудесница всхожесть была ≤11,1 %. Частота загнивания 0 % во всех случаях, что указывает на ингибирование прорастания холодом без индукции загнивания. При 10 °C проросли только семена образца Zinder (15,6 %), всхожесть остальных образцов ≤8,9 %, частота загнивания сохранилась на уровне 0 %. Ранжирование по холодоустойчивости (соотношение всхожести при 12 / 25 °C): образец Zinder (80,0 %) > образец Факир (78,8 %) > образец Нежная (71,4 %). Образцы Юньнаньская, Графиня, Макаретти, Блэк Сид, Кудесница показали холодоустойчивость ≤15,4 %.

Таблица 3

Влияние температуры на всхожесть при разной температуре, частоту загнивания и холодоустойчивость семян при культивировании на фильтровальной бумаге (на 10-е сутки)

Образцы	25 °C		12 °C			10 °C		
	Всхожесть, %	Частота загнивания, %	Всхожесть, %	Частота загнивания, %	Холодоустойчивость, %	Всхожесть, %	Частота загнивания, %	Холодоустойчивость, %
1	94,4±2,7a	2,7±2,7a	47,2±7,3bc	0,0±0,0a	50,0±6,8bc	0,0±0,0b	0,0±0,0a	0,0±0,0b
2	100,0±0,0a	0,0±0,0a	52,7±7,3abc	0,0±0,0a	52,8±7,3abc	0,0±0,0b	0,0±0,0a	0,0±0,0b
3	97,2±2,7a	2,7±2,7a	41,6±4,8c	0,0±0,0a	42,9±6,2bcd	0,0±0,0b	0,0±0,0a	0,0±0,0b
4	97,2±2,7a	2,7±2,7a	77,7±5,5a	0,0±0,0a	80,0±11,7a	15,6±8,0a	0,0±0,0a	16,0±8,2a
5	91,7±4,8a	0,0±0,0a	72,2±12,1ab	0,0±0,0a	78,8±12,7b	4,4±4,4ab	0,0±0,0a	4,8±4,4ab
6	100,0±0,0a	0,0±0,0a	41,6±12,7c	0,0±0,0a	41,7±7,6cd	4,4±4,4ab	0,0±0,0a	4,4±4,4ab
7	72,2±5,5b	0,0±0,0a	11,1±5,5d	0,0±0,0a	15,4±6,1de	8,9±4,4ab	0,0±0,0a	12,3±6,1ab
8	88,9±5,5a	8,3±4,8a	8,3±4,8d	2,7±2,7a	9,4±4,8e	2,2±2,2b	0,0±0,0a	2,5±2,6ab
9	100,0±0,0a	0,0±0,0a	11,1±7,3d	0,0±0,0a	11,1±7,3e	4,4±4,4ab	0,0±0,0a	4,4±4,4ab
10	97,2±2,7a	0,0±0,0a	69,4±7,3abc	0,0±0,0a	71,4±7,2ab	2,2±2,2b	0,0±0,0a	2,3±2,2ab

Примечание: 1 — Сибирский размер; *2* — Юньнаньская; *3* — Графиня; *4* — Zinder; *5* — Факир; *6* — Лилиана; *7* — Макаретти; *8* — Блэк Сид; *9* — Кудесница; *10* — Нежная. Разные буквы в одном столбце обозначают существенные различия при 0,05 % уровне значимости, одинаковые буквы — отсутствие различий; данные ранжированы по убыванию.

В таблице 4 представлены результаты посева семян образцов вигны в почвенный субстрат.

Таблица 4

Показатели прорастания и загнивания семян различных образцов при постоянном культивировании в почве при 25 °C и восстановлении после низкотемпературного стресса (10 °C → 25 °C)

Образцы	Постоянное культивирование при 25°C				Восстановление при 25°C на 4-е сутки после 10-суточной инкубации при 10°C			
	Всхожесть на 5-е сутки, %	Частота загнивания на 5-е сутки, %	Всхожесть на 10-е сутки, %	Частота загнивания на 10-е сутки, %	Всхожесть, %	Изменение показателя всхожести семян после восстановления, %	Частота загнивания, %	Изменение показателя загнивания после восстановления, %
1	46,7±15,4ab	26,7±0,0b	60,0±3,3ab	20,0±4,2ef	43,3±23,3ab	–6,7	53,3±26,7abc	33,3
2	0,0±0,0c	26,7±0,0b	6,7±0,8e	60,0±0,0bc	20,0±13,3ab	13,3	56,7±10,0abc	–3,3

Окончание табл. 4

Образцы	Постоянное культивирование при 25°С				Восстановление при 25°С на 4-е сутки после 10-суточной инкубации при 10°С			
	Всхожесть на 5-е сутки, %	Частота загнивания на 5-е сутки, %	Всхожесть на 10-е сутки, %	Частота загнивания на 10-е сутки, %	Всхожесть, %	Изменение показателя всхожести семян после восстановления, %	Частота загнивания, %	Изменение показателя загнивания после восстановления, %
3	13,3±7,0bc	26,7±3,8b	26,7±2,4cd	53,3±4,0c	20,0±2,0ab	–6,7	73,3±26,7abc	20,0
4	80,0±10,2a	33,3±0,0a	53,3±2,9b	33,3±1,6de	0,0±0,0b	–53,3	100,0±0,0a	66,7
5	86,7±13,3a	0,0±0,0e	66,7±2,8a	13,3±2,8f	73,3±26,7a	6,6	26,7±26,7c	13,4
6	46,7±23,1ab	6,7±0,0d	66,7±4,1a	26,7±3,3ef	53,3±13,3ab	–13,4	30,0±10,0bc	3,3
7	33,3±19,3bc	0,0±0,0e	33,3±2,2c	46,7±4,9cd	46,7±26,7ab	13,4	46,7±20,0abc	0,0
8	26,7±11,5bc	6,7±0,0d	20,0±0,0d	80,0±2,4a	40,0±13,3ab	20,0	60,0±13,3abc	–20,0
9	6,7±6,7bc	20,0±3,9c	20,0±1,6d	73,3±2,2ab	50,0±23,3ab	30,0	50,0±23,3abc	–23,3
10	6,7±3,8bc	33,3±0,0a	0,0±1,4e	86,7 ±0,8a	6,7±6,7b	6,7	93,3±6,7ab	6,6

Примечание: 1 — Сибирский размер; *2* — Юньнаньская; *3* — Графиня; *4* — Zinder; *5* — Факир; *6* — Лилиана; *7* — Макаретти; *8* — Блэк Сид; *9* — Кудесница; *10* — Нежная. Разные буквы в одном столбце обозначают существенные различия при 0,05 % уровне значимости, одинаковые буквы — отсутствие различий; данные ранжированы по убыванию.

Группа при постоянной температуре 25 °С. На 10-й день всхожесть составила 60,0—66,7 % (образцы Сибирский размер, Zinder, Факир, Лилиана), в образце Нежная всходов не было. Процент загнивания семян находился в обратной зависимости со всхожестью (например, в образце Нежная загнивание достигло 86,7 %).

Группа после стрессового воздействия при температуре 10 °С и восстановления. Образец Факир показал самую высокую всхожесть после восстановления (73,3 %) и самый низкий процент загнивания (26,7 %). Всхожесть образца Zinder после восстановления составила 0 %, а процент загнивания достиг 100 %, что указывает на его плохую восстановительную способность и предрасположенность к поражению патогенами. Изменение после восстановления показало значительное увеличение загнивания семян у образцов Сибирский размер, Графиня, Zinder (+20,0—+66,7 %), тогда как у образцов Блэк Сид и Кудесница процент загнивания снизился (–20,0—–23,3 %). Это говорит о том, что низкотемпературный стресс может активировать гены, влияющие на восприимчивость к патогенам у части образцов.

Ростовая реакция корней на низкую температуру.

В таблице 5 показана скорость роста корней при 25 °С. У образца Zinder — отмечена самая высокая (15,1 мм/сут), а у сорта Факир — самая низкая (3,8 мм/сут) скорость роста корней при оптимальной температуре.

Таблица 5

Анализ скорости роста корневых систем разных образцов при 25 и 14 °C и их корреляции

Образцы	Постоянное культивирование при 25 °C		Перенос: 25 °C → 14 °C	Анализ скорости роста		
	Длина корня на 3-и сутки, мм	Длина корня на 7-и сутки, мм	Длина корня на 13-и сутки, мм	Скорость роста при оптимальной температуре, мм/сутки	Скорость роста при низкой температуре, мм/сутки	Соотношение: низк. темп. / оптим. темп., %
1	18,5±0,9bc	62,9±4,4abcd	67,1±4,6bcd	11,1±0,9ab	0,7±0,0bc	6
2	24,6±0,1ab	60,5±8,5bcd	67,1±11,1bcd	9,0±2,2abc	1,1±0,4bc	12
3	26,8±1,8a	68,7±4,2abc	72,9±6,0abc	10,5±0,6ab	0,7±0,3bc	7
4	26,0±0,1a	86,5±3,9a	89,5±5,4a	15,1±1,0a	0,5±0,3c	3
5	10,5±0,2d	25,5±8,8e	43,5±2,7e	3,8±2,2c	3,0±1,0a	79
6	22,2±2,0ab	55,9±2,7bcd	55,9±3,3de	8,4±1,2bc	0,0±0,0c	0
7	21,3±1,6ab	71,9±1,9ab	75,5±4,4ab	12,7±0,1ab	0,6±0,0bc	5
8	13,5±0,2cd	49,0±13,3bcde	68,2±3,4bcd	8,9±3,4abc	3,2±0,0a	36
9	19,0±3,9bc	44,7±3,4de	45,3±3,8e	6,4±0,1bc	0,1±0,1c	2
10	8,6±2,4d	46,2±7,7cde	58,2±3,9cde	9,4±2,5abc	2,0±0,6ab	21

Примечание: 1 — Сибирский размер; *2* — Юньнаньская; *3* — Графиня; *4* — Zinder; *5* — Факир; *6* — Лилиана; *7* — Макаретти; *8* — Блэк Сид; *9* — Кудесница; *10* — Нежная. Разные буквы в одном столбце обозначают существенные различия при 0,05 % уровне значимости, одинаковые буквы — отсутствие различий; данные ранжированы по убыванию.

Скорость роста при низкой температуре (14 °C) у сортов Факир и Блэк Сид значительно выше других образцов (3,0~3,2 мм/сут), тогда как рост образца Лилиана полностью остановился (0 мм/сут).

Соотношение скоростей роста (Низкая темп. / Оптимальная темп.): образцы Факир (79 %) и Блэк Сид (36 %) обладают наибольшей устойчивостью корневой системы к низкой температуре; соотношение для образцов Zinder и Кудесница ≤3 %, что указывает на сильную зависимость роста их корней от температуры.

Взаимосвязь холодоустойчивости и устойчивости к заболеваниям.

Результаты корреляционного анализа в таблице 6 показали наличие множества значимых связей ($p < 0,05$ или $p < 0,01$) между показателями холодоустойчивости образцов вигны и показателями, сопрженными с заболеваниями (загниванием семян), а именно связь холодоустойчивости пыльцы и характеристик семян.

Жизнеспособность пыльцы при 6 °C (B) имела достоверную положительную корреляцию с холодоустойчивостью пыльцы (C) ($r = 0,805$, $p < 0,01$), что согласуется с логикой расчета ее холодоустойчивости (формула 2): чем выше жизнеспособность пыльцы при низкой температуре, тем выше ее холодоустойчивость.

Таблица 6

Результаты корреляционного анализа

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
A	1																							
B	0,830**	1																						
C	0,432	0,805**	1																					
D	–0,053	0,046	–0,136	1																				
E	0,41	0,033	–0,15	–0,108	1																			
F	–0,32	–0,159	0,056	0,432	–0,307	1																		
G	0,507	0,103	–0,155	–0,207	0,878**	–0,472	1																	
H	–0,299	–0,147	0,07	0,375	–0,31	0,997**	–0,472	1																
I	0,043	0,437	0,787**	–0,271	–0,074	0,183	–0,145	0,198	1															
J	0,009	0,382	0,757*	–0,425	–0,098	0,092	–0,141	0,115	0,985**	1														
K	0,312	0,467	0,588	–0,156	0,042	0,461	–0,092	0,501	0,581	0,543	1													
L	–0,371	–0,294	–0,195	0,607	–0,018	0,459	–0,298	0,413	–0,057	–0,15	–0,309	1												
M	0,294	0,471	0,531	–0,052	–0,06	0,256	–0,218	0,284	0,331	0,302	0,861**	–0,375	1											
N	–0,025	–0,207	–0,312	0,064	0,231	–0,391	0,418	–0,421	–0,245	–0,234	–0,799**	0,275	–0,931**	1										
O	0,55	0,466	0,16	–0,289	–0,139	–0,369	0,072	–0,329	–0,191	–0,138	0,3	–0,832**	0,505	–0,427	1									
P	0,224	–0,041	–0,399	–0,225	–0,072	–0,623	0,296	–0,613	–0,529	–0,448	–0,607	–0,412	–0,554	0,557	0,439	1								
Q	–0,31	–0,265	–0,005	0,207	0,246	0,355	0,015	0,328	0,283	0,225	–0,176	0,798**	–0,456	0,446	–0,941**	–0,432	1							
R	–0,259	–0,04	0,301	0,127	–0,001	0,709*	–0,397	0,713*	0,5	0,436	0,622	0,462	0,495	–0,572	–0,443	–0,943**	0,479	1						
S	–0,551	–0,277	–0,061	0,132	–0,057	–0,084	–0,308	–0,114	0,24	0,229	–0,07	0,258	0,117	–0,227	–0,321	–0,432	0,13	0,342	1					
T	–0,505	–0,281	0,127	–0,132	0,142	0,014	–0,169	–0,005	0,465	0,474	0,016	0,415	0,03	–0,098	–0,622	–0,631	0,525	0,577	0,787**	1				
U	–0,439	–0,373	0,011	–0,257	0,39	0,079	0,097	0,07	0,448	0,463	0,096	0,357	–0,04	–0,023	–0,672*	–0,606	0,618	0,59	0,59	0,919**	1			
V	–0,404	–0,243	0,198	–0,252	0,221	0,061	–0,07	0,05	0,504	0,523	0,057	0,425	–0,02	–0,017	–0,675*	–0,63	0,640*	0,604	0,553	0,949**	0,942**	1		
W	0,574	0,153	–0,23	–0,122	0,402	–0,024	0,616	0,007	–0,245	–0,248	0,053	–0,296	–0,248	0,339	0,266	0,56	–0,087	–0,439	–0,787*	–0,751*	–0,474	–0,615	1	
X	0,365	0,103	–0,132	–0,145	0,106	0,276	0,273	0,321	–0,138	–0,138	0,422	–0,456	0,173	–0,176	0,459	0,262	–0,325	–0,126	–0,682*	–0,736*	–0,466	–0,642*	0,862**	1

Примечание: A — жизнеспособность пыльцы при 25 °C; *B* — жизнеспособность пыльцы при 6 °C; *C* — холодостойкость пыльцы; *D* — процент проросших семян при 25 °C на 10 день на ФБ; *E* — процент загнивших семян при 25 °C на 10 день на ФБ; *F* — процент проросших семян при 12 °C на 10 день на ФБ; *G* — процент загнивших семян при 12 °C на 10 день на ФБ; *H* — холодостойкость семян при 12 °C на 10 день на ФБ; *I* – процент проросших семян при 10 °C на 10 день на ФБ; *J* — холодостойкость семян при 10 °C на 10 день на ФБ; *K* — процент проросших семян при 25 °C на 5 день на почве; *L* — процент загнивших семян при 25 °C на 5 день на почве; *M* — процент проросших семян при 25 °C на 10 день на почве; *N* — процент загнивших семян при 25 °C на 10 день на почве; *O* — процент проросших семян через 10 дней культивирования при 10 °C с переносом на 25 °C для восстановления (4-й день); *P* — изменение всхожести после восстановления; *Q* — процент загнивших семян через 10 дней культивирования при 10 °C перенести на 25 °C для восстановления (4-й день); *R* — изменение количества загнивших после восстановления; *S* — длина корней на 3-й день при постоянной температуре 25 °C; *T* — длина корней на 7-й день при постоянной температуре 25 °C; *U* — длина корней на 13-й день при переносе 25 °C→14 °C ; *V* — скорость роста корней при 25 °C; *W* — скорость роста корней при 14 °C; *X* — соотношение скоростей роста при низкой и оптимальной температуре; * — $p<0,05$; ** –$p<0,01$.

Холодоустойчивость пыльцы (C) имела достоверную положительную корреляцию как со всхожестью семян на фильтровальной бумаге при 10 °C (I) ($r = 0{,}787$, $p < 0{,}01$), так и с их холодоустойчивостью (J) ($r = 0{,}757$, $p < 0{,}05$). Это указывает на то, что образцы с высокой холодоустойчивостью пыльцы обладают и более высокой способностью семян к прорастанию в условиях холода, предполагая возможную синергию механизмов устойчивости к низким температурам у пыльцы и семян.

Связь холодного прорастания семян и загнивания.

Всхожесть семян на фильтровальной бумаге при 12 °C (F) имела достоверно положительную корреляцию с их холодоустойчивостью (H) ($r = 0{,}997$, $p < 0{,}01$), подтверждая обоснованность расчета холодоустойчивости семян (формула 5). При этом F имела достоверно отрицательную корреляцию с процентом загнивания на фильтровальной бумаге при 25 °C (E) ($r = -0{,}307$, $p < 0{,}05$). Это означает, что образцы с высокой способностью к прорастанию при низких температурах имеют меньший процент загнивания семян при оптимальной температуре, что косвенно отражает синергию между холодоустойчивостью и устойчивостью к болезням.

Всхожесть семян в почве при постоянной 25 °C через 10 дней (M) имела достоверно отрицательную корреляцию с процентом загнивания (N) ($r = -0{,}931$, $p < 0{,}01$) и достоверно положительную корреляцию с всхожестью через 5 дней (K) ($r = 0{,}861$, $p < 0{,}01$). Это показывает, что образцы с высокой способностью к прорастанию в почве имеют меньший риск загнивания и более стабильный процесс прорастания.

Связь восстановления после холода и загнивания.

Всхожесть после восстановления (после культивирования при 10 °C и переноса в 25 °C) (O) имела достоверно отрицательную корреляцию с процентом загнивания после восстановления (Q) ($r = -0{,}941$, $p < 0{,}01$). Кроме того, изменение показателя всхожести после восстановления (P) имело достоверно отрицательную корреляцию с изменением показателя загнивания после восстановления (R) ($r = -0{,}943$, $p < 0{,}01$). Это доказывает, что образцы с высокой способностью к восстановлению после холодового стресса имеют значительно более низкий процент загнивания, что свидетельствует о том, что образцы с высокой холодоустойчивостью одновременно обладают и большей устойчивостью к болезням (загниванию).

Связь роста корней и холодоустойчивости.

Длина корня после 7 дней культивирования при постоянной температуре 25 °C (T) имела достоверно положительную корреляцию с длиной корня после 13 дней режима переноса из 25 °C в 14 °C (U) ($r = 0{,}919$, $p < 0{,}01$). Это указывает, что образцы с хорошим ростом корней при оптимальной температуре способны поддерживать определенный рост и после холодового стресса, что демонстрирует стабильность устойчивости первичного корня к холоду.

Скорость роста корней при 14 °C (W) имела достоверную положительную корреляцию с соотношением скоростей роста (низкая темп. / оптимальная темп.) (X) ($r = 0{,}862$, $p < 0{,}01$), что соответствует логике расчета X (формула 9). При этом X имел достоверно положительную корреляцию со скоростью роста корней при 25 °C (V) ($r = 0{,}640$, $p < 0{,}05$). Это означает, что образцы с быстрым ростом корней при оптимальной температуре обладают и более высокой относительной способностью к росту при низкой температуре, демонстрируя лучшую адаптацию к холоду.

Показатели холодоустойчивости (такие как холодоустойчивость пыльцы, всхожесть семян при низкой температуре, скорость роста корней при низкой температуре) и загнивания семян в основном демонстрировали отрицательную корреляцию, при этом между многими показателями наблюдались синергетические связи. Это указывает на то, что устойчивость вигны к низким температурам и болезням, вероятно, регулируются общими механизмами. Среди них образцы Zinder (холодоустойчивость пыльцы 97,9 %) и Факир (всхожесть после восстановления 73,3 %) проявили высокую холодоустойчивость и низкий процент загнивания, что делает их потенциальным материалом для селекции на устойчивость к стрессам.

Заключение

У образцов вигны обнаружены значительные различия в устойчивости к низким температурам. Диапазон изменчивости изученных признаков был весьма широк: холодоустойчивость пыльцы составляла от 0 % (у образца Юньнаньская) до 97,9 % (у образца Zinder), всхожесть семян при низкой температуре — от 0 % (Сибирский размер, Юньнаньская, Графиня) до 77,7 % (Zinder), а скорость роста корней при низкой температуре — от 0 мм/сут (сорт Лилиана) до 3,2 мм/сут (сорт Блэк Сид). Наименьшие значения по комплексу признаков показал сорт Юньнаньская, тогда как образцы Zinder, Факир и Блэк Сид продемонстрировали максимальные показатели по различным аспектам холодоустойчивости.

Обнаружена достоверная отрицательная корреляция между устойчивостью к низким температурам и загниванием семян. Образцы с высокой холодоустойчивостью пыльцы характеризовались высокой всхожестью семян при низкой температуре и низким процентом загнивания. Образцы с высокой всхожестью после восстановления после холодового воздействия имели значительно более низкий процент загнивания. Так, у образца Факир процент загнивания после восстановления составил всего 26,7 %.

Выявлена синергия показателей холодоустойчивости пыльцы, семян и корневой системы. Холодоустойчивость пыльцы положительно коррелировала со всхожестью семян при низкой температуре. Образцы с хорошим ростом корней при оптимальной температуре сохраняли способность к росту и при низкой температуре. Это указывает на то, что устойчивость к низким температурам является результатом синергетического взаимодействия разных генетически детерминированных систем растительного организма.

Образцы Zinder и Факир продемонстрировали наилучшие комплексные показатели, сочетая высокую устойчивость к низким температурам и низкий процент загнивания. Они могут служить исходным материалом для селекции вигны на устойчивость к низкотемпературным стрессам в условиях Сибири.

Данное исследование обеспечивает теоретическую основу и практические рекомендации для комплексного улучшения устойчивости вигны к низким температурам и болезням.

Работа выполнена в рамках государственного задания ЦСБС СО РАН по проекту И126012336366-7 «Теоретические аспекты оценки и сохранения биоразнообразия с целью рационального использования природного и культурного генофонда растений».

Список литературы

1. *Idahosa D. O., Alika J. E., Omoregie A. U.* Genetic variability, heritability and expected genetic advance as indices for yield and yield components selection in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) // Academia arena. 2010. Vol. 2, №5. P. 22—26. doi: 10.15580/GJBS.2013.5.061313672.

2. *Фотев Ю. В.* К методике интродукции теплолюбивых овощных растений в Сибири // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2018. №4. С. 104—118. doi: 10.31677/2072-6724-2018-49-4-104-118.

3. *Thakur P., Kumar S., Malik J. A. et al.* Cold stress effects on reproductive development in grain crops: an overview // Environmental and Experimental Botany. 2010. Vol. 67, №3. P. 429—443. doi: 10.1016/j.envexpbot.2009.09.004.

4. *Hampton J. G., Conner A. J., Boelt B. et al.* Climate change: seed production and options for adaptation // Agriculture. 2016. Vol. 6, №3. P. 33. doi: 10.3390/agriculture6030033.

5. *Kakani V. G., Reddy K. R., Koti S. et al.* Differences in in vitro pollen germination and pollen tube growth of cotton cultivars in response to high temperature // Annals of Botany. 2005. Vol. 96, №1. P. 59—67. doi: 10.1093/aob/mci149.

6. *Srinivasan A., Saxena N. P., Johansen C.* Cold tolerance during early reproductive growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.): genetic variation in gamete development and function // Field Crops Research. 1999. Vol. 60, №3. P. 209—222. doi: 10.1016/S0378-4290(98)00126-9.

7. *Казыдуб Н. Г., Кузьмина С. П., Боровикова М. А. и др.* Зернобобовые культуры в Западной Сибири (фасоль и бобы овощные, нут): биология, генетика, селекция, использование. Новосибирск, 2020.

8. *Yadav S. K.* Cold stress tolerance mechanisms in plants. A review // Agronomy for Sustainable Development. 2010. Vol. 30, №3. P. 515—527. doi: 10.1051/agro/2009050.

9. *Atkinson N. J., Urwin P. E.* The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field // Journal of Experimental Botany. 2012. Vol. 63, №10. P. 3523—3543. doi: 10.1093/jxb/ers100.

10. *Emechebe A. M., Lagoke S. T. O.* Recent advances in research on cowpea diseases // Challenges and Opportunities for Enhancing Sustainable Cowpea Production. Ibadan, 2002. P. 94—123.

11. *Bita C. E., Gerats T.* Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops // Frontiers in Plant Science. 2013. Vol. 4. P. 273. doi: 10.3389/fpls.2013.00273.

12. *Adzhieva V. F., Babak O. G., Shoeva O. Yu. et al.* Molecular genetic mechanisms of the development of fruit and seed coloration in plants // Russian Journal of Genetics: Applied Research. 2016. Vol, 6, №5. P. 537—552. doi: 10.1134/s2079059716050026.

13. *Khaleghi E., Karamnezhad F., Moallemi N.* Study of pollen morphology and salinity effect on the pollen grains of four olive (Olea europaea) cultivars // South African Journal of Botany. 2019. Vol, 127. P. 51—57. doi: 10.1016/j.sajb.2019.08.031.

14. *Фотев Ю. В*. Оценка холодостойкости коллекционных образцов момордики (Momordica charantia L.) по прорастанию пыльцы при низкой температуре in vitro // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2022. Т. 183, № 3. С. 39—47. doi: 10.30901/2227-8834-2022-3-39-47.

15. *ГОСТ* 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М., 1995.

16. *Алексейчук Г. Н., Ламан Н. А.* Физиологическое качество семян сельскохозяйственных культур и методы его оценки. Минск, 200**5.**

Об авторах

Сунь Цзяпин — асп., Новосибирский государственный университет, Россия.
E-mail: t.sun1@g.nsu.ru

Юрий Валентинович Фотев — канд. сельскохозяйственных наук, ст. науч. сотр., Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Россия; Новосибирский государственный аграрный университет, Россия.
E-mail: fotev_2009@mail.ru
SPIN-код: 2741-5163

***J. Sun*[1], *Y. V. Fotev*[2, 3]**

THE RELATIONSHIP BETWEEN RESISTANCE OF COWPEA (*VIGNA UNGUICULATA*) ACCESSIONS TO LOW TEMPERATURES AND DISEASES IN SIBERIA

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
[2] Central Siberian Botanical Garden SB RAS, Novosibirsk, Russia
[3] Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia
Received 21 October 2025
Accepted 12 December 2025
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-6

To cite this article: Sun J., Fotev Y. V., 2026, The relationship between resistance of cowpea (*Vigna unguiculata*) accessions to low temperatures and diseases in Siberia, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural Sciences*, № 1. P. 85—102. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-6.

The aim of the study is to investigate the relationship between the cold tolerance of Vigna samples and their susceptibility to pathogenic micromycetes. Ten Vigna unguiculata *samples were used. Pollen viability in vitro was assessed in a 20 % PEG 6000 solution at 25 °C for 3 hours (control) and at 6 °C for 24 hours (cold tolerance assessment). Seed germination under low temperatures was evaluated by germinating seeds on filter paper at 10, 12, and 25 °C (control), as well as in soil at a constant 25 °C and under a regime of 10 °C for 10 days followed by 25 °C. Root system adaptability to low temperatures was determined by growth rate under a*

25 °C → 14 °C regime and by the ratio of growth rates at low versus optimal temperatures. Correlations between traits were analyzed using SPSS and Excel. The study revealed significant differences among Vigna samples in cold tolerance and susceptibility to pathogenic micromycetes. A significant negative correlation was found between pollen cold tolerance (0 – 97.9 %) and seed infection rate, as well as between seed germination at low temperature (0 – 77.7 %) and infection percentage. Pollen cold tolerance showed a significant positive correlation with seed germination on filter paper at 10 °C ($r = 0.787$; $p < 0.01$) and with overall seed cold tolerance ($r = 0.757$; $p < 0.05$). Samples with high germination after recovery from cold exposure exhibited lower rates of seed rot. Furthermore, the study identified correlations among the cold tolerance of pollen, seeds, and the root system. The Zinder and Fakir varieties demonstrated the best overall performance, combining high cold tolerance with low seed rot rates. This research provides a theoretical basis for the selection of Vigna cultivars for stress resistance.

Keywords: *Vigna unguiculata*, cowpea, resistance to micromycetes, germination, seeds, pollen in vitro, cold resistance

The authors

Jiaping Sun, PhD student, Novosibirsk State University, Russia.
E-mail: t.sun1@g.nsu.ru

Dr Yuri V. Fotev, Senior Researcher, Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia; Novosibirsk State Agrarian University, Russia.
E-mail: fotev_2009@mail.ru
SPIN code: 2741-5163

УДК 60.606

А. А. Калошин

ХАРАКТЕРИСТИКА И ФАКТОРЫ ПАТОГЕННОСТИ *PSEUDOMONAS AERUGINOSA*

Научно-исследовательский институт вакцин и сывороток
им. И. И. Мечникова, Москва, Россия
Поступила в редакцию 21.10.2025 г.
Принята к публикации 09.12.2025 г.
doi 10.5922/vestniknat-2026-1-7

Для цитирования: *Калошин А. А.* Характеристика и факторы патогенности *Pseudomonas aeruginosa* // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2026. №1. С. 95—113. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-7.

Обзор посвящен Pseudomonas aeruginosa *— условно-патогенному микроорганизму, играющему важную роль в этиологии гнойно-воспалительных заболеваний, которые обычно возникают в виде вторичных осложнений, развивающихся на фоне ослабления организма. Тяжелое течение синегнойной инфекции и широкий спектр вызываемых ею повреждений обусловлены множеством факторов вирулентности.* P. aeruginosa *характеризуется синтезом ферментов и экзотоксинов, оказывающих разрушительное воздействие на ткани организма-хозяина и компоненты иммунной системы.* P. aeruginosa *способна к образованию биопленки, обеспечивающей лучшую адаптацию к окружающей среде. Бактерия покрыта защитной капсулой, сформированной липополисахаридом, который оказывает токсическое и пирогенное действие. Патоген имеет жгутики и пили, играющие важную роль в колонизации и распространении. Наружная мембрана бактерии выполняет защитную и транспортную функции. Белки наружной мембраны имеют большое значение в клеточном метаболизме, обеспечивая транспортировку широкого спектра веществ, включая ионы, аминокислоты, глюкозу, железо и фосфаты, необходимые для поддержания жизнедеятельности клетки. Помимо этого, они активно участвуют в выведении антибиотиков, обеспечивая защиту клетки от воздействия чужеродных веществ. Липопротеины стабилизируют наружную мембрану и взаимодействуют с другими мембранными белками.* P. aeruginosa *формирует везикулы, которые участвуют в обмене биохимическими сигналами и взаимодействии с клетками хозяина. Настоящий обзор позволяет утверждать, что для разработки эффективных методов борьбы с синегнойной инфекцией надо учитывать все особенности* P. aeruginosa *и механизмы ускользания от иммунного ответа.*

Ключевые слова: *Pseudomonas aeruginosa*, инфекция, факторы патогенности, иммунный ответ

Характеристика и распространение синегнойной инфекции

Pseudomonas aeruginosa (синегнойная палочка) — условно-патогенная грамотрицательная бактерия, широко встречается в окружающей среде, включая почву и водные ресурсы; представляет собой одну из причин гнойно-воспалительных процессов у людей и животных. Данный возбудитель способен к колонизации различных органов и тканей, а также к развитию системных заболеваний. Широкое распространение *P. aeruginosa* связано с чрезвычайно высокой резистентностью к различным неблагоприятным факторам внешней среды, включая дезинфицирующие средства, используемые в медицинских учреждениях [1—4].

В основном синегнойная инфекция вызывает осложнения у больных с ослабленным иммунитетом, возникающим в результате перенесенных заболеваний, травм и применения агрессивных методов лечения (химиотерапия, лучевая терапия и др.). Инфицирование *P. aeruginosa*, как и рядом других условно-патогенных микроорганизмов (*Klebsiella pneumoniae, Acinetobacter baumannii, Enterobacter* spp., *Proteus* spp. и *Escherichia* coli*)* — одна из основных проблем в отделениях реанимации и интенсивной терапии, где сконцентрированы тяжелобольные пациенты. Поэтому инфекции, вызываемые этими патогенами, называют внутрибольничными [5]. Проведение масштабного ретроспективного анализа с 1996 по 2010 г. показало, что в лечебных учреждениях США синегнойный сепсис развивался с частотой от 3,1 до 7,6 случаев на 10 000 пациентов при сроках пребывания в стационаре от 6 до 19 дней. Смертность составила от 10 до 26 %, что является одним из самых высоких показателей в развитых странах мира [6]. Ряд исследователей отмечает, что смертность от сепсиса, вызываемого грамотрицательными бактериями в среднем в мире составляет более 60 %. Существенный вклад в эту статистику вносит синегнойная инфекция. В целом 75 % случаев гибели тяжело травмированных пациентов вызвано септическим поражением [7].

P. aeruginosa, наряду с другими грамотрицательными бактериями, наносит существенный ущерб здоровью пациентов в ожоговых стационарах. Инфицирование происходит, как правило, в ранний постожоговый период [8; 9]. Конкретное соотношение между условно-патогенными возбудителями зависит от региона и условий стационара. Этот показатель может существенно изменяться по годам и часто имеет волнообразный характер. Например, в одном из крупных госпиталей Турции в период с 2011 по 2013 г. было проведено исследование, посвященное анализу инфекционных осложнений у ожоговых пациентов, которое выявило, что *P. aeruginosa* занимала третье место (12 %) после *A. baumannii* (23,6 %) и коагулазо-отрицательных стафилококков (13,6 %). При этом показано, что *P. aeruginosa* обладала большей резистентностью к антибактериальным препаратам [10]. По результатам исследований, проведенных в 2019 г. в Иране, первое место среди внутрибольничных инфекций заняла *P. aeruginosa* (24,91 %), опередив *S. aureus* и *A. baumannii* [11]. У значительной доли ожоговых пациентов, пораженных *P. aeruginosa*, обнаруживается коинфекция *K. pneumoniae* или *A. baumannii.* В то же время *P. aeruginosa* редко образует сообщества с *S. aureus* и встречается чаще с его мультирезистентными изолятами [11—13]. Устойчивость к антибактериальным препаратам у *P. aeruginosa* коррелирует со способностью образовывать биопленку, которая в большинстве случаев формируется при поражении ожоговых ран. По некоторым данным, не менее 80 % изолятов из внешней среды и более 95 % изолятов, циркулирующих в клинике, способны к формированию биопленки [14].

Тяжелая ситуация возникает при подключении пациентов к системе искусственной вентиляции легких, когда происходит инфицирование внутрибольничными микроорганизмами, что напрямую зависит от длительности процедуры. Известно, что треть осложнений после проведенной искусственной вентиляции легких в виде трахеобронхитов и пневмоний (ИВЛ-ассоциированная пневмония) вызваны синегнойной палочкой [15; 16]. Согласно исследованию, проведенному в одном из военных госпиталей США, где проходили лечение солдаты, получившие ранения в Ираке и Афганистане, большинство пациентов (83,3 %) заболевали внутрибольничной пневмонией после искусственной вентиляции легких. Больше половины этих больных были инфицированы грамотрицательными микроорганизмами, в том числе *P. aeruginosa* [17].

P. aeruginosa относят к боевым инфекциям, поскольку она сопровождает практически все виды ранений. Как правило, в этом случае гнойно-септические заболевания встречаются в несколько раз чаще, чем в гражданских лечебных стационарах, что связано с условиями и сроками оказания первой медицинской помощи. Наиболее часто *P. aeruginosa* вызывает осложнения при ожогах, проникающих ранениях черепа и грудной клетки [18; 19]. Доля осложнений, вызываемых синегнойной инфекцией, возрастает в течение развития раневого процесса. Это связано с тем, что в первые дни после перенесенной травмы преобладают сапрофитные микроорганизмы, обладающие относительно низкой устойчивостью к антибиотикам, а затем на их фоне развиваются более опасные резистентные патогены, в том числе *P. aeruginosa* [20].

В настоящее время в клинике появляется все больше мультирезистентных (устойчивых к трем и более антибиотикам) штаммов грамотрицательных микроорганизмов, среди которых лидирует *P. aeruginosa,* являясь причиной высокой смертности пациентов с бронхолегочными заболеваниями [21—23]. На развитие резистентности микроорганизмов оказывает влияние нерациональное использование антибиотиков и дезинфектантов. Распространенность устойчивых к тем или иным антимикробным средствам существенно отличается в разных географических регионах и в разных стационарах. Это связано со спектром используемых антибиотиков, а также с рядом факторов, таких как уровень медицины, профиль медицинского учреждения, состояние экологии, возраст пациентов и др. [24; 25]. Например, частота встречаемости клинических изолятов *P. aeruginosa*, резистентных к метициллину к 2016 г. составляла 7,2—36,0 % в Азии и Океании; 20,0—45,2 % в Северной Америке и 5,9—33,0 % в Европе [24]. Устойчивость синегнойной палочки, в том числе ко вновь разрабатываемым антибиотикам, значительно возрастает от года к году [26—28].

Синегнойная инфекция занимает первое место среди грамотрицательных бактерий при отитах, когда происходит хронизация процесса и быстрое развитие мультирезистентности к применяемым антибиотикам, что делает невозможным эрадикацию патогена [29; 30]. *P. aeruginosa* встречается среди возбудителей инфекций мочевыводящих путей и характеризуется тяжелым течением с возникновением циститов, пиелонефритов и простатитов. Часто источником синегнойной инфекции выступают катетеры [31; 32]. Очень серьезные поражения возникают при кератите, вызываемом синегнойной палочкой, контаминация которой может происходить при микротравмах, наносимых контактными линзами [33]. Довольно часто *P. aeruginosa* идентифицируется среди возбудителей перитонита, который возникает как осложнение полостных операций [34]. *P. aeruginosa* часто занимает лидирующее положение среди причин кожных инфекций, которые являются осложнениями при нарушении барьерных свойств эпидермиса, в том числе при псориазах и дерматитах, а также поражает ногти, вызывая так называемый синдром «зеленого ногтя» [35; 36]. Серьезные поражения вызывает синегнойная инфекция при лихорадочном язвенно-некротическом варианте болезни Мухи-Габермана, образуя большие язвы по всему телу, приводя в итоге к летальному исходу [37]. Синегнойная инфекция может стать причиной диареи, особенно у детей в возрасте до пяти лет. Детская диарея, вызванная *P. aeruginosa*, встречается в разной степени тяжести у чуть менее 1 % детей и чаще всего начинается после приема антибиотиков, угнетающих нормальную микробиоту кишечника [38].

Очень серьезную проблему представляет синегнойная инфекция при муковисцидозе. Одно из проявлений этого наследственного заболевания — сгущение секрета в бронхолегочной системе, что создает благоприятные условия для колонизации патогенными микроорганизмами, среди которых *P. aeruginosa* занимает первое место, вытесняя остальные бактерии. Сложность лечения синегнойной инфекции при муковисцидозе заключается в том, что *P. aeruginosa* образует биопленку, устойчивую ко всем видам антибактериальной терапии. Пациенты с таким течением заболевания обычно не доживают до взрослого возраста [39—41].

P. aeruginosa выделяют как одну из основных суперинфицирующих бактерий при SARS-CoV-2. Как правило, инфицирование происходит уже в стационаре, а искусственная вентиляция легких является одним из серьезных факторов этого нежелательного события. Вторичная бактериальная коинфекция обычно характеризуется высокими уровнями резистентности к антибиотикам и зачастую становится причиной смерти пациентов [42—44]. *P. aeruginosa* способна эффективно колонизировать и развиваться в среде, инфицированной SARS-CoV-2. При этом в бактериях происходит изменение биосинтеза, что сопровождается чрезмерной продукцией компонентов внеклеточного матрикса и уменьшением образования жгутиков с формированием мощной биопленки [45; 46].

Экзотоксины

Причины тяжелого течения заболевания при синегнойной инфекции связаны с тем, что патогенез инфекций, вызываемых *P. aeruginosa*, сложен и связан с обилием факторов вирулентности возбудителя. Для разрушения тканей организма хозяина бактериальная клетка выделяет ряд ферментов и экзотоксинов, что способствует быстрой инвазии патогена. Сильными и опасными является экзотоксины А и S. Около 90 % клинических изолятов *P. aeruginosa* синтезируют эти токсины и их наличие коррелирует с тяжестью заболевания [47—49]. На примере ожоговых больных показано, что гены экзотоксинов А и S экспрессируются у мультирезистентных к антибиотикам изолятов [47; 50]. Белок экзотоксина А состоит из трех функциональных доменов. Первый необходим для взаимодействия с поверхностью клеток-мишеней. Второй обеспечивает перенос токсина в цитозоль клеток. Третий формирует цитотоксический активный центр, ингибирующий белковый синтез и приводящий к апоптозу пораженной клетки. Секретируемый бактерией во внешнюю среду, экзотоксин А распространяется в кровотоке всего организма, осуществляя дистанционное воздействие [50—52]. Секреция экзотоксина S осуществляется по другому принципу. Он вводится бактерией при непосредственном контакте с клеткой макроорганизма с использованием аппарата системы секреции типа III (T3SS), который функционирует в качестве канала («молекулярного шприца»), позволяющего осуществлять прямую передачу факторов вирулентности в цитоплазму клетки-мишени. Таким способом создаются условия, позволяющие предотвратить контакт молекул токсина с факторами иммунной системы [53]. Система секреции T3SS, которой обладают все грамотрицательные бактерии, предназначена для доставки в цитозоль клеток-хозяев множества эффекторных белков, ответственных за вирулентность, повреждение тканей и цитотоксичность [54; 55]. В результате воздействия экзотоксина S происходит нарушение актинового цитоскелета эукариотический клетки. Показано, что экзотоксин S индуцирует апоптоз у нейтрофилов, приводя к прекращению фагоцитоза [50; 56; 57].

У *P. aeruginosa* так же существует ряд других экзотоксинов: T, U и Y, которые по аналогии с экзотоксином S, впрыскиваются бактерией в клетки-мишени [48; 58]. Экзотоксин T схож по строению и действию с экзотоксином S и он также изменяет актиновый цитоскелет, ингибирует цитокинез, индуцирует различные формы апоптотической гибели клеток [59]. Экзотоксин U в своей структуре содержит основной домен, представляющий собой фосфолипазу A2, благодаря которой он обладает быстрой некротической цитотоксичностью [60; 61]. Интересно, что фосфолипазы A2, которые широко распространены в арсенале факторов патогенности различных бактерий [61], являются одними из основных токсических компонентов яда змей [62]. Экзотоксин Y — нуклеотидилциклаза, которая способствует разрушению микротрубочек с образованием щелей между эндотелиальными клетками. В результате происходит нарушение целостности эндотелиального барьера, что приводит к отеку тканей. Экзотоксин Y находится в бактериальной клетке в неактивном состоянии, однако при попадании в эукариотическую клетку происходит его активирование [63]. Замечено, что экзотоксин Y более распространен у изолятов, продуцирующих биопленки [58].

Важное наблюдение было сделано в нашей лаборатории при получении экзотоксина А. При культивировании *P. aeruginosa* в традиционных питательных средах, таких как мясопептонный бульон, пептонный бульон и гидролизат рыбной муки, отмечали значительный рост бактериальной массы, однако токсичность культуральной жидкости оставалась относительно низкой. В противоположность этому, при использовании среды RPMI 1640 (с добавлением 5%-ной сыворотки), предназначенной для культивирования эукариотических клеток, несмотря на умеренный прирост биомассы, наблюдали значительную концентрацию экзотоксинов, в особенности экзотоксина А [64]. Вероятно, среда RPMI 1640, разработанная для имитации условий макроорганизма, содержит факторы, стимулирующие синтез бактериальных экзотоксинов.

Протеолитические ферменты

Кроме токсинов, для успешной инвазии, синегнойная палочка выделяет ряд протеолитических ферментов. Основными являются эластаза А, эластаза В, щелочная фосфотаза, протеаза IV, фосфолипаза С, а также липазы А, В и С. Эластазы играют важную роль в расщеплении коллагена и фибрина, разрушая межклеточное вещество соединительной ткани, способствуя диссеминации патогена из первичного очага под кожей и под базальной мембраной слизистых оболочек. Эластазы специфически расщепляют иммуноглобулины, цитокины и хемокины, антимикробные пептиды, факторы комплимента и поверхностные белки, тромбин и интерфероны, подавляя ответ организма хозяина на инфекцию [65; 66]. Эластаза А может частично модулировать воспаление легких путем усиления продукции интерлейкина 8 фибробластами легкого, что приводит к повреждению легких во время хронического воспаления у пациентов с муковисцидозом [67]. Эластаза В (псевдолизин) представляет собой нейтральную цинк-зависимую металлопептидазу, которая расщепляет комплекс SP-A, являющийся важным компонентом врожденной иммунной системы легких. В результате воздействия эластазы В резко снижается опсонизация и фагоцитоз патогенных микроорганизмов, что способствует развитию заболевания в легких и очень опасно для больных муковисцидозом [65; 68; 69].

Щелочная протеаза разрушает фибрин, изменяя воспалительную реакцию, а протеаза IV разрушает эластин. Обе этих протеазы участвуют в расщеплении иммуноглобулинов и факторов комплемента [70]. Протеаза IV расщепляет интерлейкин 22 — цитокин, необходимый для поддержания врожденной защиты слизистой оболочки от внеклеточных патогенов. При поражении легких *P. aeruginosa* часто ассоциирована с *Streptococcus pneumoniae*, и оба этих патогена вносят основной вклад в смертность от пневмонии. Выявлено, что протеаза IV усиливает вирулентность пневмококкового возбудителя [71]. Липазы и фосфолипазы вызывают гемолиз, разрушая эритроциты [72]. Замечено накопление липазы в биопленке и взаимодействие с альгинатом. Выявлено, что липаза А связывается с внеклеточным альгинатом электростатическими взаимодействиями. Это локализует фермент вблизи поверхности клетки и повышает его стабильность. Поэтому концентрация липаз у мукоидных штаммов в 9 раз выше [73].

Биопленка

Одним из важных механизмов выживания *P. aeruginosa* является способность к формированию биопленки, которая создает благоприятные условия для размножения бактерий и защиты от иммунных реакций организма-хозяина и воздействий внешней среды. Основным компонентом, формирующим биопленку, выступает альгинат — полимер, обладающий гелеобразующими свойствами, состоящий из различных пропорций 1,4-связанной β-D-маннуроновой кислоты и α-L-гиалуроновой кислоты, связанных 1—4 гликозидной связью [74]. Выделяя альгинат, бактерии прикрепляются к поверхности, успешно размножаются и создают трехмерные сообщества микроорганизмов, заключенные в защитное экзополимерное слизистое вещество, которое, кроме альгината, включает белки, липиды, нуклеиновые кислоты и полисахариды. В биопленке происходит коммуникация между микроорганизмами, которые демонстрируют единый ответ, приносящий пользу всему бактериальному сообществу, при этом поддерживается оптимальный размер биопленки и координируются фенотипы вирулентности, в результате чего биопленка ведет себя как многоклеточный организм. Это позволяет бактериальному сообществу адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды, что способствует распространению полезных для патогена мутаций в колонии биопленок, улучшает доступ к питательным веществам и способствует устойчивости к антибиотикам [72; 75; 76]. При хронизации синегнойной инфекции в дыхательных путях, что всегда наблюдается при муковисцидозе, происходит развитие слизистого (мукоидного) фенотипа *P. aeruginosa* с образованием мощной биопленки. В результате чего патоген колонизирует легкие больного с невозможностью успешной терапии заболевания [77].

Клеточная стенка

Бактерия *P. aeruginosa* окружена слоем высокотоксичного липополисахарида, который получил называние эндотоксин. Липополисахарид оказывает местное токсическое действие в очаге поражения, а также общее пирогенное воздействие и интоксикацию [47; 78]. Липополисахарид состоит из O-полисахарида, построенного из соединенных олигосахаридом повторяющихся олигосахаридных звеньев и липидного участка, называемого кором. За счет липидного участка липополисахарид заякорен в клеточной мембране бактерий. Установлено что O-полисахариды липополисахарида вносят наибольший вклад в иммуноспецифичность бактерий [78; 79]. Благодаря своей локализации липополисахарид играет важную роль во взаимодействии бактерии с окружающей средой. Липидная мембрана препятствует прохождению полярных растворенных веществ, в то время как липополисахарид отталкивает липофильные соединения. Липополисахарид вносит существенный вклад в патогенез инфекций, вызываемых *P. aeruginosa*: взаимодействует с рецепторами хозяина, ингибирует его системы защиты, влияет на биогенез биопленок и способствует устойчивости к противомикробным препаратам [79].

Жгутики и пили

На поверхности бактерии присутствуют компоненты для передвижения и адгезии — жгутики и пили, которые играют важную роль в колонизации *P. aeruginosa* и последующем распространении в более глубокие ткани и органы, что очень важно для успешного развития инфекционного процесса. Жгутики напоминают своим строением роторный двигатель, и при взаимодействии с пилями они способствуют отрыву бактерии от колонии с переходом в планктонную форму, вследствие чего инфекция быстро распространяется по организму, осваивая новые поверхности [80]. Экспериментально подтверждено на животных, что жгутики играют одну из ключевых ролей при проникновении в первичные кератиноциты эпидермиса и дальнейшей персистенции бактерии в коже, а также они являются мощнейшими факторами воспаления [81]. Основная функция пилей заключается в прикреплении к субстрату и вертикальном передвижении бактерии. Хорошо изучена функция пилей IV типа, нить которых состоит из спиральных полимерных субъединиц пилина. Используя пили IV типа, бактерия осуществляет регуляцию своего положения путем их поочередного сокращения и расслабления, тем самым осуществляя «ходульную ходьбу» по поверхности субстрата, что также очень важно для развития биопленки [80; 82; 83].

Пигменты

Бактериальная клетка *P. aeruginosa* активно вырабатывает ряд пигментов, обладающих бактерицидными свойствами и токсичностью, являющихся важными диагностическими признаками. Среди них наиболее известен пиоцианин, окрашивающий раны и питательную среду в сине-зеленый цвет, который синтезируется большинством клинических изолятов, что коррелирует с их вирулентностью. Имеются данные о взаимосвязи пигментообразования и антибиотикорезистентности [84; 85].

Наружная мембрана и белки наружной мембраны

Как и все грамотрицательные бактерии, клетка *P. aeruginosa* обладает наружной мембраной, которая совместно с включенными в ее состав белками выполняет защитную и транспортную функции. Поверхностные белки, отделенные от наружной мембраны, имеют размер от 9 до 87 кДа, и их принято называть белками наружной мембраны (outer protein — Opr) [86].

Один из наиболее значимых белков наружной мембраны — OprF (белок F наружной мембраны), который формирует поры в мембране, обеспечивая транспорт ионов и соединений (включая полисахариды) с размерами до 1,5 кДа в периплазматическое пространство. Принято называть подобные белки поринами из-за их функции. OprF имеет важное значение в выживании микроорганизма, является мажорным порином, характеризуется консервативностью и считается одним из самых иммуногенных поверхностных антигенов *P. aeruginosa* [87; 88]. Как и другие порины, OprF за счет амфипатических антипараллельных β-цепей образует цилиндрические водонаполненные структуры (поры), пронизывающие бислой мембраны [89—91]. OprF необходим для проявления вирулентности *P. aeruginosa*. Экспериментально показано, что отсутствие OprF приводило к редукции: адгезии к клеткам животных; секреции экзотоксинов T и S через систему секреции типа III; продукции факторов вирулентности (пиоцианина, эластазы, лектина PA-1L и экзотоксина A) [92].

OprF также идентифицировали как мажорный матричный белок биопленки, а его дефицит приводил к нарушению ее формирования [93; 94]. Высокоиммуногенный белок OprF содержит множество эпитопов, стимулирующих T-клеточный иммунитет, приводя к активации воспалительной реакции, способствующей прогрессирующему повреждению легких и ухудшению их функции, что в итоге способствует обострению заболевания и повышению смертности. Выявлено, что сыворотки больных содержат высокие титры антител против OprF и при хронической синегнойной инфекции происходит длительное иммунное воздействие со стороны OprF, что может способствовать снижению T-клеточного иммунитета [94].

За последние годы опубликовано большое количество информации по структуре и функции поринов *P. aeruginosa*, которых известно более 20. Для большинства этих белков изучены функции, которые заключаются в транспорте аминокислот, глюкозы, железа, фосфатов и др. [95]. Одна из важных функций мембранных белков — это обеспечение защиты патогена от антибиотиков, и часто их роль состоит в формировании выкачивающих помп, обеспечивающих эффективный отток вредных для жизнедеятельности бактерий веществ [96—98].

Кроме пориновых белков, наружная мембрана включает ряд липопротеинов, содержащих ковалентно-связанные жирнокислотные цепи. Одна из функций этих белков заключается в стабилизации наружной мембраны, что обеспечивает целостность клеток. Наиболее хорошо изучены два мажорных низкомолекулярных ассоциированных с пептидогликаном липопротеина OprL [99] и OprI [100]. Выявлено, что с OprL и OprI активно взаимодействует мажорный порин OprF, который тоже является пептидогликан-ассоциированным белком, что способствует целостности наружной мембраны [95].

Один из важных механизмов взаимодействия прокариотических организмов с внешней средой — это образование везикул, которые у грамотрицательных бактерий представляют сферические двухслойные пузырьки размером от 10 до 500 нм, полученные из наружной мембраны. С помощью везикул происходит обмен биохимическими сигналами между клетками самого патогена и взаимодействие с клетками хозяина, включая выделение различных токсинов, белков активации и подавления иммунитета, а также реакции на стресс, факторы прикрепления и др. В формировании мембранных везикул принимают совместное участие OprF и OprI, способные связываться с пептидогликаном [101].

В организме хозяина патогенные бактерии могут уничтожаться нейтрофилами посредством так называемого дыхательного взрыва, в результате которого нейтрофилы многократно увеличивают потребление кислорода с выделением перекиси водорода. Однако бактерия *P. aeruginosa* оснащена мощной системой ферментативной защиты, приводящей к детоксикации перекиси водорода бактериальными каталазами. Этот механизм генетически регулируется трансактиватором OxyR, и очевидно, данный процесс требует структурной поддержки пептидогликан-ассоциированного липопротеина OprL [102].

При исследовании начального этапа инфекции *P. aeruginosa* у пациентов, больных муковисцидозом, выявлено, что в организме в первую очередь вырабатываются антитела к OprL наряду с антителами к экзотоксинам системы секреции T3SS (экзотоксины U, S и U). Это свидетельствует о существенной роли OprL при начале развития инфекционного процесса *P. aeruginosa* и является важным серологическим маркером при ранней диагностике инфекции [103]. При анализе генов *oprL* и *oprI* выявлено, что второй ген встречается почти у всех видов бактерий рода *Pseudomonas*, в то время как белок OprL уникален для *P. aeruginosa* поскольку его ген выявляется только у данного вида [104]. Поэтому логично использовать ген *oprL* для ранней диагностики синегнойной инфекции у больных муковисцидозом, которые находятся в группе риска [105]. Идентификацию гена *oprL* осуществляли при мультиплексной ПЦР-системе для диагностики *P. aeruginosa*, наряду с генами *16S rDNA*, *gyrB*, *toxA* [106; 107]. В другом исследовании для ПЦР-анализа основных генов, кодирующих факторы вирулентности у клинических изолятов *P. aeruginosa,* продуцирующих бета-лактамазу, использовали гены обоих мажорных липопротеинов *oprL* и *oprI* в комплексе с генами *lasB*, *plcH*, *exoS* и *toxA* [108].

Заключение

Настоящий обзор позволяет утверждать, что, невзирая на достижения современной медицины, гнойно-воспалительные инфекции, обусловленные условно-патогенными микроорганизмами, и в частности *P. aeruginosa*, продолжают представлять собой серьезную проблему для здравоохранения во всем мире. Клинически значимые изоляты синегнойной палочки демонстрируют высокую резистентность к большинству применяемых антибиотиков, что делает *P. aeruginosa* одним из наиболее агрессивных возбудителей инфекций. Сложный патогенез инфекций, вызванных *P. aeruginosa*, усугубляется обилием факторов вирулентности, что подчеркивает актуальность исследований, направленных на разработку средств борьбы с синегнойной инфекцией. Глубокое понимание факторов патогенности *P. aeruginosa* открывает возможности для эффективной разработки методов диагностики, терапии и иммунопрофилактики данной инфекции. Очевидно, что для эффективной защиты организма необходимо стимулировать как выработку антител, нейтрализующих бактериальные токсины, так и формирование иммунного ответа, направленного против поверхностных антигенов бактерии.

Разработка вакцин должна учитывать особенности антигенной структуры и вариабельности штаммов *P. aeruginosa*, а также механизмы, позволяющие патогену уклоняться от защитных реакций организма.

Список литературы:

1. *Ключарева Н. М.* Устойчивость к антибиотикам и дезинфицирующим средствам штаммов *Pseudomonas aeruginosa*, выделенных от пациентов реанимационного и других отделений многопрофильной больницы // Здоровье населения и среда обитания. 2013. №3 (240). С. 33—35.

2. *Руднов В. А.* Антибиотикотерапия госпитальных инфекций, вызванных *P. aeruginosa* // Русский медицинский журнал. 2005. Т. 13, №7. С. 485—490.

3. *Страчунский Л. С., Решедько Г. К., Стецюк О. У. и др.* Сравнительная активность антисинегнойных антибиотиков в отношении нозокомиальных штаммов *Pseudomonas aeruginosa*, выделенных в отделениях реанимации и интенсивной терапии России // Клиническая Микробиология и Антимикробная Химиотерапия. 2003. Т. 5, №1. С. 35—46.

4. *Grimwoo K., Kyd J. M., Owen S. J. et al.* Vaccinacion against respiratory *Pseudomonas aeruginosa* infections // Hum Vaccin Immunother. 2015. Vol. 11, №1. P. 14—20. doi: 10.4161/hv.34296.

5. *Custovic A., Smajlovic J., Hadzic S. et al*. Epidemiological surveillance of bacterial nosocomial infections in the surgical intensive care unit // Mater Sociomed. 2014. Vol. 26, №1. P. 7—11. doi: 10.5455/msm.2014.26.7-11.

6. *Werth B. J., Carreno J. J., Reveles K. R*. Shifting trends in the incidence of *Pseudomonas aeruginosa* septicemia in hospitalized adults in the United States from 1996—2010 // Am J Infect Control. 2015. Vol. 43, №5. P. 465—468. doi: 10.1016/j.ajic.2015.01.028.

7. *Everett J., Turner K., Cai Q. et al.* Arginine Is a critical substrate for the pathogenesis of *Pseudomonas aeruginosa* in burn wound infections // MBio. 2017. Vol. 8, №2. P. e02160—16. doi: 10.1128/mBio.02160-16.

8. *Сабирова Е. В., Гординская Н. А., Абрамова Н. В. и др.* Микоэкология ожоговых стационаров // Клиническая лабораторная диагностика. 2017. Т. 62, №5. С. 310—312. doi: 10.18821/0869-2084-2017-62-5-310-312.

9. *Soltan Dallal M. M., Safdari R., Emadi Koochak H. et al.* A comparison between occlusive and exposure dressing in the management of burn wound // Burns. 2016. Vol. 42, №3. P. 578—582. doi: 10.1016/j.burns.2015.05.001.

10. *Bayram Y., Parlak M., Aypak C., Bayram I.* Three-year review of bacteriological profile and antibiogram of burn wound isolates in Van, Turkey // Int J Med Sci. 2013. Vol. 10, №1. P. 19—23. doi: 10.7150/ijms.4723.

11. *Chaudhary N. A., Munawar M. D., Khan M. T. et al*. Epidemiology, bacteriological profile, and antibiotic sensitivity pattern of burn wounds in the burn unit of a tertiary care hospital // Cureus. 2019. Vol. 11, №6. P. e4794. doi: 10.7759/cureus.4794.

12. *Azimi L., Alaghehbandan R., Asadian M. et al.* Multi-drug resistant *Pseudomonas aeruginosa* and *Klebsiella pneumoniae* circulation in a burn hospital, Tehran, Iran // GMS Hyg Infect Control. 2019. №14. P. Doc01. doi: 10.3205/dgkh000317.

13. *Lin J. C., Chen Z. H., Chen X. D*. Elevated serum procalcitonin predicts Gram-negative bloodstream infections in patients with burns // Burns. 2020. Vol. 46, №1. P. 182—189. doi: 10.1016/j.burns.2019.04.010.

14. *Karami P., Mohajeri P., Yousefi Mashouf R. et al.* Molecular characterization of clinical and environmental *Pseudomonas aeruginosa* isolated in a burn center // Saudi J Biol Sci. 2019. Vol. 26, №7. P. 1731—1736. doi: 10.1016/j.sjbs.2018.07.009.

15. *Nseir S., Martin-Loeches I.* Ventilator-associated tracheobronchitis: where are we now? // Rev Bras Ter Intensiva. 2014. Vol. 26, №3. P. 212—214. doi: 10.5935/0103-507X.20140033.

16. *Ramírez-Estrada S., Borgatta B., Rello J. Pseudomonas aeruginosa* ventilator-associated pneumonia management // Infect Drug Resist. 2016. №9. P. 7—18. doi: 10.2147/IDR.S50669.

17. *Yun H.C., Weintrob A.C., Conger N.G. et al.* Healthcare-associated pneumonia among U.S. combat casualties, 2009 to 2010 // Mil Med. 2015. Vol. 180, №1. P. 104—110. doi: 10.7205/MILMED-D-14-00209.

18. *Зиятдинов М.Н., Акимкин В.Г., Гизатуллин Ш.Х.* Клинико-эпидемиологические особенности и профилактика гнойно-септических инфекций при огнестрельных черепно-мозговых ранениях и система их профилактики // Медицинский алфавит. 2015. Т. 2, №17. С. 5—11.

19. *Йовенко И.А., Криштафор Д.А., Кобеляцкий Ю.Ю. и др.* Бактериальный контроль при тяжелой огнестрельной травме // Медицина неотложных состояний. 2015. №2 (65). С. 171—175.

20. *Митряшов К.В., Охотина С.В., Грибань П.А. и др.* Особенности микробного пейзажа «пограничной» ожоговой раны в разные фазы ожогового процесса // Тихоокеанский медицинский журнал. 2016. №1 (63). С. 59—61.

21. *Круглякова Л.В., Нарышкина С.В., Одиреев А.Н.* Современные аспекты внебольничной пневмонии // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2019. Т. 71. С. 120—134.

22. *Rodrigo-Troyano A., Sibila O.* The respiratory threat posed by multidrug resistant Gram-negative bacteria // Respirology. 2017. Vol. 22, №7. P. 1288—1299. doi: 10.1111/resp.13115.

23. *Vaez H., Salehi-Abargouei A., Khademi F.* Systematic review and meta-analysis of imipenem-resistant *Pseudomonas aeruginosa* prevalence in Iran // Germs. 2017. Vol. 7, №2. P. 86-97. doi: 10.18683/germs.2017.1113.

24. *Shindo Y., Hasegawa Y.* Regional differences in antibiotic-resistant pathogens in patients with pneumonia: implications for clinicians // Respirology. 2017. Vol. 22, №8. P. 1536—1546. doi: 10.1111/resp.13135.

25. *Vega S., Dowzicky M.J.* Antimicrobial susceptibility among Gram-positive and Gram-negative organisms collected from the Latin American region between 2004 and 2015 as part of the Tigecycline Evaluation and Surveillance Trial // Ann Clin Microbiol Antimicrob. 2017. Vol. 16, №1. P. 50. doi: 10.1186/s12941-017-0222-0.

26. *Bassetti M., Poulakou G., Ruppe E. et al.* Antimicrobial resistance in the next 30 years, humankind, bugs and drugs: a visionary approach // Intensive Care Med. 2017. Vol. 43, №10. P. 1464—1475. doi: 10.1007/s00134-017-4878-x.

27. *Feng W., Huang Q., Wang Y. et al.* Changes in the resistance and epidemiological characteristics of *Pseudomonas aeruginosa* during a ten-year period // J Microbiol Immunol Infect. 2021. Vol. 54, №2. P. 261—266. doi: 10.1016/j.jmii.2019.08.017.

28. *El Zowalaty M.E., Al Thani A.A., Webster T.J. et al. Pseudomonas aeruginosa*: arsenal of resistance mechanisms, decades of changing resistance profiles, and future antimicrobial therapies // Future Microbiol. 2015. Vol. 10, №10. P. 1683—1706. doi: 10.2217/fmb.15.48.

29. *Bin Mohanna M.A., Bahannan A.A.* Bacterial profile and antibiogram of otitis media among children in Yemen // J Ayub Med Coll Abbottabad. 2016. Vol. 28, №3. P. 480–483.

30. *Kim S.H., Jeon E.J., Hong S.M. et al.* Bacterial species and antibiotic sensitivity in Korean patients diagnosed with acute otitis media and otitis media with effusion // J Korean Med Sci. 2017. Vol. 32, №4. P. 672–678. doi: 10.3346/jkms.2017.32.4.672.

31. *Salih M.K., Alrabadi N.I., Thalij K.M., Hussien A.S.* Isolation of pathogenic gram-negative bacteria from urinary tract infected patients // Open Journal of Medical Microbiology. 2016. Vol. 6, №2. P. 59–65.

32. *Yan P., Liu W., Kong J. et al.* Prevention of catheter-related *Pseudomonas aeruginosa* infection by levofloxacin-impregnated catheters *in vitro* and *in vivo* // Chin Med J. 2014. Vol. 127, №1. P. 54–58.

33. *Fukuda K., Ishida W., Fukushima A., Nishida T.* Corneal fibroblasts as sentinel cells and local immune modulators in infectious keratitis // Int. J. Mol. Sci. 2017. Vol. 18, №9. P. e1831. doi: 10.3390/ijms18091831.

34. *Augustin P., Tran-Dinh A., Valin N. et al. Pseudomonas aeruginosa* post-operative peritonitis: clinical features, risk factors, and prognosis // Surg Infect (Larchmt). 2013. Vol. 14, №3. P. 297–303. doi: 10.1089/sur.2012.084.

35. *Findley K., Grice E.A.* The skin microbiome: a focus on pathogens and their association with skin disease // PLoS Pathog. 2014. Vol. 10, №11. P. e1004436. doi: 10.1371/journal.ppat.1004436.

36. *Yang H., Wang W.S., Tan Y. et al.* Investigation and analysis of the characteristics and drug sensitivity of bacteria in skin ulcer infections // Chin J Traumatol. 2017. Vol. 20, №4. P. 194–197. doi: 10.1016/j.cjtee.2016.09.005.

37. *Nofal A., Alakad R., Assaf M., Nofal E.* A fatal case of febrile ulceronecrotic Mucha-Habermann disease in a child // JAAD Case Rep. 2016. Vol. 2, №2. P. 181–185. doi: 10.1016/j.jdcr.2016.03.002.

38. *Chuang C.H., Janapatla R.P., Wang Y.H. et al. Pseudomonas aeruginosa* – associated diarrheal diseases in children // Pediatr Infect Dis J. 2017. Vol. 36, №12. P. 1119–1123. doi: 10.1097/INF.0000000000001567.

39. *Ашерова И.К., Капранов Н.И.* Современные подходы к диагностике и лечению респираторных инфекций у больных муковисцидозом // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. 2014. Т. 16, №2. С. 100–110.

40. *Бобровничий В.И.* Современные подходы к диагностике и лечению синегнойной инфекции у больных муковисцидозом // Медицинский журнал. 2012. №1. С. 4–9.

41. *Stefani S., Campana S., Cariani L. et al.* Relevance of multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa* infections in cystic fibrosis // Int J Med Microbiol. 2017. Vol. 307, №6. P. 353–362. doi: 10.1016/j.ijmm.2017.07.004.

42. *Cantón R., Gijón D., Ruiz-Garbajosa P.* Antimicrobial resistance in ICUs: an update in the light of the COVID-19 pandemic // Curr Opin Crit Care. 2020. Vol. 26, №5. P. 433–441. doi: 10.1097/MCC.0000000000000755.

43. *Pezzuto A., Tammaro A., Tonini G. et al.* SARS-Cov-2 pneumonia and concurrent myelodysplasia complicated by *Pseudomonas aeruginosa* over-infection // J Virol Methods. 2022. Vol. 300. P. 114419. doi: 10.1016/j.jviromet.2021.114419.

44. *Westblade L.F., Simon M.S., Satlin M.J.* Bacterial coinfections in coronavirus disease 2019 // Trends Microbiol. 2021. Vol. 29, №10. P. 930–941. doi: 10.1016/j.tim.2021.03.018.

45. *Qu J., Cai Z., Liu Y. et al.* Persistent bacterial coinfection of a COVID-19 patient caused by a genetically adapted *Pseudomonas aeruginosa* chronic colonizer // Front Cell Infect Microbiol. 2021. №11. P. 641920. doi: 10.3389/fcimb.2021.641920.

46. *Qu J., Cai Z., Duan X. et al. Pseudomonas aeruginosa* modulates alginate biosynthesis and type VI secretion system in two critically ill COVID-19 patients // Cell Biosci. 2022. Vol. 12, №1. P. 14. doi: 10.1186/s13578-022-00748-z.

47. *Haghi F., Nezhad B.B., Zeighami H.* Effect of subinhibitory concentrations of imipenem and piperacillin on *Pseudomonas aeruginosa toxA* and *exoS* transcriptional expression // New Microbes New Infect. 2019. Vol. 32. P. 100608. doi: 10.1016/j.nmni.2019.100608.

48. *Ramachandran G.* Gram-positive and gram-negative bacterial toxins in sepsis // Virulence. 2014. Vol. 5, №1. P. 213—218. doi: 10.4161/viru.27024.

49. *Tartor Y.H., El-Naenaeey E.Y.* RT-PCR detection of exotoxin genes expression in multidrug resistant *Pseudomonas aeruginosa* // Cell Mol Biol (Noisy-le-grand). 2016. Vol. 62, №1. P. 56—62.

50. *Khosravi A.D., Shafie F., Abbasi Montazeri E., Rostami S.* The frequency of genes encoding exotoxin A and exoenzyme S in *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from burn patients // Burns. 2016. Vol. 42, №5. P. 1116—1120. doi: 10.1016/j.burns.2016.02.012.

51. *Вертиев Ю.В., Бродвинова Н.С., Мороз А.Ф.* Экзотоксин A *Pseudomonas aeruginosa* и его роль в патогенезе синегнойной инфекции // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 1981. Т. 58, №2. С. 13—19.

52. *Michalska M., Wolf P. Pseudomonas* Exotoxin A: optimized by evolution for effective killing // Front Microbiol. 2015. Vol. 6. P. 963. doi: 10.3389/fmicb.2015.00963.

53. *Sato H., Frank D.W.* Intoxication of host cells by the T3SS phospholipase ExoU: PI(4,5)P2-associated, cytoskeletal collapse and late phase membrane blebbing // PLoS One. 2014. Vol. 9, №7. P. e103127. doi: 10.1371/journal.pone.0103127.

54. *Moir D.T., Bowlin N.O., Berube B.J. et al.* A structure-function-inhibition analysis of the *P. aeruginosa* type III secretion needle protein PscF // J Bacteriol. 2020. Vol. 202, №18. P. JB.00055—00020. doi: 10.1128/JB.00055-20.

55. *Sato H., Frank D.W.* Multi-functional characteristics of the *Pseudomonas aeruginosa* type III needle-tip protein, PcrV; comparison to orthologs in other gram-negative bacteria // Front Microbiol. 2011. №2. P. 142. doi: 10.3389/fmicb.2011.00142.

56. *Kaminski A., Gupta K.H., Goldufsky J.W. et al. Pseudomonas aeruginosa* ExoS induces intrinsic apoptosis in target host cells in a manner that is dependent on its GAP domain activity // Sci Rep. 2018. Vol. 8, №1. P. 14047. doi: 10.1038/s41598-018-32491-2.

57. *Vareechon C., Zmina S.E., Karmakar M. et al. Pseudomonas aeruginosa* effector ExoS inhibits ROS production in human neutrophils // Cell Host Microbe. 2017. Vol. 21, №5. P. 611—618.e5. doi: 10.1016/j.chom.2017.04.001.

58. *Azimi S., Kafil H.S., Baghi H.B. et al.* Presence of exoY, exoS, exoU and exoT genes, antibiotic resistance and biofilm production among *Pseudomonas aeruginosa* isolates in Northwest Iran // GMS Hyg Infect Control. 2016. Vol. 11. P. Doc04. doi: 10.3205/dgkh000264.

59. *Huber P., Bouillot S., Elsen S., Attrée I.* Sequential inactivation of Rho GTPases and Lim kinase by *Pseudomonas aeruginosa* toxins ExoS and ExoT leads to endothelial monolayer breakdown // Cell Mol Life Sci. 2014. Vol. 71, №10. P. 1927—1941. doi: 10.1007/s00018-013-1451-9.

60. *Anderson D.M., Feix J.B., Monroe A.L. et al.* Identification of the major ubiquitin-binding domain of the *Pseudomonas aeruginosa* ExoU A2 phospholipase // J Biol Chem. 2013. Vol. 288, №37. P. 26741–26752. doi: 10.1074/jbc.M113.478529.

61. *Tessmer M.H., Anderson D.M., Pickrum A.M. et al.* Identification and verification of ubiquitin-activated bacterial phospholipases // J Bacteriol. 2019. Vol. 201, №4. P. e00623–18. doi: 10.1128/JB.00623-18.

62. *Trento M.V.C., Sales T.A., de Abreu T.S. et al.* Exploring the structural and functional aspects of the phospholipase A2 from Naja spp // Int J Biol Macromol. 2019. Vol. 140. P. 49–58. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.08.125.

63. *Belyy A., Raoux-Barbot D., Saveanu C. et al.* Actin activates ExoY nucleotidyl cyclase toxin and ExoY-like effector domains from MARTX toxins // Nat Commun. 2016. №7. P. 13582. doi: 10.1038/ncomms13582.

64. *Солдатенкова А.В.* Моноклональные антитела для выявления нативного и рекомбинантного экзотоксина А *Pseudomonas aeruginosa* : автореф. дис. … канд. биол. наук. М., 2016.

65. *Kuang Z., Hao Y., Walling B.E. et al. Pseudomonas aeruginosa* elastase provides an escape from phagocytosis by degrading the pulmonary surfactant protein-A // PLoS One. 2011. Vol. 6, №11. P. e27091. doi: 10.1371/journal.pone.0027091.

66. *Lányi B.* Serological properties of *Pseudomonas aeruginosa*. II. Type-specific thermolabile (flagellar) antigens // Acta Microbiol Acad Sci Hung. 1970. Vol. 17, №1. P. 35–48.

67. *Azghani A.O., Neal K., Idell S. et al.* Mechanism of fibroblast inflammatory responses to *Pseudomonas aeruginosa* elastase // Microbiology. 2014. Vol. 160, №3. P. 547–555. doi: 10.1099/mic.0.075325-0.

68. *Galdino A.C.M., de Oliveira M.P., Ramalho T.C. et al.* Anti-Virulence Strategy against the multidrug-resistant bacterial pathogen *Pseudomonas aeruginosa*: pseudolysin (elastase B) as a potential druggable target // Curr Protein Pept Sci. 2019. Vol. 20, №5. P. 471–487. doi: 10.2174/1389203720666190207100415.

69. *Yang J., Zhao H.L., Ran L.Y. et al.* Mechanistic insights into elastin degradation by pseudolysin, the major virulence factor of the opportunistic pathogen *Pseudomonas aeruginosa* // Sci Rep. 2015. №5. P. 9936. doi: 10.1038/srep09936.

70. *Cornelis P., Dingemans J. Pseudomonas aeruginosa* adapts its iron uptake strategies in function of the type of infections // Front Cell Infect Microbiol. 2013. №3. P. 75. doi: 10.3389/fcimb.2013.00075.

71. *Bradshaw J.L., Caballero A.R., Bierdeman M.A. et al. Pseudomonas aeruginosa* protease IV exacerbates *Pneumococcal Pneumonia* and systemic disease // mSphere. 2018. Vol. 3, №3. P. e00212-18. doi: 10.1128/mSphere.00212-18.

72. *Ghadam P., Akhlaghi F., Ali A.A.* One-step purification and characterization of alginate lipase from a clinical *Pseudomonas aeruginosa* with destructive activity on bacterial biofilm // Iran J Basic Med Sci. 2017. Vol. 20, №5. P. 467–473. doi: 10.22038/IJBMS.2017.8668.

73. *Tielen P., Kuhn H., Rosenau F. et al.* Interaction between extracellular lipase LipA and the polysaccharide alginate of *Pseudomonas aeruginosa* // BMC Microbiol. 2013. №13. P. 159. doi: 10.1186/1471-2180-13-159.

74. *Hay I.D., Ur Rehman Z., Ghafoor A., Rehm B.H.A.* Bacterial biosynthesis of alginates // J Chem Technol Biotechnol. 2010. Vol. 85, №6. P. 752–759. doi: 10.1002/jctb.2372.

75. *Hogardt M., Heesemann J.* Adaptation of *Pseudomonas aeruginosa* during persistence in the cystic fibrosis lung // Int J Med Microbiol. 2010. Vol. 300, №8. P. 557—562. doi: 10.1016/j.ijmm.2010.08.008.

76. *Stanislavsky E.S., Balayan S.S., Sergienko A.I. et al.* Clinico-immunological trials of *Pseudomonas aeruginosa* vaccine // Vaccine. 1991. Vol. 9, №7. P. 491—494. doi: 10.1016/0264-410X(91)90034-4.

77. *Kovach K., Davis-Fields M., Irie Y. et al.* Evolutionary adaptations of biofilms infecting cystic fibrosis lungs promote mechanical toughness by adjusting polysaccharide production // NPJ Biofilms Microbiomes. 2017. №3. P. 1. doi: 10.1038/s41522-016-0007-9.

78. *Быстрова О.С.* Установление полной структуры липополисахаридов бактерии *Pseudomonas aeruginosa* : автореф. дис. … канд. хим. наук. М., 2004.

79. *Huszczynski S.M., Lam J.S., Khursigara C.M.* The role of *Pseudomonas aeruginosa* lipopolysaccharide in bacterial pathogenesis and physiology // Pathogens. 2019. Vol. 9, №1. P. E6. doi: 10.3390/pathogens9010006.

80. *Conrad J.C., Gibiansky M.L., Jin F. et al.* Flagella and pili-mediated near-surface single-cell motility mechanisms in *P. aeruginosa* // Biophys J. 2011. Vol. 100, №7. P. 1608—1616. doi: 10.1016/j.bpj.2011.02.020.

81. *Garcia M., Morello E., Garnier J. et al. Pseudomonas aeruginosa* flagellum is critical for invasion, cutaneous persistence and induction of inflammatory response of skin epidermis // Virulence. 2018. Vol. 9, №1. P. 1163—1175. doi: 10.1080/21505594.2018.1480830.

82. *Hahn H.P.* The type-4 pilus is the major virulence-associated adhesin of *Pseudomonas aeruginosa* — a review // Gene. 1997. Vol. 192, №1. P. 99—108. doi: 10.1016/s0378-1119(97)00116-9.

83. *Nguyen Y., Jackson S.G., Aidoo F. et al.* Structural characterization of novel *Pseudomonas aeruginosa* type IV pilins // J Mol Biol. 2010. Vol. 395, №3. P. 491—503. doi: 10.1016/j.jmb.2009.10.070.

84. *Жданова О.С., Красноженов Е.П., Соснин Э.А. и др*. Антибиотикорезистентность штаммов *Pseudomonas aeruginosa* с разной способностью к синтезу пиоцианина // Альманах клинической медицины. 2013. №28. С. 13—17.

85. *Кузнецова М.В.* Характеристика биологических свойств нозокомиальных штаммов *Pseudomonas aeruginosa* // Пермский медицинский журнал. 2014. Т. 31, №3. С. 59—64.

86. *Hancock R.E., Siehnel R., Martin N.* Outer membrane proteins of *Pseudomonas* // Mol. Microbiol. 1990. Vol. 4, №7. P. 1069—1075. doi: 10.1111/j.1365-2958.1990.tb00680.x.

87. *Gilleland H.E. Jr., Parker M.G., Matthews J.M., Berg R.D.* Use of a purified outer membrane protein F (porin) preparation of *Pseudomonas aeruginosa* as a protective vaccine in mice // Infect Immun. 1984. Vol. 44, №1. P. 49—54.

88. *Hedstrom R.C., Pavlovskis O.R., Galloway D.R.* Antibody response of infected mice to outer membrane proteins of *Pseudomonas aeruginosa* // Infect Immun. 1984. Vol. 43, №1. P. 49—53.

89. *Novikova O.D., Solovyeva T.F.* Nonspecific Porins of the Outer Membrane of Gram-Negative Bacteria: Structure and Functions // Biochemistry (Moscow) Supplement Series A: Membrane and Cell Biology. 2009. Vol. 3. №1. P. 3—15. doi: 10.1134/S1990747809010024.

90. *Krishnan S., Prasadarao N. V.* Outer membrane protein A and OprF: versatile roles in Gram-negative bacterial infections // FEBS J. 2012. Vol. 279, №6. P. 919—931. doi: 10.1111/j.1742-4658.2012.08482.x.

91. *Reusch R. N.* Biogenesis and functions of model integral outer membrane proteins: *Escherichia coli* OmpA and *Pseudomonas aeruginosa* OprF // FEBS J. 2012. Vol. 279, №6. P. 893. doi: 10.1111/j.1742-4658.2012.08486.x.

92. *Fito-Boncompte L., Chapalain A., Bouffartigues E. et al.* Full virulence of *Pseudomonas aeruginosa* requires OprF // Infect Immun. 2011. Vol. 79, №3. P. 1176—1786. doi: 10.1128/IAI.00850-10.

93. *Cassin E. K., Tseng B. S.* Pushing beyond the envelope: the potential roles of OprF in *Pseudomonas aeruginosa* biofilm formation and pathogenicity // J Bacteriol. 2019. Vol. 201, №18. P. e00050—19. doi: 10.1128/JB.00050-19.

94. *Quigley K. J., Reynolds C. J., Goudet A. et al.* Chronic infection by mucoid *Pseudomonas aeruginosa* associated with dysregulation in T-Cell immunity to outer membrane porin F // Am J Respir Crit Care Med. 2015. Vol. 191, №11. P. 1250—1264. doi: 10.1164/rccm.201411-1995OC.

95. *Chevalier S., Bouffartigues E., Bodilis J. et al.* Structure, function and regulation of *Pseudomonas aeruginosa* porins // FEMS Microbiol Rev. 2017. Vol. 41, №5. P. 698—722. doi: 10.1093/femsre/fux020.

96. *Linares J. F., López J. A., Camafeita E. et al.* Overexpression of the multidrug efflux pumps MexCD-OprJ and MexEF-OprN is associated with a reduction of type III secretion in *Pseudomonas aeruginosa* // J Bacteriol. 2005. Vol. 187, №4. P. 1384—1391. doi: 10.1128/JB.187.4.1384-1391.2005.

97. *Miryala S. K., Anbarasu A., Ramaiah S.* Systems biology studies in *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 to understand their role in biofilm formation and multidrug efflux pumps // Microb Pathog. 2019. Vol. 136. P. 103668. doi: 10.1016/j.micpath.2019.103668.

98. *Pan Y. P., Xu Y. H., Wang Z. X. et al.* Overexpression of MexAB-OprM efflux pump in carbapenem-resistant *Pseudomonas aeruginosa* // Arch Microbiol. 2016. Vol. 198, №6. P. 565—571. doi: 10.1007/s00203-016-1215-7.

99. *Lim A., De Vos D., Brauns M. et al.* Molecular and immunological characterization of OprL, the 18 kDa outer-membrane peptidoglycan-associated lipoprotein (PAL) of *Pseudomonas aeruginosa* // Microbiology. 1997. Vol. 143, №5. P. 1709—1176. doi: 10.1099/00221287-143-5-1709.

100. *Duchêne M., Barron C., Schweizer A. et al. Pseudomonas aeruginosa* outer membrane lipoprotein I gene: molecular cloning, sequence, and expression in *Escherichia coli* // J Bacteriol. 1989. Vol. 171, №8. P. 4130—4137. doi: 10.1128/jb.171.8.4130-4137.1989.

101. *Wessel A. K., Liew J., Kwon T. et al.* Role of *Pseudomonas aeruginosa* peptidoglycan-associated outer membrane proteins in vesicle formation // J Bacteriol. 2013. Vol. 195, №2. P. 213—219. doi: 10.1128/JB.01253-12.

102. *Panmanee W., Gomez F., Witte D. et al.* The peptidoglycan-associated lipoprotein OprL helps protect a *Pseudomonas aeruginosa* mutant devoid of the transactivator OxyR from hydrogen peroxide-mediated killing during planktonic and biofilm culture // J Bacteriol. 2008. Vol. 190, №10. P. 3658—5669. doi: 10.1128/JB.00022-08.

103. *Rao A. R., Laxova A., Farrell P. M., Barbieri J. T.* Proteomic identification of OprL as a seromarker for initial diagnosis of *Pseudomonas aeruginosa* infection of patients with cystic fibrosis // J Clin Microbiol. 2009. Vol. 47, №8. P. 2483—2488. doi: 10.1128/JCM.02182-08.

104. *De Vos D., Lim A. Jr., Pirnay J. P. et al.* Direct detection and identification of *Pseudomonas aeruginosa* in clinical samples such as skin biopsy specimens and expectorations by multiplex PCR based on two outer membrane lipoprotein genes, *oprI* and *oprL* // J Clin Microbiol. 1997. Vol. 35, №6. P. 1295—1299.

105. *Xu J., Moore J. E., Murphy P. G. et al.* Early detection of *Pseudomonas aeruginosa*—comparison of conventional versus molecular (PCR) detection directly from adult patients with cystic fibrosis (CF) // Ann Clin Microbiol Antimicrob. 2004. №3. P. 21. doi: 10.1186/1476-0711-3-21.

106. *Le Gall F., Le Berre R., Rosec S. et al*. Proposal of a quantitative PCR-based protocol for an optimal *Pseudomonas aeruginosa* detection in patients with cystic fibrosis // BMC Microbiol. 2013. №13. P. 143. doi: 10.1186/1471-2180-13-143.

107. *Salman M., Ali A., Haque A.* A novel multiplex PCR for detection of *Pseudomonas aeruginosa*: A major cause of wound infections // Pak J Med Sci. 2013. Vol. 29, №4. P. 957—961. doi: 10.12669/pjms.294.3652.

108. *Ullah W., Qasim M., Rahman H. et al.* Beta-lactamase-producing *Pseudomonas aeruginosa*: Phenotypic characteristics and molecular identification of virulence genes // J Chin Med Assoc. 2017. Vol. 80, №3. P. 173—177. doi: 10.1016/j.jcma.2016.08.011.

Об авторах

Алексей Алексеевич Калошин — канд. биол. наук, вед. науч. сотр., Научно-исследовательский институт вакцин и сывороток им. И. И. Мечникова, Россия.

ORCID: 000-0001-8679-2421
E-mail: alex-k-1973@yandex.ru
SPIN-код: 3938-6140

A. A. Kaloshin

CHARACTERISTICS AND PATHOGENICITY FACTORS OF *PSEUDOMONAS AERUGINOSA*

Mechnikov Research Institute of Vaccines and Sera, Russia
Received 21 October 2025
Accepted 09 December 2025
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-7

To cite this article: Kaloshin A. A., 2026, Characteristics and pathogenicity factors of pseudomonas aeruginosa, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural Sciences*, №1. P. 95—113. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-7.

This review focuses on Pseudomonas aeruginosa*, an opportunistic pathogen that plays a key role in the etiology of purulent-inflammatory diseases, which typically arise as secondary complications in individuals with weakened immune systems. The severe course of* P. aeruginosa *infections and the wide range of associated tissue damage are determined by numerous virulence factors. The bacterium synthesizes enzymes and exotoxins that exert destructive effects on host tissues and immune system components.* P. aeruginosa *is capable of forming* *biofilms, enhancing its adaptation to the environment. The bacterium is covered by a protective capsule composed of lipopolysaccharides, which have toxic and pyrogenic effects. It possesses flagella and pili, which play important roles in colonization and dissemination. The outer membrane performs protective and transport functions, and its proteins are crucial for cellular metabolism, facilitating the transport of a wide range of substances, including ions, amino acids, glucose, iron, and phosphates necessary for cell survival. Additionally, these proteins actively participate in antibiotic efflux, protecting the cell from foreign compounds. Lipoproteins stabilize the outer membrane and interact with other membrane proteins.* P. aeruginosa *also produces vesicles that participate in biochemical signaling and interactions with host cells. This review emphasizes that the development of effective strategies to combat* P. aeruginosa *infections must consider all its unique characteristics and mechanisms of immune evasion.*

Keywords: *Pseudomonas aeruginosa*, infection, pathogenicity factors, immune response

The author

Dr Alexei A. Kaloshin, Leading Researcher, Mechnikov Research Institute of Vaccines and Sera, Russia.

ORCID: 0000-0001-8679-2421

E-mail: alex-k-1973@yandex.ru

SPIN code: 3938-6140

УДК 57.085.23 УДК 57.043 УДК 57.033

А. В. Моторжина[1], А. А. Аникин[1], С. Е. Пшеничников[1]*
С. Йованович[2], В. К. Беляев[1], Л. В. Панина[1,3], Е. В. Левада[1]

УСИЛЕНИЕ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С ПОМОЩЬЮ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА / КОБАЛЬТОВОГО ФЕРРИТА: СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФОТОТЕРМИЧЕСКИЙ-МАГНИТОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

[1] Балтийский Федеральный университет им. И. Канта
[2] Институт ядерной физики «Винча» — Национальный институт Республики Сербия, Университет Белграда, Белград, Сербия
[3] Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

Поступила в редакцию 15.09.2025 г.
Принята к публикации 25.12.2025 г.
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-8

Для цитирования: *Моторжина А. В., Аникин А. А., Пшеничников С. Е., Йованович С., Беляев В. К., Панина Л. В., Левада Е. В.* Усиление терапевтического действия с помощью наночастиц золота / кобальтового феррита: синергетический фототермический-магнитомеханический эффект // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2026. №1. С. 114—129. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-8.

Проведено исследование эффективности применения композитных наночастиц золота с кобальтовым ферритом (Au@CFO) в фототермической и магнитомеханической терапии на клетках гепатокарциномы человека Huh7. Наночастицы продемонстрировали эффективное действие в ходе фототермической терапии in vitro *и проявили собственную цитотоксичность, снижая жизнеспособность на 32 % при концентрации 100 мкг/мл. Фототермическая терапия лазером 808 нм дополнительно снижала жизнеспособность на 25 %, а магнитомеханическая терапия в переменном поле 100 мТл снизила жизнеспособность Huh7 дополнительно на 17 %. Комбинированная фототермическая и магнитомеханическая терапия привела к снижению жизнеспособности гепатокарциномы на 47 % относительно контрольной группы. Однако ее прямая эффективность составила 14 %, что было подтверждено флуоресцентной микроскопией. Результаты подтверждают потенциал наночастиц Au@CFO для разработки комбинированных методов лечения рака.*

Ключевые слова: наночастицы кобальтового феррита, наночастицы золота, фототермическая терапия, магнитомеханическая терапия

Список сокращений: ФТ — фототермическое (воздействие/терапия); ММ — магнитомеханическое (воздействие / терапия); Au@CFO — композитные наночастицы золота, покрытые наночастицами кобальтового феррита; Huh7 — линия гепатокарциномы человека; ФСБ — фосфатно-солевой буферный раствор; WST-1 — водорастворимые тетразолиевые соли (Water-soluble Tetrazolium salts) для определения клеточной жизнеспособности; PI — краситель Йодид пропидия (Propidium Iodide).

Введение

Одним из направлений исследований современной биотехнологии являются бионанотехнологии и наномедицина. Бионанотехнология (также биомеднанотехнология) — это сфера биохимии и биомедицины, которое исследует принципы построения и работы биологических систем наноразмерного уровня. Полученные знания используются для разработки инновационных бионаноматериалов, биотехнологических методов и устройств нанометрового масштаба, а также для улучшения уже существующих. Кроме того, эта область включает создание новых нанотехнологий для точечной диагностики, лечения, хирургических вмешательств, генной инженерии и биотехнологических применений [1]. Наномедицина же акцентирует свое внимание на применении нанотехнологий и наноматериалов для нужд медицины — диагностики, профилактики, лечения заболеваний и для получения углубленного знания о сложных механизмах патологий. Одним из наиболее перспективных направлений развития наномедицины является разработка новых методов терапии.

Один из ключевых векторов развития в разработке методов противоопухолевой терапии — создание низкоинвазивных лечебных подходов, характеризующихся минимальными побочными эффектами в сравнении с традиционными методами, включающими химиотерапию, хирургическое вмешательство и лучевую терапию [2]. К таким методам относятся магнитная гипертермия, магнитомеханическая (далее — ММ) терапия, фототермическая (далее — ФТ) терапия, фотодинамическая терапия. ФТ терапия и магнитная гипертермия относятся к методикам локальной гипертермии [3]. Особое внимание уделяется также разработке комбинированных терапевтических стратегий.

ФТ терапия представляет собой один из современных методов лечения, основанный на способности специальных агентов-сенсибилизаторов поглощать световую энергию и преобразовывать ее в тепло, что приводит к локальному нагреву окружающих тканей. В качестве таких сенсибилизаторов наиболее эффективны небольшие наночастицы плазмонных металлов (золота, серебра и др.), поскольку более крупные частицы преимущественно рассеивают свет, что значительно снижает эффективность нагрева.

К числу ключевых преимуществ ФТ терапии относятся низкая стоимость, обусловленная отсутствием необходимости в сложном оборудовании, минимальная инвазивность благодаря использованию крайне малых количеств частиц и возможности дистанционного применения светового воздействия, а также высокая селективность, обеспечивающая нагрев исключительно в облучаемой области локализации частиц [3]. Эти характеристики делают ФТ терапию идеальным инструментом для селективного уничтожения раковых клеток с минимальным повреждением здоровых тканей. Механизм действия основан на способности локального нагрева наночастиц вызывать необратимое повреждение клеточных мембран, что приводит к некрозу.

ММ терапия — другой новый метод, направленный на индукцию гибели раковых клеток или разрушение опухоли посредством низкочастотных механических колебаний магнитных наночастиц, которые оказывают строго локальное воздействие и, таким образом, сохраняют соседние здоровые клетки [4]. Наночастицы приводятся в движение внешним переменным магнитным полем, которое практически не затухает в живых тканях, а поэтому может быть использовано даже при уничтожении опухолей мозга. Впервые ММ терапия была реализована с помощью частиц в форме диска, состоящих из слоя железа, покрытого золотом [5]. Однако они имели относительно большой размер — порядка микрона, что не может использоваться *in vivo*. Эффективность магнитных наночастиц, которые имеют суперпарамагнитные свойства, для ММ терапии снижена за счет их значительно меньшего магнитного момента. Однако такие частицы могут формировать цепочки, что увеличивает их момент силы в магнитном поле.

Комбинация нескольких типов воздействия в одной терапии позволяет увеличить терапевтический эффект, а также уменьшить необходимую концентрацию наноагентов. Среди возможных комбинаций — ФТ и ММ. В этом случае сочетается термическое и механическое воздействие на раковые клетки, приводя к их синергетическому эффекту [2; 6—8]. Наноагенты для данного типа терапии должны обладать значимой магнитной восприимчивостью, а также достаточной фототермической производительностью. Это может быть совмещено в композитных наночастицах, состоящих из материалов двух типов: магнитного и плазмонного.

Целью настоящей работы является оценка эффективности применения композитных наночастиц, состоящих из ядра золота, окруженного наночастицами кобальтового феррита, в фототермической и магнитомеханической терапии, а также в их комбинации в рамках одной терапии.

Материалы и методики исследования

В ходе экспериментов были исследованы композитные наночастицы золота, покрытые наночастицами кобальтового феррита — Au@CFO. Синтез наночастиц Au@CFO и их характеризация были подробно описаны в наших предыдущих работах [9; 10].

Для изучения морфологии и размеров наночастиц Au@CFO была проведена просвечивающая электронная микроскопия (далее — ПЭМ) на микроскопе JEOL JEM-2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Порошок наночастиц был диспергирован в н-гексане и обработан в ультразвуковой печи в течение 10 минут. Полученная суспензия наночастиц была нанесена на медную сетку с углеродным покрытием и высушена на воздухе.

Эксперименты с терапиями проводились на клеточной культуре гепатокарциномы человека Huh7, выбранной в качестве модели рака печени. Культивирование проводилось в среде DMEM F12 (Himedia, США) с добавлением 10 % фетальной бычьей сыворотки, 1 % пенициллина и стрептомицина (все Sigma, США) в условиях 37 °C и 5 %-ный концентрации CO_2. Высевалось по 10 тыс. клеток на лунку 96-луночного планшета с шестикратной повторностью.

Для оценки эффективности ФТ терапии планшеты с клетками Huh7 и наночастицами Au@CFO в концентрации 100 мкг/мл предварительно культивировались в течение 24 часов. Затем планшеты помещали в термостатирующий шкаф при 37 °C, в котором были установлены лазер с длиной волны 808 нм, система линз и крепление для планшетов. Каждая лунка планшета с образцом освещалась лазером на 20 минут. Оптическая мощность лазера составляла 0,6 Вт, а интенсивность ~2,4 Вт/см^2. Температура внутри лунок регистрировалась инфракрасной камерой COX CG640. Перед началом облучения температура каждого образца (лунки) стабилизировалась до 37 °C. Объем суспензии образцов — 100 мкл.

После лазерной обработки образцов был проведен анализ выживаемости клеток методом проточной цитофлуориметрии с использованием реактива Guava ViaCount. Для этого клетки Huh7 промывали фосфатно-солевым буферным раствором (далее — ФСБ), открепляли с помощью трипсина и центрифугировали. Супернатант аспирировали, а клетки ресуспендировали ФСБ для дальнейшего окрашивания. Реагент Guava ViaCount Reagent (EMD Millipore, США) использовали для окрашивания и различения жизнеспособных, апоптотических и мертвых клеток в соответствии с протоколом производителя. Для детекции и количественной оценки использовали систему проточной цитометрии MACSQuantAnalyzer (MiltenyiBiotec, Германия). Полученные данные визуализировали и количественно оценивали с помощью программного обеспечения KALUZA Analysis Software (Beckman Coulter, США). Гейтирование проводили в соответствии с установленными методами.

Для ММ терапии была использована магнитная система, включающая две горизонтально и соосно расположенные катушки без сердечников, схему управления сигналом катушек и систему охлаждения. В промежутке между катушками закреплялся планшет с клетками. Схема управления сигналами на катушках была реализована с помощью MOSFET-ключей и микроконтроллера STM32. Работа катушек органирзована в режиме попеременного включения с заданной длительностью и частотой импульсов. Амплитуда магнитного поля составляла 100 мТл, длительность каждого импульса — 100 мс, а общая частота работы системы — 4 Гц. Эффективность ММ наночастицами Au@CFO в концентрации 100 мкг/мл определялась после 24 часов преинкубирования с клетками культуры Huh7. Во время ММ терапии клетки подвергались воздействию переменного магнитного поля 3 раза по 10 минут с паузами 10 минут между включениями. Непосредственно после проведения терапии добавлялось по 10 мкл красителя WST-1 на лунку. Пролиферативная активность рассчитывалась по оптической плотности клеточной суспензии на длине волны 450 нм с помощью микропланшетного фотометра Multiskan FC (Thermo FS, Германия).

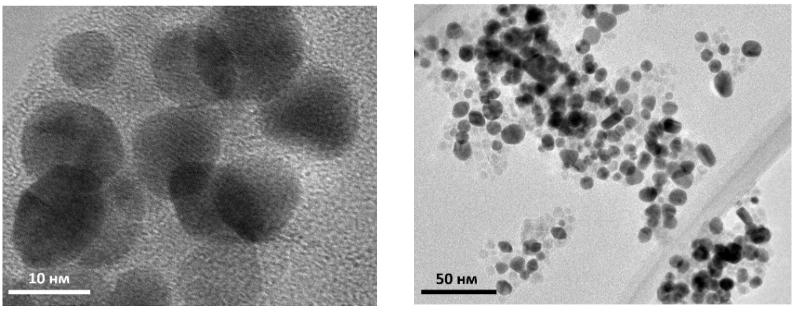
Для проведения комбинированной параллельной ФТ и ММ терапии была собрана установка, включающая в себя обе части (лазерную и магнитную), совмещенные в термостате. Лазерный пучок проходил через оси электромагнитов и исследуемую лунку с образцом. Параметры работы лазерной и магнитной частей остались теми же, что и при проведении одиночных терапий. Общая длительность комбинированной терапии составила 20 минут, при которых работа лазера продолжалась все 20 минут, а магниты включались 3 раза по ~3,5 минуты с перерывами ~3,5 минуты. Перед каждой терапией планшет термостабилизировался до 37 °C. Для исследования жизнеспособности после комбинированной терапии наночастицами Au@CFO также проводилось окрашивание красителем WST-1 (Thermo Scientific, США).

Морфология клеток Huh7 была проанализирована с помощью встроенного флуоресцентного микроскопа (NIB620FL, Ningbo Yongxin Optics Co., Ltd., Китай). Для каждой экспериментальной группы было получено как минимум 12 повторных изображений. Для исследования влияния комбинированной терапии окрашивание каждого планшета проходило непосредственно после окончания воздействия. Окрашивание производилось красителями помощью Calcein-AM (Thermo Fisher Scientific, США) и Hoechst 33342 (Lumiprobe, Россия) и Propidium iodide (HIMEDIA Pvt. Ltd., Индия) в соответствии с протоколом производителя. Полученные изображения обрабатывались с помощью программного обеспечения ImageJ 2.6 (NIH, США). Бинарные изображения получены путем деления флуоресцентных каналов, после чего проведена инверсия значений Lookup Table (LUT) в канале Propidium iodide (фильтр TRITC).

Результаты исследования и обсуждение

В качестве исследуемого материала были выбраны наночастицы Au@CFO, показавшие себя перспективными для применения в ФТ и ММ терапии [9; 10] На рисунке 1 представлены изображения композитных наночастиц с просвечивающего электронного микроскопа. Как видно на рисунке, наночастицы состоят из золотого ядра размером 10—20 нм (темные частицы), окруженного частицами CFO ($CoFe_2O_4$) размером 4,5—5,5 нм (светлые частицы).

Данные наночастицы показали коэффициент ФТ эффективности 50—55 % для концентраций 100 мкг/мл и выше [10]. Цитотоксичность наночастиц Au@CFO в концентрации до 50 мкг/мл, исследованная на клеточных линиях Jurkat, МНК и Huh7, достоверно не снижала жизнеспособности культур. В то время как Au@CFO в концентрации 100 мкг/мл продемонстрировали статистически достоверное снижение жизнеспособности клеток раковых культур, не показав достоверного различия жизнеспособности здоровых клеток крови по сравнению с контрольной группой [9; 10].



а *б*

Рис. 1. Изображения композитных наночастиц Au@CFO,
полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа.
Размер шкалы составляет *а* — 10 нм, *б* — 50 нм

На первом этапе исследования была проведена оценка эффективности ФТ терапии наночастицами Au@CFO (рис. 2). Максимальная разниАца температуры лунок с клетками без наночастиц при их нагреве лазером не превышала 1,5°C. При лазерном нагреве лунок с клетками и наночастицами Au@CFO наблюдался нагрев до 46°C. Этой температуры достаточно для инициирования механизмов клеточной смерти. Согласно полученным результатам, представленным на рисунке 3, Au@CFO незначительно (на 6 %) снизили жизнеспособность экспериментальных клеток по сравнению с контрольными. Жизнеспособность клеток после ФТ терапии наночастицами Au@CFO в концентрации 100 мкг/мл, снизилась на 25 %.

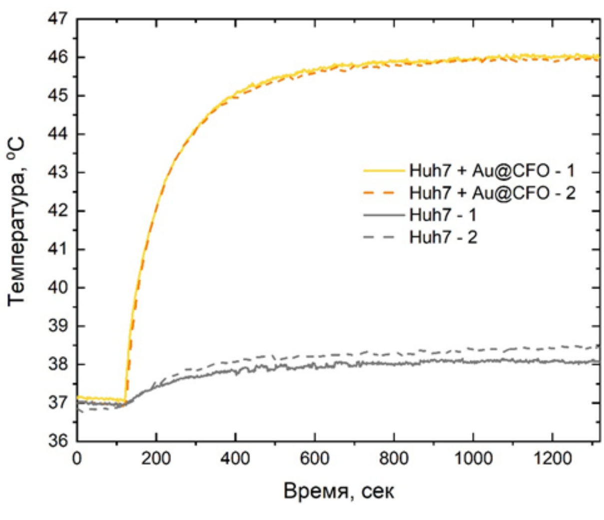


Рис. 2. Температуры нагрева клеток Huh7 с наночастицами Au@CFO
(верхние желтые линии) и без (нижние серые линии)
в ходе проведения фототермической терапии в планшете *in vitro*.
Концентрация наночастиц — 100 мкг/мл

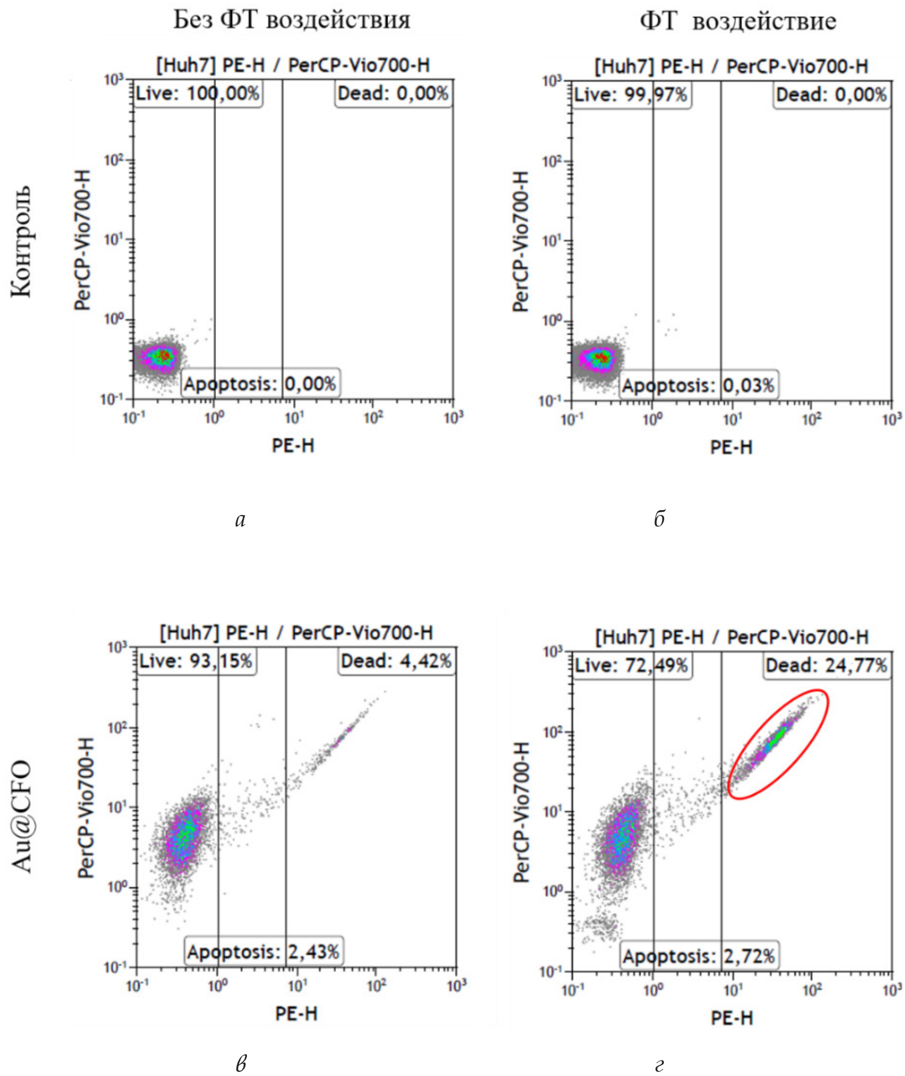


Рис. 3. Результаты фототермической терапии клеточной культуры Huh7 Au@CFO в концентрации 100 мкг/мл: *а* — контроль; *б* — клетки, на которые воздействовало только лазерное облучение в течение 900 секунд; *в* — клетки, обработанные 100 мкг/мл Au@CFO в течение 24 часов; *г* — клетки после обработки 100 мкг/мл Au@CFO в течение 24 часов и ФТ терапии. Красным выделена субпопуляция мертвых клеток после ФТ терапии Au@CFO. PerCP-Vio700H и PE-H — флуоресцентные каналы, использованные для детекции

Клетки, обработанные 100 мкг/мл Au@CFO, продемонстрировали более высокие показатели жизнеспособности, чем та же экспериментальная группа в предыдущих, уже опубликованных, экспериментах, в которых использовался WST-1 анализ [10]. Предполагается, что различия в полученных значениях жизнеспособности клеток обусловлены механизмами действия реагентов Guava ViaCount Reagent и WST-1. Анализ WST-1 — это анализ жизнеспособности, основанный на свойстве клеток превращать соли тетразолия в формазан под действием клеточных ферментов[11]. Увеличение количества живых клеток в образце приводит к повышению общей способности клеток трансформировать соли тетразолия. Количество образовавшегося формазана можно определить с помощью спектрофотометра, и только метаболически активные клетки могут расщеплять соли тетразолия до формазана [11]. В отличие от этого, Guava ViaCount Reagent — это функциональный анализ на апоптоз и жизнеспособность, который содержит два компонента: краситель для окрашивания ядер и краситель жизнеспособности для окрашивания мертвых (или умирающих) клеток. Такое сочетание красителей позволяет количественно определять и различать живые, мертвые (анализ жизнеспособности) и апоптотические клетки (функциональный анализ) [12]. Так, анализ WST-1 основан на анализе метаболической активности клеток, в то время как Guava ViaCount Reagent дифференцирует клетки, окрашивая ядра и мертвые клетки. Эти различия могут привести к расхождениям результатов, когда анализ WST-1 показывает пониженные значения жизнеспособности по сравнению с другими красителями. В литературе этот эффект объясняется наличием жизнеспособных покоящихся или спящих клеток, которые не всегда можно четко отличить от нежизнеспособных или мертвых с помощью анализа WST-1 [11].

На втором этапе исследования был проведен эксперимент по определению эффективности ММ терапии наночастицами Au@CFO. Результаты, представленные на рисунке 4, показывают достоверное снижение жизнеспособности клеток Huh7 до 49 %. Однако сами частицы Au@CFO оказывают токсическое воздействие на культуру, статистически достоверно снижая ее жизнеспособность на 32 % по сравнению с контрольной группой. Поэтому эффективность ММ терапии составляет всего 17 %. Исследования ММ терапии ранее проводились на частицах типа ядро-оболочка похожего состава: $Au@Fe_3O_4$ [8]. Эффективность ММ терапии наночастицами $Au@Fe_3O_4$, исследовавшаяся на клетках аденокарциномы молочной железы, достигла значения около 50 %. Различия в значениях эффективности могут быть объяснены большим значением амплитуды переменного магнитного поля (160 мТл), отсутствием в составе частиц кобальта, а также разными клеточными культурами. Кроме того, с физической точки зрения увеличение момента силы в магнитном поле, что определяющее эффективность механического воздействия, возможно за счет способности частиц образовывать цепочки. В случае Au@CFO наночастиц, цепочки могут не образовываться из-за значительно меньшего размера наночастиц CFO по сравнению с Au-ядром.

Комбинированная ФТ и ММ терапия исследовалась в различных работах [2; 6—8; 13]. Однако во всех этих исследованиях описаны последовательные терапии — одна за другой, и ни в одной не рассматривается одновременное применение ММ и ФТ терапий. В данной работе был апробирован подход по совмещению последовательных ММ и ФТ терапий. Результаты, представленные на рисунке 5, показывают снижение жизнеспособности культуры Huh7 после комбинированной терапии на 47 % относительно контрольной группы. Однако эффективность комбинированной терапии Au@CFO составляет 14 %, так как существенный вклад в снижение жизнеспособности экспериментальной группы после терапии вносит цитотоксичность самих наночастиц Au@CFO.

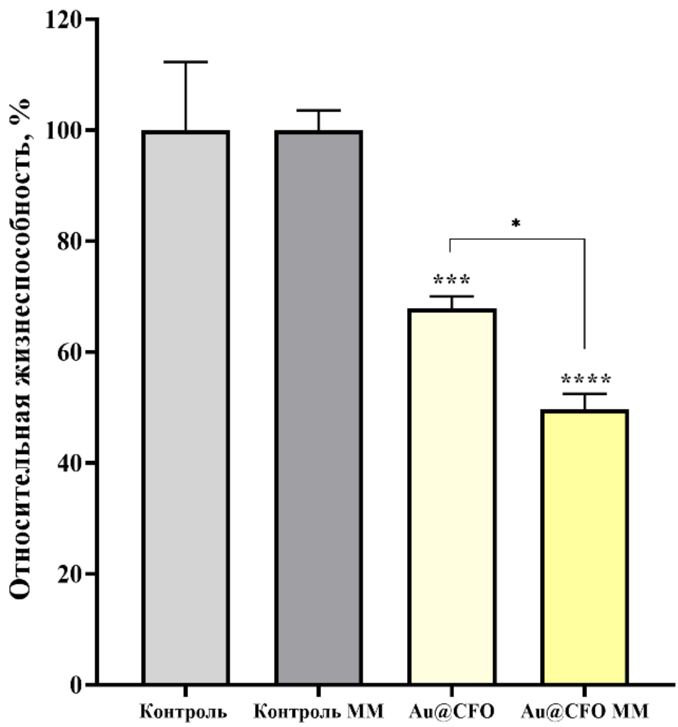


Рис. 4. Ингибирование жизнеспособности клеток Huh7 после ММ терапии с использованием Au@CFO в концентрации 100 мкг/мл. Контроль — контрольные клетки; Контроль ММ — клетки после воздействия магнитным полем; Au@CFO — клетки, культивированные с добавлением Au@CFO; Au@CFO ММ — клетки, подвергнутые ММ терапии с использованием Au@CFO. Данные нормированы к значениям жизнеспособности контрольных клеток. Звездочками отмечены уровни статистической значимости данных между группами (* для значения $p < 0{,}0332$; *** — p-значение $< 0{,}0002$, **** — p-значение $< 0{,}0001$).

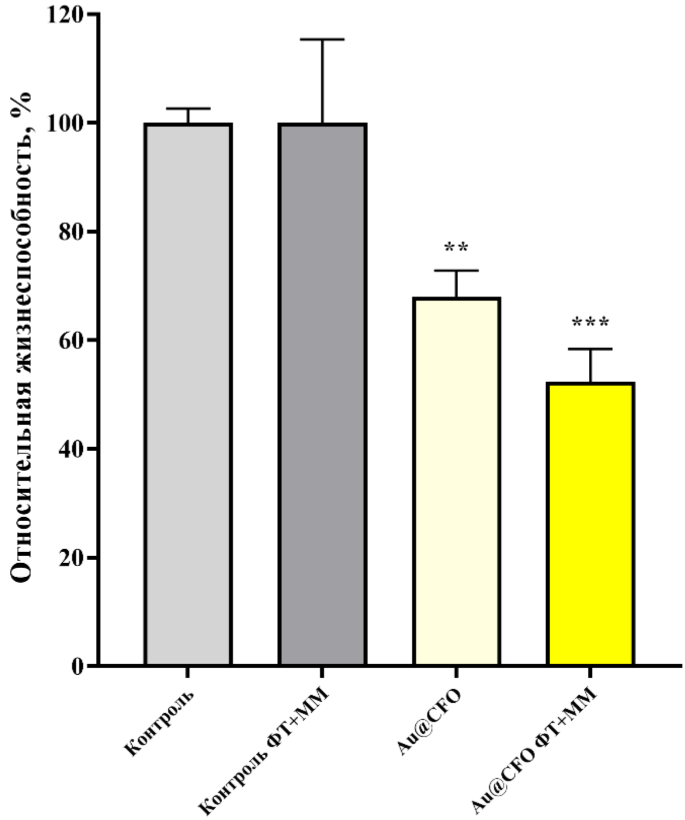


Рис. 5. Жизнеспособность клеток Huh7 после параллельной комбинированной ММ и ФТ терапии Au@CFO. Контроль — контрольная группа; Контроль ММ+ФТ — клетки, на которые одновременно воздействовало только лазерное облучение и переменное магнитное поле; Au@CFO — клетки, инкубированные 100 мкг/мл Au@CFO в течение 24 часов; Au@CFO ММ + ФТ — клетки после обработки 100 мкг/мл Au@CFO в течение 24 часов и параллельной комбинированной ММ и ФТ терапии. Данные нормированы к значениям жизнеспособности контрольных клеток. Звездочками отмечены уровни статистической значимости данных между группами (** — p-значение < 0,0021, **** — p-значение < 0,0002)

Для подтверждения данных WST-1 анализа, а также исследования морфологии клеток Huh7 после комбинированной терапии Au@CFO было проведено окрашивание красителями Calcein-AM, Hoechst и PI. Подобная процедура позволяет определить живые и мертвые клетки в группе, а также наблюдать изменение формы и размера клеток. Фотографии, полученные после окрашивания образцов до и после комбинированной терапии, представлены на рисунке 6. Клетки контрольной группы после проведения комбинированной терапии не поменяли своей морфологии, в то время как клетки, инкубированные с Au@CFO, после терапии показали значительно сниженную интенсивность окрашивания Calcein-A M. Также можно наблюдать ошаривание клеток и увеличение количества окрашенных Calcein-AM внеклеточных везикул. Фиолетовое окрашивание — совмещение каналов Hoechst 33342 и PI — говорит о наличии мертвых клеток в экспериментальной группе. Все перечисленные особенности морфологии клеток группы, подверженной комбинированной терапии Au@CFO, подтверждают данные относительной жизнеспособности, полученные окрашиванием WST-1, представленные на рисунке 5.

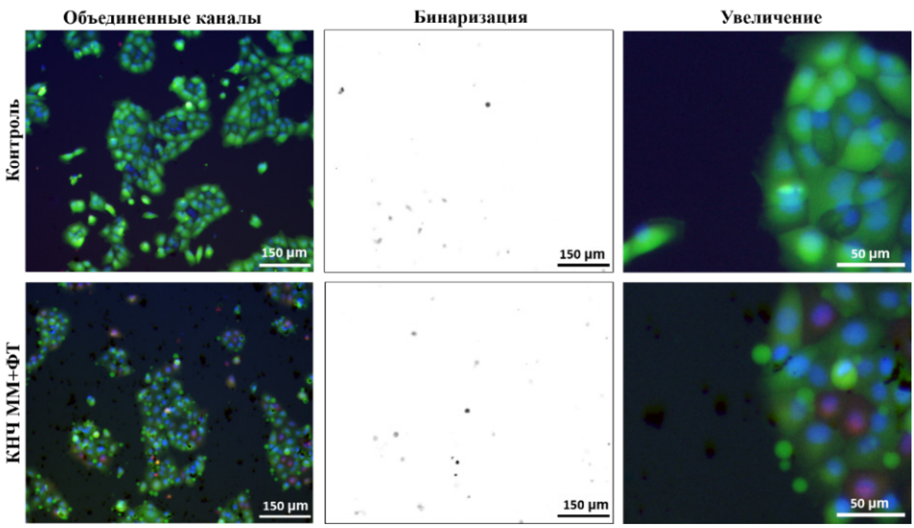


Рис 6. Изменение морфологии клеток Huh7
после параллельной ММ и ФТ комбинированной терапии
с использованием Au@CFO.
Контроль — клетки контрольной группы (необработанные клетки);
Au@CFO ММ+ФТ — клетки после комбинированной терапии Au@CFO; Бинаризация — бинарное изображение, полученное с помощью флуоресценции PI; Увеличение — увеличенные в 4 раза изображения.
Клетки окрашивали Hoechst 33342 (ядра, синий),
Calcein-AM (цитоплазма, зеленый),
PI (ядра погибших клеток, красный)

Для проведения анализа динамики снижения жизнеспособности клеток Huh7 после каждой проведенной терапии Au@CFO была построена диаграмма, представленная на рисунке 7. Относительная жизнеспособность культуры Huh7 статистически достоверно последовательно снижается от значения, показывающего цитотоксический эффект Au@CFO до значения, показывающего эффективность ММ терапии. Продемонстрировано статистически достоверное различие эффектов цитотоксического воздействия с ММ терапией и комбинированной параллельной ФТ и ММ терапией. Однако достоверной разницы между ФТ, ММ и комбинированной параллельной терапией Au@CFO не наблюдается.

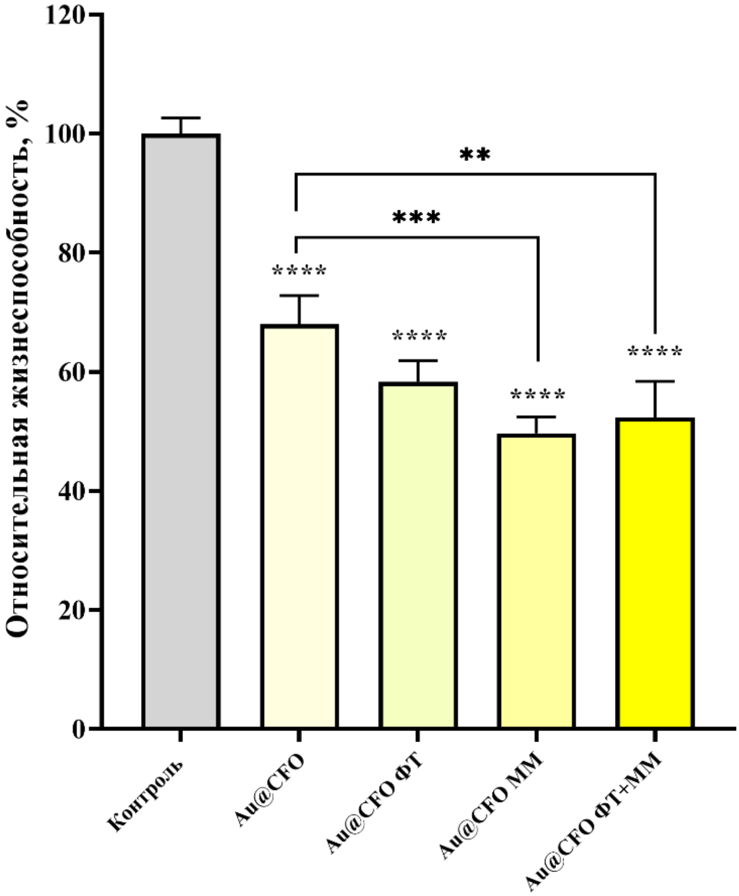


Рис. 7. Жизнеспособность клеток Huh7 после всех проведенных воздействий Au@CFO. Контроль — контрольная группа; Au@CFO — клетки, культивированные с добавлением Au@CFO; Au@CFO ФТ — клетки, подвергнутые ФТ терапии Au@CFO; Au@CFO ММ — клетки, подвергнутые ММ терапии Au@CFO; Au@CFO ММ + ФТ — клетки после обработки 100 мкг/мл Au@CFO в течение 24 часов и параллельной комбинированной ММ и ФТ терапии. Данные нормированы к значениям жизнеспособности контрольных клеток. Звездочками отмечены уровни статистической значимости данных между группами (* — p-значение < 0,0332, *** — p-значение < 0,0002, **** — p-значение < 0,0001)

Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследована применимость композитных наночастиц золота, покрытых наночастицами кобальтового феррита — Au@CFO, в качестве потенциальных агентов комбинированной ФТ и ММ терапии рака. Был применен метод одновременного лазерного и магнитного воздействия на раковые клетки с наночастицами в рамках комбинированной терапии. Полученные результаты показывают статистически достоверное снижение жизнеспособности культуры гепатокарциномы человека как после одиночных ФТ и ММ терапий, так и после комбинирования данных терапий. Проведенное исследование вносит вклад в понимание потенциала наночастиц в качестве инструментов ФТ и ММ терапии, формируя базу для последующих научных работ, направленных на борьбу с онкологическими заболеваниями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РНФ № 21-72-20158-П.

Список литературы

1. *Зайцев С. Ю.* Супрамолекулярные наноразмерные системы на границе раздела фаз. Концепции и перспективы для бионанотехнологий. URSS, 2010.

2. *Wo F., Xu R., Shao Y. et al.* A Multimodal System with Synergistic Effects of Magneto-Mechanical, Photothermal, Photodynamic and Chemo Therapies of Cancer in Graphene-Quantum Dot-Coated Hollow Magnetic Nanospheres // Theranostics. 2016. Vol. 6 (4). P. 485—500. doi: 10.7150/thno.13411.

3. *de la Encarnación C., Jimenez de Aberasturi D., Liz-Marzán L. M.* Multifunctional plasmonic-magnetic nanoparticles for bioimaging and hyperthermia // Adv Drug Deliv Rev. 2022. Vol. 189. P. 114484. doi: 10.1016/j.addr.2022.114484.

4. *Naud C., Thébault C., Carrière M. et al.* Cancer treatment by magneto-mechanical effect of particles, a review // Nanoscale Adv. 2020. Vol. 2 (9). P. 3632—3655. doi: 10.1039/D0NA00187B.

5. *Kim D. H., Rozhkova E. A., Ulasov I. V. et al.* Biofunctionalized magnetic-vortex microdiscs for targeted cancer-cell destruction // Nat Mater. 2010. Vol. 9 (2). P. 165—171. doi: 10.1038/nmat2591.

6. *Chen W., Qin M., Chen X. et al.* Combining photothermal therapy and immunotherapy against melanoma by polydopamine-coated Al_2O_3 nanoparticles // Theranostics. 2018. Vol. 8 (8). P. 2229—2241. doi: 10.7150/thno.24073.

7. *Sangnier A., Preveral S., Curcio A. et al.* Targeted thermal therapy with genetically engineered magnetite magnetosomes@RGD: Photothermia is far more efficient than magnetic hyperthermia // Journal of Controlled Release. 2018. Vol. 279. P. 271—281. doi: 10.1016/j.jconrel.2018.04.036

8. *Muzzi B., Albino M., Gabbani A. et al.* Star-Shaped Magnetic-Plasmonic Au@Fe_3O_4 Nano-Heterostructures for Photothermal Therapy // ACS Appl Mater Interfaces. 2022. Vol. 14 (25). P. 29087—29098. doi: 10.1021/acsami.2c04865.

9. *Motorzhina A., Jovanović S., Belyaev V. K. et al.* Innovative Gold/Cobalt Ferrite Nanocomposite: Physicochemical and Cytotoxicity Properties // Processes. 2021. Vol. 9 (12). P. 2264. doi: 10.3390/pr9122264.

10. *Motorzhina A. V., Pshenichnikov S. E., Anikin A. A. et al.* Gold / cobalt ferrite nanocomposite as a potential agent for photothermal therapy // J Biophotonics. 2024. Vol. 17 (7). doi: 10.1002/jbio.202300475.

11. *Berridge M. V., Herst P. M., Tan A.* S. Tetrazolium dyes as tools in cell biology: New insights into their cellular reduction // Biotechnol Annu Rev. 2005. P. 127—152. doi: 10.1016/S1387-2656(05)11004-7.

12. *Luminex Corporation*. Guava® Cell Cycle Reagent Package Insert. URL: www.luminexcorp.com (дата обращения: 10.09.2025).

13. *Wu K., Mohsin A., Zaman W. Q. et al.* Urchin-like magnetic microspheres for cancer therapy through synergistic effect of mechanical force, photothermal and photodynamic effects // J Nanobiotechnology. 2022. Vol. 20 (1). P. 224. doi: 10.1186/s12951-022-01411-y.

Об авторах

Анна Владимировна Моторжина — асп., мл. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

ORCID: 0000-0001-7419-3392

E-mail: AMotorzhina1@kantiana.ru

Антон Андреевич Аникин — PhD., науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

ORCID: 0000-0002-8739-7260

E-mail: AAAnikin@kantiana.ru

Станислав Евгеньевич Пшеничников — мл. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

ORCID: 0000-0002-6843-154X

E-mail: SPshenichnikov1@kantiana.ru

Соня Йованович — гл. науч. сотр., Институт ядерной физики «Винча» — Национальный институт Республики Сербия, Университет Белграда, Сербия.

ORCID: 0000-0003-3577-5060

E-mail: sonja.jovanovic@vinca.rs

Виктор Константинович Беляев — зав. лабораторией магнитооптических исследований, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

ORCID: 0000-0003-2772-3383

E-mail: vbelyaev@kantiana.ru

Лариса Владимировна Панина — д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия; проф. кафедры технологии материалов электроники, Университет науки и технологий МИСИС, Россия.

ORCID: 0000-0003-1252-8606

E-mail: LPanina@kantiana.ru

Екатерина Викторовна Левада — PhD., зав. лабораторией биомедицинских приложений, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

ORCID: 0000-0002-6369-2118

E-mail: ELevada@kantiana.ru

A. V. Motorzhina[1], A. A. Anikin[1], S. E. Pshenichnikov[1]
S. Jovanović[2], V. K. Belyaev[1], L. V. Panina[1, 3], K. V. Levada[1]

ENHANCED THERAPY USING GOLD / COBALT FERRITE NANOPARTICLES: SYNERGISTIC PHOTOTHERMAL-MAGNETOMECHANICAL EFFECT

[1] Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia
[2] Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia
[3] MISiS University of Science and Technology, Moscow, Russia
Received 15 September 2025
Accepted 25 October 2025
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-8

To cite this article: Motorzhina A. V., Anikin A. A., Pshenichnikov S. E., Jovanović S., Belyaev V. K., Panina L. V., Levada K. V., 2026, Enhanced Therapy Using gold / cobalt ferrite nanoparticles: Synergistic Photothermal-Magnetomechanical Effect, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 114—129. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-8.

The study investigated the effectiveness of composite gold-cobalt ferrite nanoparticles (Au@CFO) in photothermal and magnetomechanical therapy on human hepatocarcinoma Huh7 cells. The nanoparticles demonstrated significant activity during in vitro photothermal therapy and exhibited inherent cytotoxicity, reducing cell viability by 32 % at a concentration of 100 μg/mL. Photothermal therapy using an 808 nm laser further decreased viability by 25 %, while magnetomechanical therapy in an alternating field of 100 mT reduced Huh7 cell viability by an additional 17 %. Combined photothermal and magnetomechanical therapy resulted in a 47 % reduction in hepatocarcinoma cell viability compared to the control group. However, its direct efficiency was 14 %, as confirmed by fluorescence microscopy. The results highlight the potential of Au@CFO nanoparticles for the development of combined cancer treatment strategies.

Keywords: cobalt ferrite nanoparticles, gold nanoparticles, photothermal therapy, magnetomechanical therapy

The authors

Anna V. Motorzhina, PhD Student, Junior Research Associate, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
ORCID: 0000-0001-7419-3392
E-mail: AMotorzhina1@kantiana.ru

Dr Anton A. Anikin, Research Associate, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
ORCID: 0000-0002-8739-7260
E-mail: AAAnikin@kantiana.ru

Dr Stanislav E. Pshenichnikov, Junior Research Associate, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
ORCID: 0000-0002-6843-154X
E-mail: SPshenichnikov1@kantiana.ru

Dr Sonja Jovanović, Principal research fellow, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia.
ORCID: 0000-0003-3577-5060
E-mail: sonja.jovanovic@vinca.rs

Dr Victor K. Belyaev, Head of the Laboratory of Magnetooptical investigations, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
ORCID: 0000-0003-2772-3383
E-mail: vbelyaev@kantiana.ru

Prof. Larisa V. Panina, Senior Research Associate, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia; Prof. of the Department of Electronics Materials Technology, MISIS University of Science and Technology, Russia.
ORCID: 0000-0003-1252-8606
E-mail: LPanina@kantiana.ru

Dr Kateryna V. Levada, Head of the Laboratory of Biomedical Applications, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
ORCID: 0000-0002-6369-2118
E-mail: ELevada@kantiana.ru

УДК 579.64

Е. А. Бунеева[1, 2], *А. А. Толкачева*[1]
Д. А. Черенков[1, 2], *В. В. Ивченко*[1, 2], *О. С. Корнеева*[1]

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАКТЕРИЙ *BRADYRHIZOBIUM JAPONICUM* И *BRADYRHIZOBIUM ELKANII* В СОСТАВЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ИНОКУЛЯНТА ДЛЯ СЕМЯН СОИ

[1] Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Воронеж, Россия
[2] Всероссийский научно-исследовательский институт
сахарной свеклы и сахара им. А. Л. Мазлумова, Воронеж, Россия
Поступила в редакцию 01.11.2025 г.
Принята к публикации 12.12.2025 г.
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-9

Для цитирования: *Бунеева Е. А., Толкачева А. А., Черенков Д. А., Ивченко В. В., Корнеева О. С.* Исследование эффективности использования бактерий *Bradyrhizobium japonicum* и *Bradyrhizobium elkanii* в составе микробиологического инокулянта для семян сои // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2026. №1. С. 130—144. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-9.

Актуальной проблемой выращивания сои является разработка биологических инокулянтов на основе симбиотических азотофиксирующих микроорганизмов, обеспечивающих культуры необходимым количеством азота для полноценного развития растения и накопления достаточного количества белка. В частности, наиболее востребованы биологические инокулянты, содержащие клетки живых азотфиксирующих микроорганизмов. Перспективными объектами для разработки таких препаратов выступают клубеньковые бактерии рода Bradyrhizobium. *Цель исследования заключалась в выделении и изучении бактерий* Bradyrhizobium japonicum *и* Bradyrhizobium elkanii *и разработке на их основе микробиологического инокулянта для семян сои. Подобраны оптимальные условия культивирования выделенных клубеньковых бактерий для накопления максимального титра жизнеспособных клеток. Разработан состав микробиологического инокулянта и создан его прототип. Получены результаты полевых испытаний опытных образцов нового биопрепарата. Доказана эффективность применения разработанного инокулянта, содержащего клубеньковые бактерии* Bradyrhizobium japonicum *и* Bradyrhizobium elkanii *в выращивании сои.*

Ключевые слова: биопрепарат, клубеньковые бактерии, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bradyrhizobium elkanii*, микробиологический инокулянт, титр, соя, семена

Введение

Соя (*Glycine max (L.) Merr.*) — одна из самых востребованных бобовых культур в Российской Федерации. Ее ценность определяется биохимическим составом, так как содержание белка в семенах сои может достигать 50 %. На фоне ежегодного увеличения посевных площадей сои существует проблема недостаточного азотного питания. Это связано с тем, что основным веществом, необходимым для полноценного развития данной культуры, является азот, который чаще всего находится в недоступной для усвоения форме. Как правило, для решения этой проблемы применяют минеральные азотные удобрения. Однако они оказывают негативное влияние на почву, кроме того, нитраты могут накапливаться в самих растениях. Сегодня в сельскохозяйственном секторе активно развивается направление разработки биологических безопасных для окружающей среды удобрений, которые повышают уровень полезных микроорганизмов в почве и показывают высокую эффективность при применении [1; 3; 5; 12].

Альтернативой минеральным азотным удобрениям могут выступать препараты на основе симбиотических азотфиксирующих микроорганизмов. Они способны переводить молекулярный азот в соединения, доступные для питания растений. Известно, что симбиоз между бобовыми растениями и азотфиксирующими микроорганизмами способствует интенсивному росту растений и накоплению азота в почве. Так, для сои наиболее эффективными фиксаторами атмосферного азота выступают симбиотические бактерии семейства *Rhizobiaceae*. Известно, что симбиоз сои с клубеньковыми бактериями позволяет обеспечить до 70 % потребности растения в азотном питании. Типичными представителями семейства *Rhizobiacea*, обитающего на клубеньках сои, являются бактерии рода *Bradyrhizobium* [4; 8; 9].

По данным современных научных работ, обработка семян сои инокулянтом, содержащим бактерии рода *Bradyrhizobium*, способствует повышению урожайности и улучшению качественных характеристик культуры [2; 6]. Перспективным направлением исследований при разработке новых препаратов является поиск наиболее эффективных штаммов клубеньковых бактерий [13; 15]. Это обусловлено сорто-штаммовой специфичностью микроорганизмов — симбионтов сои [11]. Ранее опубликованы труды по подбору отдельных штаммов ризобий для конкретного сорта сои, которые были выделены из почвы или непосредственно из клубеньков. Применение таких бактерий в составе биопрепаратов показало высокую эффективность в повышении урожайности сои и содержании белка в семенах [7].

Кроме того, важным требованием к разрабатываемым биопрепаратам является высокий титр жизнеспособных клеток (не менее 10^9 КОЕ/мл). Для этого необходимо оптимизировать условия культивирования применяемых штаммов по следующим параметрам: состав питательной среды, температура, pH среды, продолжительность культивирования [14]. К тому же клубеньковые бактерии зачастую неустойчивы к внешним воздействиям при обработке семян. Поэтому необходимо использовать соответствующие протекторы в качестве дополнительного компонента разрабатываемых инокулянтов [10].

В связи с вышесказанным, целью данного исследования стала разработка нового инокулянта для семян сои. Были поставлены следующие задачи: подбор оптимальных условий культивирования для выделенных клубеньковых бактерий, обеспечивающих накопление клеток в количестве не менее 1×10^9 КОЕ/мл; разработка состава и получение прототипа микробиологического инокулянта; проверка эффективности полученного препарата в полевых условиях.

Материалы и методы исследований

В качестве объектов исследования были выбраны азотфиксирующие бактерии *Bradyrhizobium japonicum* и *Bradyrhizobium elkanii*. Микроорганизмы выделяли из клубеньков сои на среде, содержащей следующие компоненты (г/л): бобовый отвар; сахароза — 2; K_2HPO_4 — 0,1; $MgSO_4 \times 7H_2O$ — 0,03; краситель конго-красный — 1; агар — 1,5. Выделенную культуру хранили на скошенном маннито-дрожжевом агаре следующего состава (г/л): маннит — 10,0; дрожжевой экстракт — 0,5; K_2HPO_4 — 0,5; $MgSO_4 \times 7H_2O$ — 0,2; NaCl — 0,1; агар-агар — 15,0; конго красный — 20 мкл.

Для подбора оптимального состава питательной среды изучали влияние источников углерода на интенсивность роста бактерий *Bradyrhizobium japonicum* и *Bradyrhizobium elkanii*. Для этого в колбы с основной средой (состав (г/л): дрожжевой экстракт — 0,5; K_2HPO_4 — 0,5; $MgSO_4 \times 7H_2O$ — 0,2; NaCl — 0,1; агар-агар — 15,0) в количестве 10 г/л вносили по очереди маннит, мальтозу, сахарозу, глюкозу, лактозу и глицерин. Для постановки контроля использовали среду без добавления углеродного источника. Питательные среды стерилизовали в автоклаве в течение 30 минут при температуре 110 °C. Чистые культуры симбиотических клубеньковых бактерий высевали в пробирки с каждой средой в 10 повторах, после чего термостатировали при температуре 30 °C в течение 72 и 120 часов. По интенсивности роста штриха определяли оптимальный источник углерода.

Для подбора оптимального значения температуры азотфиксирующие микроорганизмы культивировали в колбах глубинным способом в 250 мл маннито-дрожжевой среды в течение 120 часов и 200 об/мин на шейкере-качалке. В процессе инкубации поддерживали следующие температурные режимы: 26, 28, 30, 32, 34 °C. По истечении 120 часов определяли вес сухой биомассы. Для этого бюксы высушивали в сушильном шкафу течение 2 часов при температуре 110 °C. Биомассу отделяли от культуральной жидкости с помощью центрифугирования при 3000 об/мин в течение 10 минут, помещали в бюксы и высушивали при 110 °C пока масса не достигала постоянного значения (колебания не превышали ±0,01 г). Бюксы с высушенной биомассой переносили в эксикатор с силикагелем, остужали и взвешивали.

Для подбора оптимальной концентрации ионов H+ азотфиксирующие микроорганизмы культивировали глубинным способом в 250 мл маннито-дрожжевой среды в течение 120 часов и 200 об/мин. В колбах доводили pH среды до следующих значений: 5,5; 6,5; 7,0; 7,5; 8,0. По истечении 120 часов определяли вес сухой биомассы.

Для определения оптимальной продолжительности времени культивирования строили кривые роста *B. japonicum* и *B. Elkanii*. Бактерии культивировали в лабораторном ферментере объемом 3 л, заполненном на ⅔ средой следующего состава (г/л): дрожжевой экстракт — 0,5; K_2HPO_4 — 0,5; $MgSO_4 \times 7H_2O$ — 0,2; NaCl — 0,1; маннит — 10. В среду вносили 7-суточный посевной материал в количестве 10 %. Процесс культивирования проводили при следующих параметрах:

1) время культивирования — 6 суток;
2) температура культивирования — 30 °C;
3) pH среды — 7;
4) частота перемешивания — 200 об/мин.

Контроль титра КОЕ/мл определяли каждые 2 часа в процессе культивирования с помощью высева глубинным методом на чашки Петри с маннито-дрожжевым агаром. Количество выросших колоний подсчитывали через 72 часа инкубирования чашек при 30 °C. Обработку данных проводили с помощью пакета прикладных статистических программ Ecxel.

Исследование выживаемости микроорганизмов на семенах сои проводили с помощью микробиологического анализа и подсчета КОЕ/г. Для этого делали смыв с семян, обработанных исследуемыми инокулянтами, и серию разведений. На чашки Петри с маннито-дрожжевой агаризованной средой высевали разведения 10^5, 10^7 и 10^9. Чашки инкубировали при 30 °C в течение 72 часов, после чего подсчитывали число выросших колоний. Посев и подсчет каждого из разведений проводили в трех повторностях. Для описания морфологических признаков и идентификации выросших колоний микроорганизмов проводили окрашивание по Граму и микроскопирование.

В качестве дополнительного консервирующего компонента инокулянта использовали глицерин. Для проверки его эффективности получали опытные образцы инокулянтов. Микроорганизмы выращивали на маннито-дрожжевой среде следующего состава (г/л): маннит — 10,0; дрожжевой экстракт — 0,5; K_2HPO_4 — 0,5; $MgSO_4 \times 7H_2O$ — 0,2; NaCl — 0,1; pH среды 7,0. Культивирование проводили при температуре инкубации 30 °C в течение 120 часов по достижении максимальной плотности культуры — 2×10^9 КОЕ/мл. В полученные образцы добавляли следующие концентрации глицерина: 10, 20, 30, 40 %. В качестве контроля использовали инокулянт без добавления консерванта. Образцы хранили при температуре 20 °C в течение 15, 30, 45 и 60 суток. Выбор наиболее эффективной концентрации консерванта проводили с помощью определения жизнеспособности бактерий. Для этого образцы инокулянтов разводили до 10^7; разведения 10^4—10^7 высевали глубинно на чашки Петри с маннито-дрожжевой агаризованной средой следующего состава (г/л): маннит — 10,0; дрожжевой экстракт — 0,5; K_2HPO_4 — 0,5; $MgSO_4 \times 7H_2O$ — 0,2; NaCl — 0,1; агар-агар — 15,0; конго красный — 20 мкл. Чашки термостатировали при 30 ^{0}C в течение 24 часов. Подсчитывали количество КОЕ/г, а также процент сохранивших жизнеспособность клеток относительно начального титра. Чистоту культуры в образцах инокулянта определяли методом микроскопирования выделенных колоний.

На этапе разработки состава прототипа микробиологического инокулянта был осуществлен подбор экстендера. В качестве экстендеров были исследованы растворы поливинилпирролидона, поливинилового спирта и гуммиарабика в концентрациях 1 и 2 % каждый. Экстендеры наносили на семена сои и выдерживали при комнатной температуре в течение суток. Для инокуляции культуральную жидкость, содержащую 2×10^9 КОЕ/мл клеток клубеньковых бактерий, и экстендер смешивали в соотношении 1:1. В качества контроля брали семена, обработанные препаратом без экстендера. По прошествии суток для определения числа живых бактерий был произведен смыв с семян и посев методом Коха.

Качество разработанного инокулянта определяли по структурному анализу сои. На опытном поле ФГБНУ «ВНИИСС им. А.Л. Мазлумова» высевали семена сои, обработанные препаратом с *Bradyrhizobium japonicum* (образец №1) и препаратом с *Bradyrhizobium elkanii* (образец №2), а также необработанные семена (контроль).

Результаты и их обсуждение

Оптимизация условий культивирования

Главная составляющая питательных сред для культивирования микроорганизмов — углеродный компонент, в качестве которого, как правило, используют различные сахара и спирты. Они обеспечивают энергетические потребности микроорганизмов и являются экономически целесообразными в применении. Результаты подбора углеводного компонента для симбиотических азотфиксирующих микроорганизмов представлены в таблице 1. На контрольной среде без источника углерода через 72 и 120 часов штаммы показали отрицательный рост (0 баллов). На средах с лактозой и глицерином наблюдали скудный рост (0—1 баллов). На средах с сахарозой, глюкозой и мальтозой через 72 часа рост был скудный (1—2 балла), а к 120 часам культивирования уже от умеренного до хорошего (2—3 балла). Самый обильный рост культуры показали на среде с маннитом через 120 часа — 4 балла. По результатам опыта в качестве источника углерода был выбран маннит в дозировке 10 г/л.

Таблица 1

Интенсивность роста клубеньковых бактерий

Штамм	Интенсивность роста штамма													
	72 часа инкубации							120 часов инкубирования						
	Контроль	Маннит	Мальтоза	Сахароза	Глюкоза	Лактоза	Глицерин	Контроль	Маннит	Мальтоза	Сахароза	Глюкоза	Лактоза	Глицерин
B. japonicum	0	2	1	1	1	0	0	0	4	2	3	2	1	1
B. elkanii	0	3	2	2	1	1	1	0	4	2	3	2	1	1

Одним из главных факторов, влияющих на выход биомассы микроорганизмов, выступает температура культивирования. Клубеньковые бактерии являются мезофилами, то есть их температурный оптимум лежит в диапазоне 25—30 °С. В таблице 2 приведены результаты подбора оптимального значения температуры культивирования *B. japonicum* и *B. elkanii*. В ходе опыта было определено, что наибольший выход биомассы азотфиксирующих бактерий достигался при 30 °С. При температуре 26 °С выход биомассы уменьшался на 50 %. При увеличении температуры до 32°С количество биомассы снижалось на 9 и 24 % для *B. japonicum* и *B. elkanii* соответственно.

Таблица 2

Влияние температуры культивирования на выход биомассы клубеньковых бактерий

Штамм	Количество сухой биомассы, г/л				
	26 °С	28 °С	30 °С	32 °С	34 °С
B. japonicum	1,03	1,83	2,17	2,09	1,98
B. elkanii	1,15	1,88	2,42	2,24	1,85

По отношению к реакции среды клубеньковые бактерии относятся к нейтрофилам, то есть их оптимум pH лежит в диапазоне 6,5—7,5. В таблице 3 приведены результаты по подбору оптимального значения pH при культивировании для *B. japonicum* и *B. elkanii*. Определено, что наибольшее значение выхода биомассы достигается в нейтральной среде — при pH = 7. В кислой среде (pH = 5,5) выход биомассы снижался на 80 %. В щелочной среде (pH = 8,0) выход биомассы микроорганизмов снижался на 60 %.

Таблица 3

Влияние pH среды на выход биомассы клубеньковых бактерий

Штамм	Количество сухой биомассы, г/л				
	5,5	6,5	7,0	7,5	8,0
B. japonicum	0,51	2,04	2,53	1,89	1,01
B. elkanii	0,45	1,99	2,58	1,83	1,05

Наибольшее количество биомассы микроорганизмов достигается в конце логарифмической фазы культивирования. Результаты определения оптимального времени культивирования *B. japonicum* и *B. elkanii* представлены на рисунках 1 и 2.

На графиках видно, что у бактерий рода *Bradyrhizobium* лаг-фаза начиналась через 77 – 80 часов культивирования. Логарифмическая фаза начиналась на 81-м часу культивирования. Через 120 часов накапливалось максимальное количество биомассы клубеньковых бактерий: для *B. japonicum* она составляет 2×10^9 КОЕ/мл, для *B. elkanii* – $2{,}1 \times 10^9$ КОЕ/мл. По результатам культивирования можно сделать вывод, что выбранные штаммы являются медленнорастущими, так как максимальной плотности обе культуры достигли через 5 суток.

Рис. 1. Кривая роста *B. japonicum* при глубинном культивировании на маннито-дрожжевой среде

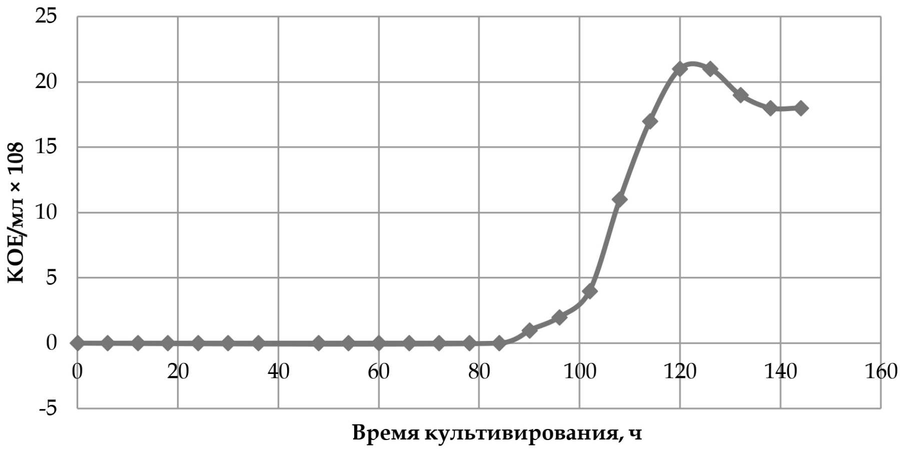


Рис. 2. Кривая роста *B. elkanii* при глубинном культивировании на маннито-дрожжевой среде

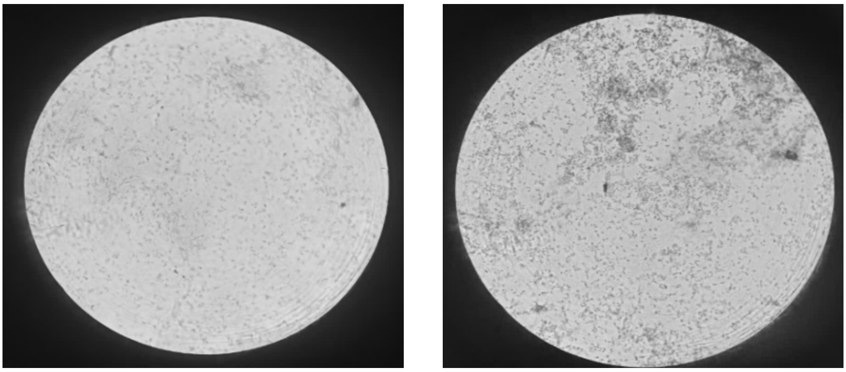
Стандартизация и консервация жидкой культуры

Стандартизация титра культуральной жидкости заключается в высеве смывов с обработанных семян полученными образцами препаратов на питательную среду, подсчете выросших колоний и их микроскопировании. В смывах с семян сои, обработанных препаратом с *B. elkanii*, наблюдали грамотрицательные, неспорообразующие мелкие палочковидные бактерии, которые соответствует указанному виду бактерий. В смывах с семян сои, обработанных препаратом с *Bradyrhizobium japonicum*, наблюдали грамотрицательные, неспорообразующие палочковидные бактерии, которые соответствуют указанному виду бактерий. Результаты представлены в таблице 4 и на рисунке 3.

Таблица 4

Микробиологический анализ инокулированных семян

Препарат	КОЕ/г	Микроорганизм	Морфологические признаки
1	1,8×10^9	*Bradyrhizobium elkanii*	Мелкие палочковидные бактерии, грамотрицательные, подвижные, не образуют спор
2	1,6×10^9	*Bradyrhizobium japonicum*	Палочковидные бактерии, грамотрицательные, подвижные, не образуют спор



а *б*

Рис. 3. Световая микроскопия, увеличение 90×15, Nikon eclipse E200:
а — Bradyrhizobium elkanii; *б — Bradyrhizobium japonicum*

Результаты исследования влияния концентрации глицерина на количество жизнеспособных бактерий в среде представлены в таблице 5.

Таблица 5

Определение жизнеспособности микроорганизмов при разной концентрации глицерина

Количество дней	Жизнеспособные микроорганизмы, %				
	Концентрации глицерина				
	10 %	20 %	30 %	40 %	Контроль
15	95,3	96,8	97,5	95,6	83,5
30	84,8	90,4	96,8	87,2	50,2
45	74,2	85,9	95,7	74,3	36,7
60	53,6	74,6	94,9	63,9	30,5

Самый низкий процент жизнеспособных бактерий наблюдали в образцах с концентрацией глицерина 10 и 40 %, самый высокий — при концентрации 30 %. В препаратах, содержащих 10 и 20 %, обнаружена посторонняя микрофлора (2,0×10^3 и 1,5×10^2 КОЕ/г соответственно). В препаратах с концентрацией глицерина 30 и 40 % посторонней микрофлоры не обнаружено. Таким образом, была подобрана оптимальная концентрация вносимого консерванта — 30 %.

Разработка состава прототипа микробиологического инокулянта

Для защиты клубеньковых бактерий от внешних негативных факторов и лучшей адгезии на семена используют прилипатели (экстендеры). Результаты подбора экстендера представлены в таблице 6. При использовании в качестве протектора поливинилового спирта в концентрации 2 % наибольшая доля бактерий сохраняет жизнеспособность. Для *B. japonicum* и *B. elkanii* она составила 62 и 65 % соответственно.

Таблица 6

Доля выживших в течение 24 часов после инокуляции бактерий

Состав экстендера	Бактерии, сохранившие жизнеспособность в сравнении с контролем, %	
	B. japonicum	*B. elkanii*
Поливинилпирролидон, 1 %	30	31
Поливинилпирролидон, 2 %	51	48
Поливиниловый спирт, 1 %	55	54
Поливиниловый спирт, 2 %	62	65
Гуммиарабик, 1 %	10	11
Гуммиарабик, 2 %	17	14

Изучение влияния инокулянта на сою в полевых условиях

Результаты определения начала времени формирования клубеньков на корнях приведены в таблице 7. Набухание семян, появление мелких корешков, вынос семядолей на поверхность у опытных образцов №1 и 2 наблюдали через 2 дня после посева, у контрольного образца — через 3 дня. Росток и первичные листья у опытных образцов №1 и 2 наблюдали на 3 день после посева, у контрольного — на 4 день. Появление всходов и начало формирования главного и боковых корней у образцов №1 и 2 начиналось на 10 день, у контрольного образца — на 11 день. Образование клубеньков началось в фазу появления первого тройчатого листа: у образцов №1 и 2 — на 23 день, у контрольного образца — на 25 день.

Таблица 7

Результаты определения начала времени формирования клубеньков на корнях

Наблюдаемые изменения	Опытный образец		
	к	1	2
	Количество дней после посева		
Набухание семян, появление мелких корешков, вынос семядолей	3	2	2
Появление ростка и первичных листьев	4	3	3
Всходы сои, формирование главного и боковых корней	11	10	10
Появление первого тройчатого листа, образование клубеньков	25	23	23

Наблюдение опытных образцов после высева и до фазы образования тройчатого листа

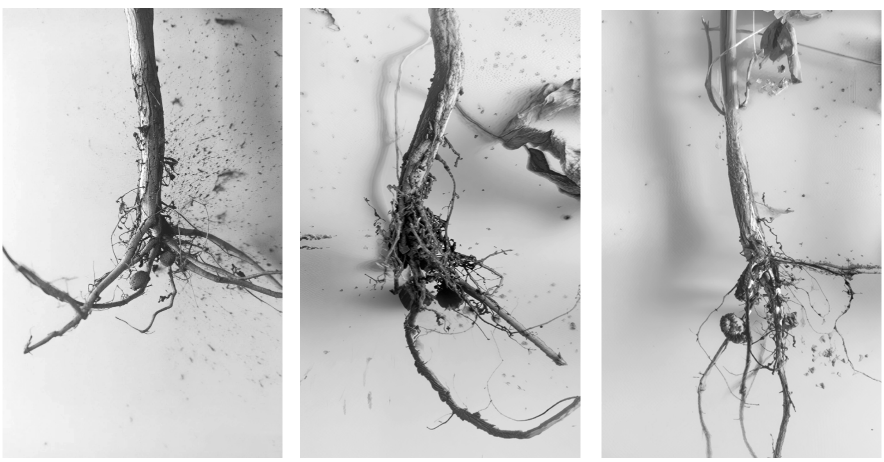
Начиная с фазы тройчатого листа велись наблюдения за динамикой формирования клубеньков. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8

Динамика формирования клубеньков

Фаза роста	День	Количество клубеньков на 1 растение, шт			Масса клубеньков, мг		
		к	1	2	к	1	2
Всходы	10–11	–	–	–	–	–	–
Образование первого тройчатого листа	23,25	1	2	2	2,24	3,95	3,78
Бутонизация	54,56	3	8	10	6,79	12,34	13,45
Цветение	65,67	5	11	12	10,25	18,96	18,43
Плодообразование	73	5	11	12	10,25	18,96	18,43
Созревание	85	4	10	10	8,76	16,45	15,67

Из таблицы видно, что наибольшее количество клубеньков образуется в фазе цветения, и их масса достигает максимального значения. У образцов №1, 2 данные показатели в два раза больше, чем у контроля. На рисунке 4 представлены сформировавшиеся клубеньки на образцах сои. В заключительной фазе созревания наблюдается уменьшение количества клубеньков и их массы.



а *б* *в*

Рис. 4. Сформировавшиеся клубеньки на образцах сои:
а — контроль; *б* — образец №1; *в* — образец №2

Наблюдения за динамикой формирования зеленой массы растений так же начинали с фазы первого тройчатого листа. Результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9

Динамика роста зеленой массы сои

Фаза роста	День	Зеленая масса растений сои, г		
		к	1	2
Всходы	10–11	–	–	–
Образование первого тройчатого листа	23, 25	10,28	13,41	13,95
Бутонизация	54, 56	28,76	39,08	37,23
Цветение	65, 67	35,76	45,17	53,54
Плодообразования	73	33,65	44,18	51,78
Созревания	85	30,76	42,65	49,76

Как видно из таблицы, образование зеленой массы у обработанных образцов начиналось на 2 дня раньше, чем у контрольного образца. Максимальное количество зеленой массы, состоящей из стеблей и листьев, у всех образцов было отмечено в фазу цветения. У образцов №1, 2 зеленная масса превышала контроль в 1,3–1,5 раза. Начиная с фазы плодообразования, количество зеленой массы опытных растений уменьшалось.

Урожайность изучаемых образцов составила 30,0 ц/га в контроле, 32,1 ц/га в первом варианте и 33,0 ц/га во втором варианте. Превышение над контролем составило от 2,1 до 3,0 ц/га (табл. 10). Высота растений сои колебалась от 86,7 до 93,8 см (рис. 5).

Таблица 10

Урожайность и длинна вегетационного периода сои 2024 г.

Сортообразец	Урожай, ц/га	Прибавка к контролю, ц/га	Вегетационный период, дни
Контроль	30,0	–	97
Вариант 1	32,1	+2,1	97
Вариант 2	33,0	+3,0	97
НСР – 1,529			

Рис. 5. Выращенная соя

Таким образом, урожайность сои, семена которой были обработаны инокулянтоми 1 и 2, больше урожайности неинокулированной на 2,1 ц/га (1) и 3,0 (2) ц/га, соответственно.

Выводы

1. Подобраны оптимальные условия культивирования *Bradyrhizobium elkanii* и *Bradyrhizobium japonicum* для накопления титра клеток $2{,}1\times10^9$ КОЕ/мл и $2{,}0\times10^9$ КОЕ/мл соответственно. Температура 30 °C, pH среды 7,0, продолжительность 120 часов, источник углерода — маннит.

2. Разработан состав прототипа микробиологического инокулянта. В качестве консерванта выбран глицерин в дозировке 30 % от объема культуральной жидкости. В качестве экстендера выбран раствор 2 % поливинилового спирта, смешиваемый с бактериальной суспензией в соотношении 1 : 1.

3. Проведены полевые испытания разработанного прототипа инокулянта. Определено, что формирование клубеньков началось с фазы образования настоящего тройчатого листа и закончилось в фазе цветения. В среднем число клубеньков было выше на 50 % по сравнению с необработанными контрольными образцами. Количество зеленой массы растений, выращенных из обработанных семян, превышало контроль в 1,3—1,5 раза. Урожайность обработанных растений оказалась выше контроля в среднем на 2,1—3 ц/га.

Таким образом, разработанные инокулянты на основе бактерий *Bradyrhizobium japonicum* и *Bradyrhizobium elkanii* могут применятся в сельском хозяйстве для повышения продуктивности выращивания сои.

Список литературы

1. *Chibeba A. M., Kyei-Boahen S., de Fátima Guimarães M. et al.* Towards sustainable yield improvement: field inoculation of soybean with *Bradyrhizobium* and co-inoculation with *Azospirillum* in Mozambique // Arch Microbiol. 2020 №202 (9). P. 2579—2590. doi: 10.1007/s00203-020-01976-y.

2. *Jarecki W.* Soybean Response to Seed Inoculation or Coating with *Bradyrhizobium japonicum* and Foliar Fertilization with Molybdenum // Plants (Basel). 2023. №12 (13). P. 2431. doi: 10.3390/plants12132431.

3. *da Conceição Jesus E., de Almeida Leite R., do Amaral Bastos R. et al.* Co-inoculation of *Bradyrhizobium* stimulates the symbiosis efficiency of *Rhizobium* with common bean // Plant Soil. 2018. №425. P. 201—215. doi: 10.1007/s11104-017-3541-1.

4. *Lima A. F., Salles J. S., Vendruscolo E. P. et al.* Management of Inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* and Application of Vitamins for Hydroponic Soybean Cultivation // Int J Microbiol. 2024. P. 446—463. doi: 10.1155/2024/4463693.

5. *Lodeiro A. R.* Interrogantes en la tecnología de la inoculación de semillas de soja con *Bradyrhizobium* spp [Queries related to the technology of soybean seed inoculation with *Bradyrhizobium* spp] // Rev Argent Microbiol. 2015. №47 (3). P. 261—273. doi: 10.1016/j.ram.2015.06.006.

6. *Mathenge C., Thuita M., Masso C. et al.* Variability of soybean response to rhizobia inoculant, vermicompost, and a legume-specific fetilizer blend in Siaya County of Kenya // Soil and Tillage Research. 2019. №194. P. 1—13. doi: 10.1016/j.still.2019.06.007.

7. *Omari R.A., Yuan K., Anh K.T. et al.* Enhanced Soybean Productivity by Inoculation With Indigenous *Bradyrhizobium* Strains in Agroecological Conditions of Northeast Germany // Front Plant Sci. 2022. №12. P. 770—780. doi: 10.3389/fpls.2021.707080.

8. *Pan H., Shim A., Lubin M.B., Belin B.J.* Hopanoid lipids promote soybean — *Bradyrhizobium* symbiosis // bioRxiv [Preprint]. 2023. P. 556—574. doi: 10.1101/2023.09.04.556284.

9. *Tao J., Wang S., Liao T., Luo H.*Evolutionary origin and ecological implication of a unique nif island in free-living *Bradyrhizobium* lineages // ISME J. 2021. №11. P. 3195—3206. doi: 10.1038/s41396-021-01002-z.

10. *Zeffa D.M., Fantin L.H., Koltun A. et al.* Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on co-inoculation with *Bradyrhizobium* in soybean crop: a meta-analysis of studies from 1987 to 2018 // Peer J. 2020. №9. P. 79—85. doi: 10.7717/peerj.7905.

11. *Васильчиков А.Г., Акулов А.С.* Поиск высокоэффективных инокулянтов для перспективных сортообразцов сои // Зернобобовые и крупяные культуры. 2019. №4 (32). С. 66—71. doi: 10.24411/2309-348X-2019-11134.

12. *Смирнова И.Э., Саданов А.К.* Бактерии для повышения урожайности сои // Актуальная биотехнология. 2021. №1. С. 61—65. doi: 10.20914/2304-4691-2021-1-61-65.

13. *Смирнова И.Э., Саданов А.К., Бабаева Ш.А. и др.* Штамм клубеньковых бактерий для создания биоудобрения для культуры сои (Glycine max (L.) Merr.) // Микробиология и вирусология. 2023. №2 (41). С. 117—130. doi: 10.53729/MV-AS.2023.02.07.

14. *Сорокина А.И., Якименко М.В., Бегун С.А.* Динамика роста титра микробных клеток штаммов *Bradyrhizobium japonicum* и *Sinorhizobium fredii* при глубинном культивировании в лабораторном ферментере // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2021. №3 (217). С. 92—99. doi: 10.37102/0869-7698_2021_217_03_15.

15. *Умаров Б.Р.* Ризобиальные бактерии рода *Sinorhizobium fredii* и *Bradyrhizobium japonicum* вступающие в симбиоз с растениями сои // Universum: Химия и биология. 2019. №4 (58).

Об авторах

Екатерина Александровна Бунеева — студ., Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия; лаборант-исследователь, Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова, Россия.

E-mail: buneeva5katerina@yandex.ru

Анна Александровна Толкачева — ст. преп., Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия.

ORCID: 0000-0003-0725-6482

E-mail: anna-biotech@yandex.ru

SPIN-код: 3621-2463

Дмитрий Александрович Черенков — д-р биол. наук, проф., Воронежский государственный университет инженерных технологий; вед. науч. сотр., Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова, Россия.
ORCID: 0000-0002-8564-8919
E-mail: d.cherenkov@mail.ru
SPIN-код: 4196-4407

Василиса Владимировна Ивченко — студ., Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия; техник IV категории, Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова, Россия.
E-mail: ivchenko.vasilisa@yandex.ru

Ольга Сергеевна Корнеева — проректор по научно-исследовательской деятельности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия.
ORCID: 0000-0002-2863-0771
E-mail: korneeva-olgas@yandex.ru
SPIN-код: 3616-5977

E.A. Buneeva[1, 2], A.A. Tolkacheva[1]
D.A. Cherenkov[1, 2], V.V. Ivchenko[1, 2], O.S. Korneeva[1]

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF USING BACTERIA *BRADYRHIZOBIUM JAPONICUM* AND *BRADYRHIZOBIUM ELKANII* AS A MICROBIOLOGICAL INOCULANT FOR SOY SEEDS

[1] Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia
[2] All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar, Russia
Received 01 November 2025
Accepted 12 December 2025
doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-9

To cite this article: Buneeva E.A., Tolkacheva A.A., Cherenkov D.A., Ivchenko V.V., Korneeva O.S., 2026, Study of the effectiveness of using bacteria *Bradyrhizobium japonicum* and *Bradyrhizobium elkanii* as a microbiological inoculant for soy seeds, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural Sciences,* №4 P. 130—144. doi: 10.5922/vestniknat-2026-1-9.

A current challenge in soybean cultivation is the development of biological inoculants based on symbiotic nitrogen-fixing microorganisms, which provide the crop with the necessary amount of nitrogen for full plant development and sufficient protein accumulation. In particular, biological inoculants containing live nitrogen-fixing microbial cells are in high demand. Nodulating bacteria of the genus Bradyrhizobium *are considered promising candidates for such inoculants. The aim of this study was to isolate and investigate* Bradyrhizobium japonicum *and* Bradyrhizobium elkanii *and to develop a microbiological seed inoculant based on* *these bacteria. Optimal cultivation conditions were determined to achieve the maximum titer of viable bacterial cells. A microbiological inoculant composition was developed, and a prototype was created. Field trials of the experimental samples of the new bioproduct were conducted. The study demonstrates the effectiveness of the developed inoculant containing* Bradyrhizobium japonicum *and* Bradyrhizobium elkanii *in soybean cultivation.*

Keywords: biological product, nodule bacteria, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bradyrhizobium elkanii*, microbiological inoculant, titer, soy, seeds

The authors

Ekaterina A. Buneeva, student, Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia; lab.-researcher, All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar named after A. L. Mazlumov, Russia.
E-mail: buneeva5katerina@yandex.ru

Anna A. Tolkacheva, Senior Lecturer, Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia.
ORCID: 0000-0003-0725-6482
E-mail: anna-biotech@yandex.ru
SPIN code: 3621-2463

Prof. Dmitry A. Cherenkov, Voronezh State University of Engineering Technologies; Leading Researcher, All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar named after A. L. Mazlumov, Russia.
ORCID: 0000-0002-8564-8919
E-mail: d.cherenkov@mail.ru
SPIN code: 4196-4407

Vasilisa V. Ivchenko, student, Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia; technician of the IV category, All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar named after A. L. Mazlumov, Russia.
E-mail: ivchenko.vasilisa@yandex.ru

Olga S. Korneeva, Vice-Rector for Research Activities, Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia.
ORCID: 0000-0002-2863-0771
E-mail: korneeva-olgas@yandex.ru
SPIN code: 3616-5977

ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В ВЕСТНИКЕ БФУ им. И. КАНТА

Серия: Естественные науки

Правила публикации статей в журнале

1. Представляемая для публикации статья должна быть актуальной, обладать новизной, содержать постановку задач (проблем), описание основных результатов исследования, полученных автором, выводы, а также соответствовать правилам оформления.

2. Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не публиковавшимся ранее в других изданиях. При отправке рукописи в редакцию журнала автор автоматически принимает на себя обязательство не публиковать ее ни полностью, ни частично без согласия редакции.

3. Рекомендованный объем статьи — не менее 20 тыс. знаков с пробелами.

4. Все присланные в редакцию работы проходят двойное «слепое» рецензирование, а также проверку системой «Антиплагиат», по результатам которых принимается решение о возможности включения статьи в журнал. Рецензентами выступают как члены редакционной коллегии журнала, так и внешние эксперты.

5. Статьи на рассмотрение принимаются в режиме онлайн. Для этого авторам нужно зарегистрироваться на портале Единой редакции научных журналов БФУ им. И. Канта *https://journals.kantiana.ru/submit/* и следовать подсказкам в разделе «Подать статью онлайн».

6. Решение о публикации (или отклонении) статьи принимается редакционной коллегией журнала после ее рецензирования и обсуждения.

7. Автор имеет право публиковаться в одном выпуске журнала один раз; второй раз — в соавторстве (в исключительном случае и только по решению редакционной коллегии).

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

Комплектность и форма представления авторских материалов

1. Статья должна содержать следующие элементы:

а) индекс УДК — должен достаточно подробно отражать тематику статьи (основные правила индексирования по УДК см.: *http://www.naukapro.ru/metod.htm*);

б) название статьи строчными буквами на русском и английском языках *(до 12 слов)*;

в) аннотацию на русском и английском языках *(150 – 250 слов, то есть 500 печатных знаков)*. Располагается перед ключевыми словами после заглавия;

г) ключевые слова на русском и английском языках *(4 – 8 слов)*. Располагаются перед текстом после аннотации;

д) список литературы, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. Должен включать от 15 до 30 источников, не менее 50 % которых должны представлять современные (не старше 10 лет) публикации в изданиях, рецензируемых ВАК, и (или) в международных изданиях. Оптимальный уровень самоцитирования автора — не выше 10 % от списка использованных источников;

е) сведения об авторах на русском и английском языках (ФИО полностью, ученые степени, звания, должность, место работы (организация, город, страна), e-mail, ORCID);

ж) сведения о языке текста, с которого переведен публикуемый материал.

2. Ссылки на литературу в тексте статей даются только в квадратных скобках с указанием номера источника из списка литературы, приведенного в конце статьи: первая цифра — номер источника, вторая — номер страницы (например: [12, с. 4]).

3. Рукописи, не отвечающие требованиям, изложенным в пункте 1, в печать не принимаются, не редактируются и не рецензируются.

Общие правила оформления текста

Авторские материалы должны быть подготовлены ***в электронной форме*** в формате листа А4 (210×297 мм).

Все текстовые авторские материалы принимаются исключительно в формате *doc* и *docx* (Microsoft Office).

Подробная ***информация о правилах оформления текста***, в том числе ***таблиц, рисунков, ссылок и списка литературы***, размещена на сайте Единой редакции научных журналов БФУ им. И. Канта: *https://journals.kantiana.ru/vestnik/nature/rules/*.

Порядок рецензирования рукописей статей

1. Редакционная коллегия журнала «Вестник БФУ им. И. Канта. Серия: Естественные науки» осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих ее тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

2. Ответственный редактор журнала определяет соответствие статьи профилю журнала, требованиям к оформлению и направляет ее на рецензирование специалисту, доктору или кандидату наук, имеющему наиболее близкую к теме статьи научную специализацию.

3. Сроки рецензирования в каждом отдельном случае определяются ответственным редактором с учетом создания условий для максимально оперативной публикации статьи.

4. В рецензии освещаются следующие вопросы:

а) степень интереса тематики для читателей журнала;

б) степень оригинальности статьи;

в) точность и адекватность представленной информации;

г) знание существующего состояния дел по данной проблематике;

д) стиль и манера изложения;

е) логичность построения статьи.

5. Рецензирование проводится конфиденциально. Автор рецензируемой статьи может ознакомиться с текстом рецензии. Нарушение конфиденциальности допускается только в случае заявления рецензента о недостоверности или фальсификации материалов, изложенных в статье.

6. Если в рецензии содержатся рекомендации по исправлению и доработке статьи, ответственный редактор направляет автору текст рецензии с предложением учесть их при подготовке нового варианта статьи или аргументированно (частично или полностью) их опровергнуть. Доработанная (переработанная) автором статья повторно направляется на рецензирование.

7. Статья, не рекомендованная рецензентом к публикации, к повторному рассмотрению не принимается. Текст отрицательной рецензии направляется автору по электронной почте.

8. Наличие положительной рецензии не является достаточным основанием для публикации статьи. Окончательное решение о целесообразности публикации принимается редколлегией журнала.

9. После принятия редколлегией журнала решения о допуске статьи к публикации ответственный редактор информирует об этом автора и указывает сроки публикации.

10. Текст рецензии направляется автору по электронной почте.

11. Редакция журнала «Вестник БФУ им. И. Канта. Серия: Естественные науки» направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

Научное издание

ВЕСТНИК
БАЛТИЙСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
им. И. КАНТА

Серия

Естественные науки

2026

№ 1

Редактор *О.И. Бессчастнова*
Компьютерная верстка *Е.В. Денисенко*

Подписано в печать 17.02.2026 г.
Формат 70 × 108 1/16. Усл. печ. л. 12,9