

Вестник 2025

Балтийского федерального
университета
им. И. Канта

Серия
Естественные
и медицинские науки
№ 1

ISSN 2500-3208

БФУ БАЛТИЙСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ИММАНУИЛА КАНТА

IKVBU IMMANUEL KANT
BAL TIC FEDERAL
UNIVERSITY

ВЕСТНИК
БАЛТИЙСКОГО
ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМ. И. КАНТА

Серия
Естественные и медицинские
науки

№1

Калининград
Издательство Балтийского федерального университета
им. Иммануила Канта
2025

12+

Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта.
Сер.: Естественные и медицинские науки. — 2025. — №1. — 149 с.

Редакционная коллегия

И. С. Гуменюк, канд. геогр. наук, БФУ им. И. Канта (главный редактор);
С. С. Антипов, д-р биол. наук, проф., Воронежский государственный университет; *А. Г. Архипов*, д-р биол. наук, Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО»; *Е. И. Голубева*, д-р биол. наук, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; *В. А. Гриценко*, д-р физ.-мат. наук, проф., БФУ им. И. Канта; *А. Г. Дружинин*, д-р геогр. наук, проф., Северо-Кавказский научно-исследовательский институт экономических и социальных проблем, ЮФУ; *В. В. Жуков*, канд. биол. наук, доц., БФУ им. И. Канта; *Ю. М. Зверев*, канд. геогр. наук, доц., БФУ им. И. Канта; *Е. Г. Кропинова*, д-р геогр. наук, проф., БФУ им. И. Канта; *С. С. Литвинова*, д-р мед. наук, проф., БФУ им. И. Канта; *А. Г. Манаков*, д-р геогр. наук, проф., Псковский государственный университет; *А. Ф. Мейсурова*, д-р биол. наук, проф., Тверской государственный университет; *Т. Пальмовский*, д-р географии, проф., Гданьский университет; *А. Разбадаускас*, проф., Клайпедский университет; *И. В. Реверчук*, д-р мед. наук, д-р психол. наук, проф., Самаркандский государственный медицинский университет, АНО ДПО «Биоинститут охраны соматопсихического здоровья»; *В. В. Сивков*, канд. геол.-минерал. наук, Атлантическое отделение, Институт океанологии РАН; *Э. Спиряевас*, проф., Клайпедский университет; *Д. А. Субетто*, д-р геогр. наук, проф., РГПУ им. А. И. Герцена; *С. А. Сухих*, д-р техн. наук, доц., БФУ им. И. Канта; *Г. Н. Чупахина*, д-р биол. наук, проф., БФУ им. И. Канта

Учредитель

Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта

Редакция

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

Издатель

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

Типография

236001, Россия, Калининград, ул. Гайдара, 6

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС 77-65779 от 20 мая 2016 г.



Дата выхода в свет 26.03.2025 г.

© БФУ им. И. Канта, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география

Теренина Н. К. Пространственные особенности динамики славяно-тюркских контактных зон в Поволжско-Уральском регионе в 2010–2021 годы 5

Прокофьев А. Д. Пространственные различия в профессиональной структуре занятости у этногеографических групп в США 18

3

Физическая география, геоэкология и океанология

Сукманова Т. В., Белов Н. С. Цифровой двойник как инструмент моделирования и оптимизации сложных природных и технических систем 40

Баймуратов Р. А., Напренко М. Г., Шангина А. А. Аккумуляционная способность мохообразных торфяно-болотных экосистем Калининградской области 58

Биология, биотехнология и экология

Тихонов С. Л., Тихонова Н. В. Физико-химическая характеристика, антиоксидантные свойства и влияние нового синтезированного пептида на отложение липидов в клетках 71

Абдул-Галил Ахмед Али, Кригер О. В. Получение и применение бактериальной целлюлозы 82

Кулакова С. А., Торопов Л. И., Баянкин А. Я. Возможность использования осадка сточных вод биологических очистных сооружений для целей зеленого строительства и биологической рекультивации 103

Матыцина В. В., Рухляда К. А., Кригер О. В. Влияние температурного режима и спектрального состава света на рост биомассы цианобактерии *Synechococcus* sp. В-1200 114

Пишеничников С. Е., Моторжина А. В., Аникин А. А., Панина Л. В., Левада Е. В. Потенциал использования композитных нано- и микроматериалов в качестве агента для биомедицинских применений 127

Шамаев Н. Д., Курынцева П. А., Селивановская С. Ю. Формирование групп роста у микроводорослей рода *Chlorella* в зависимости от объема вносимой базовой питательной среды и температуры 140

CONTENTS

Economic, social, political and recreational geography

Terenina N. K. Spatial features of the dynamics of Slavic-Turkic contact zones in the Volga-Ural region in 2010–2021 5

Prokofev A. D. Spatial differences in the occupational structure among ethnogeographic groups in the United State 18

4

Physical geography, geoecology and oceanology

Sukmanova T. V., Belov N. S. Digital twin as a tool for modeling and optimization of complex natural and technical systems 40

Baymuratov R. A., Napreenko M. G., Shangina A. A. Element accumulation in bryophytes in peatland ecosystems of the Kaliningrad region, Russia 58

Biology, biotechnology and ecology

Tikhonov S. L., Tikhonova N. V. Physical and chemical characteristics, antioxidant properties and the effect of the newly synthesized peptide on lipid deposition in cells 71

Abdoul-Galil Ahmed Ali, Krieger O. V. Production and application of bacterial cellulose 82

Kulakova S. A., Toropov L. I., Bayankin A. Ya. The possibility of using the remaining wastewater from biological treatment plants for the purposes of green construction and biological reclamation 103

Matytsina V. V., Rukhlyada K. A., Kriger O. V. The influence of temperature regime and spectral composition of light on the growth of biomass of the cyanobacterium *Cyanobacterium* sp. B-1200 114

Pshenichnikov S. E., Motorzhina A. V., Anikin A. A., Panina L. V., Levada K. V. Perspectives of using of composite nano- and micromaterials as agents for biomedical applications 127

Shamaev N. D., Kuryntseva P. A., Selivanovskaya S. Yu. Cultivation of local micralgae isolates with assessment of biomass productivityomacc 140

УДК 913:314

Н. К. Теренина

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ
СЛАВЯНО-ТЮРКСКИХ КОНТАКТНЫХ ЗОН
В ПОВОЛЖСКО-УРАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ В 2010 – 2021 ГОДАХ**

5

Псковский государственный университет, Псков, Россия

Поступила в редакцию 09.01.2025 г.

Принята к публикации 10.02.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-1

Для цитирования: Теренина Н. К. Пространственные особенности динамики славяно-тюркских контактных зон в Поволжско-Уральском регионе в 2010 – 2021 годах // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 5 – 17. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-1.

Статья посвящена выявлению особенностей динамики территориальной структуры контактных зон между славянскими и тюркскими народами в Поволжско-Уральском регионе во втором десятилетии XXI в. Эмпирической основой исследования является этническая статистика на уровне муниципальных образований по итогам переписей населения 2010 и 2021 г. В статье используются авторские методики определения внешних границ двухкомпонентных этноконтактных зон, степени их выраженности и этнической контрастности, а также выделения стадий их развития за определенный временной интервал. В качестве основной тенденции в динамике славяно-тюркских контактных зон во втором десятилетии XXI в. выступил рост контактности, сопровождающийся увеличением доли как славян, так и тюрков, а также частичное растворение этноконтактных зон в пользу титульных этносов в границах тюркских республик, растворение этноконтактных зон в пользу славян за пределами тюркских республик Урало-Поволжья.

Ключевые слова: индекс этнической контактности, двухкомпонентная этноконтактная зона, этническая контрастность, коэффициент Соросо

Введение

Многонациональность России создает широкое исследовательское поле для изучения одного из феноменов этнокультурного пространства страны – этноконтактных зон (далее – ЭКЗ). Вместе с тем актуальность изучения ЭКЗ определяется неоднозначностью процессов трансфор-



мации этнокультурного пространства России в постсоветский период. В данной работе ЭКЗ рассматриваются как компонент территориальной структуры этнокультурного пространства, формирующийся в результате наложения двух или более этнических систем. Для анализа вертикальной (по удельному весу представителей разных этносов) и территориальной структуры ЭКЗ необходим поиск показателей, на основе которых могут быть разработаны новые методики в рамках концепции ЭКЗ.

Цель исследования — выявление особенностей динамики территориальной структуры контактной зоны между славянскими и тюркскими народами в Поволжско-Уральском регионе в период между переписями населения 2010 и 2021 г. Славяно-тюркская контактная зона, выделенная в настоящем исследовании на метаэтническом уровне, может быть рассмотрена как совокупность контактных зон между славянами и отдельными тюркскими народами, что учитывается при определении территориальной структуры данной контактной зоны.

Регион исследования включает 20 субъектов Российской Федерации, в том числе все 14 субъектов Приволжского федерального округа (6 республик, 1 край и 7 областей), 3 области Уральского федерального округа (Свердловскую, Курганскую и Челябинскую), а также 1 республику (Калмыкию) и 2 области Южного федерального округа (Волгоградскую и Астраханскую). Обозначенные субъекты РФ входят в состав трех экономических районов (Волго-Вятского, Поволжского и Уральского), которые в сумме можно рассматривать как Поволжско-Уральский регион в широком понимании. При этом нужно отметить, что существует более узкий взгляд на Урало-Поволжье как на совокупность территорий только двух экономических районов — Уральского и Поволжского.

Степень изученности проблемы

Вопросам расселения и этнодемографии тюркских народов в Поволжско-Уральском регионе посвящено достаточно много публикаций. Особо нужно отметить работы, в которых проанализирована динамика расселения тюркских народов, входящих в первую десятку наиболее многочисленных национальностей России (в скобках указана их численность по итогам переписи 2021 г.): татар (4,7 млн чел.), башкир (1,57 млн чел.), чувашей (1,07 млн чел.) и казахов (592 тыс. чел.).

Так, например, динамика численности чувашей в разных регионах страны в течение XX и начале XXI в. рассмотрена в статьях [7; 22]. Пространственно-временной анализ динамики расселения татар в России проведен в работе [11], а на территории соседних с Татарстаном республик — в исследованиях [2; 21]. Этнодемография башкир в разных регионах страны рассматривается в статьях [1; 15]. При этом внимание уделяется вопросам нестабильной этнической самоидентификации (татарской или башкирской) значительной части населения северо-запада Башкортостана, на которую влияют политические установки местных властей в ходе проведения переписей населения [3; 16].

Также следует отметить, что во многих регионах Поволжья и Урала повышена доля тюркского населения, не имеющего в России своих на-



циональных автономий: азербайджанцев, казахов, узбеков, киргизов, туркмен и др. Вопросы расселения казахов в смежных с Казахстаном регионах России обсуждаются в работах [8; 18]. В данных исследованиях делается акцент на миграционной подвижности населения приграничных территорий. Причем трансграничные миграции рассматриваются как важный фактор формирования и трансформации ЭКЗ российско-казахстанского порубежья [5].

Методика и информационная база исследования

В качестве информационной базы исследования выступает статистика национального состава населения на уровне муниципальных образований регионов Поволжья и Урала по итогам Всероссийских переписей населения 2010 и 2021 г., представленная на сайтах Федеральной службы государственной статистики¹ и региональных отделений Росстата.

Основным показателем исследования, позволяющим провести внешние границы этноконтрастных зон, определить их территориальную структуру и степень выраженности, является индекс этнической мозаичности (далее – ИЭМ), внедренный в отечественную науку Б.М. Эккелем [24]. Рассматриваемый показатель известен за рубежом как индекс этнической (или этнолингвистической) фракционализации [27; 30]. В иностранных исследованиях имеется опыт анализа этого индекса в разных странах мира за длительный временной интервал. В данном случае показатель обозначается как исторический индекс этнической фракционализации [25; 26].

У ИЭМ имеется ряд недостатков, главным из которых выступает неопределенность верхней границы интервала его значений. В связи с этим С. А. Горохов [6] предложил модифицированный вариант индекса, значения которого меняются от нуля (в случае, если в регионе представлен только один этнос) до единицы (максимальная мозаичность при равном соотношении нескольких этнических групп).

Но в нашем исследовании используется вариант ИЭМ, рассчитываемый для двухкомпонентных этнических систем (двухэтнических ЭКЗ). Он был назван нами индексом этнической контактности (далее – ИЭК) [19]. Подобно ИЭМ, ИЭК позволяет оценить вероятность контакта разных народов, но в данном случае речь идет о представителях только двух этносов или метаэтнических групп (например, титульное / нетитульное или коренное / некоренное население и т. п.). Величина ИЭК меняется от 0 до 0,5, но более удобным для анализа является модифицированный вариант индекса, значения которого укладываются в интервал от нуля до единицы в соответствии с предложением С. А. Горохова [6].

Формула для расчета модифицированного индекса этнической контактности (далее – МИЭК) следующая: $МИЭК = k \frac{пА}{пВ}$, где $пА$ – удельный вес этноса А в населении региона, $пВ$ – удельный вес этноса В в населении региона, k – поправочный коэффициент, отражающий «межэтнические расстояния». Фактически по данной формуле этноде-

¹ Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/perepisi_naseleniya (дата обращения: 10.08.2024).



мографы рассчитывают вероятность заключения межэтнических браков, что используется при изучении этнически смешанных семей [17]. Так как в работе рассматриваются этноконтактные зоны между двумя группами метаэтнического уровня (славянами, включая русских, белорусов и украинцев, а также тюркскими народами, включая татар, башкир, чувашей, казахов, узбеков, киргизов, туркмен, азербайджанцев и др.), рассчитанный показатель назван модифицированным индексом метаэтнической контактности (далее – МИМЭК).

Следует отметить, что ИЭМ нередко применяется для анализа изменений в этнической структуре населения регионов за определенный временной интервал. Так, можно отметить работы, где расчет ИЭМ за разные годы используется для оценки динамики этнической гетерогенности республик Урало-Поволжья [10] и регионов Приволжского федерального округа [23]. Но в этом плане более интересны исследования, где осуществлено картографирование динамики ИЭМ. Такой опыт имеется как в зарубежной науке (например, [28]), так и в отечественных исследованиях (например, [12]). При этом авторами данной работы разработана методика анализа развития двуэтничных ЭКЗ, когда динамика МИМЭК вместе с изменением соотношения долей двух компонентов ЭКЗ позволяет выявить фазу и стадию развития ЭКЗ [19]. Предложенная методика была апробирована нами на уровне муниципальных образований тюркских республик Урало-Поволжья по итогам переписей населения с 1989 по 2021 г. [13].

В развитии ЭКЗ выделяются две основные фазы («роста» в случае увеличения МИМЭК и «растворения» при его падении), каждая из которых делится на две стадии. Первая и четвертая характеризуют начальный и заключительный этапы развития ЭКЗ (зарождение ЭКЗ и ее полное растворение). Вторая и третья стадии – основные в развитии ЭКЗ. Критерием их отделения от первой и четвертой является величина МИМЭК, равная 0,19. Именно МИМЭК = 0,19 рассматривается нами как рубеж, позволяющий оконтурить на карте территорию этноконтактных зон. В целом же градация МИМЭК опирается на следующие значения индекса: 0,0975; 0,19; 0,36; 0,75; 1,0. Интерпретация данных значений МИМЭК следующая – в случае, если представители двух этнических (метаэтнических) групп в сумме составляют 100 % (что, однако, происходит редко), их соотношение при достижении обозначенных значений МИМЭК будет соответствовать 2,5 на 97,5 %, 5 на 95 %, 10 на 90 %, 25 на 75 %, 50 на 50 %.

С точки зрения оценки по данной шкале МИМЭК вероятности контакта между представителями двух метаэтнических групп можно говорить соответственно о крайне низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой вероятности контакта. Вместе с тем значения МИМЭК от 0,19 до 0,36 свидетельствуют о наличии неярко выраженных ЭКЗ, МИМЭК от 0,36 до 0,75 – о ярко выраженных ЭКЗ, МИМЭК от 0,75 до 1,0 – о наиболее ярко выраженных ЭКЗ. Данная градация МИМЭК заметно отличается от предложенной С. А. Гороховым [6] шкалы модифицированного ИЭМ (опирающейся на значения показателя, равные 0,28, 0,556 и 0,82, которые соответствуют следующим соотношениям двух этносов: 7,6 на 92,4 %, 16,7 на 83,3 % и 28,8 на 71,2 %). Но, на наш взгляд, шкалу Горохова лучше использовать для многокомпонентных ЭКЗ, а двухкомпонентная



ЭКЗ имеет свою специфику, требующую несколько более дробной градации. Предложенная нами шкала также удобнее с позиции картографирования величины МИМЭК.

Результаты исследования

В соответствии с итогами переписи населения Российской Федерации 2021 г., а также основываясь на величине коэффициента этнической контрастности (коэффициента Сороко) внутри пар народов, была рассчитана этническая контрастность границ с соседними регионами России пяти республик Урало-Поволжья: Башкортостана, Татарстана, Чувашии, Мордовии и Удмуртии.

По итогам Всероссийской переписи населения, проведенной в 2021 г., в Поволжско-Уральском регионе были выявлены определенные особенности территориальной структуры контактной зоны между славянскими и тюркскими народами. Как и следовало ожидать, основные участки наиболее ярко выраженной ЭКЗ (МИМЭК свыше 0,75) с перевесом тюркского населения (синяя окраска на рисунке 1) находились в пределах трех тюркских республик – Чувашии, Татарстана и Башкортостана. Но аналогичные участки ЭКЗ представлены и в других регионах – в Астраханской и Саратовской областях (из-за высокой доли казахов), в Курганской и Челябинской областях (вследствие большого удельного веса башкирского и татарского населения), а также еще в ряде регионов (благодаря высокой доле татар).

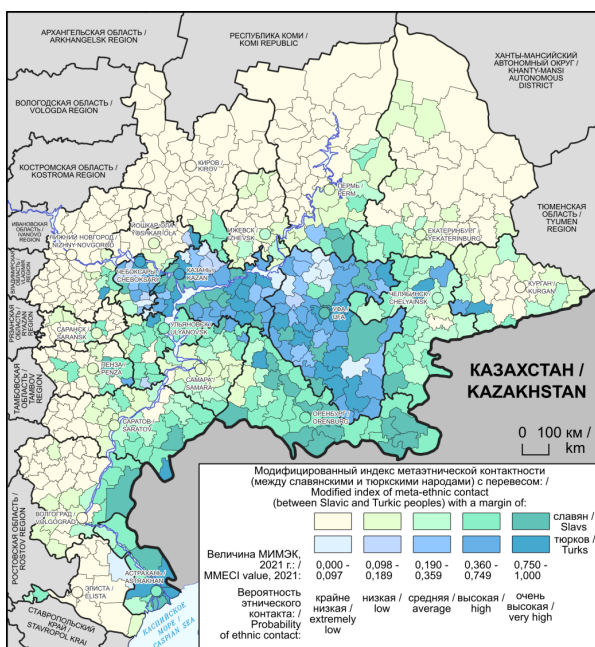


Рис. 1. Территориальная структура контактной зоны между славянскими и тюркскими народами в Поволжско-Уральском регионе по итогам переписи населения 2021 г.



С другой стороны, нужно обратить внимание на немногочисленные муниципальные образования, обладающие перевесом тюркского населения, но не являющиеся частью славяно-тюркской контактной зоны (с МИМЭК менее 0,19). Эти участки, на рисунке выделенные светлыми оттенками синего цвета, представлены преимущественно в пределах тюркских республик, но есть и исключения в виде отдельных муниципальных образований в республиках Калмыкия и Марий Эл, а также в Ульяновской области. В большинстве случаев такие территории гомогенны в метаэтническом плане с явным преобладанием тюркского населения (в том числе татар в Старокулаткинском районе Ульяновской области). Однако крайне низкая степень контактности тюркского и славянского населения (при перевесе тюрков) в Параньгинском районе Республики Марий Эл и Юстинском районе Республики Калмыкии вызвана большим удельным весом в этих районах титульных этносов (соответственно, марийцев и калмыков).

Кроме основного пояса, ядрами которого являются республики Чувашия, Татарстан и Башкортостан, славяно-тюркская контактная зона в Поволжско-Уральском регионе включает еще один пояс, протянувшийся вдоль границ с Казахстаном. Но там славяно-тюркская контактная зона, за исключением ряда районов Астраханской и Саратовской областей, характеризуется перевесом славянского населения. На карте участки ярко выраженной ЭКЗ с перевесом славянского населения выделены оттенками интенсивного зеленого цвета.

На рисунке 2 представлена типология муниципальных образований Поволжско-Уральского региона по динамике МИМЭК и изменению доли славянского / тюркского населения между переписями 2010 и 2021 г. Выделение типов муниципальных образований осуществлено в соответствии с рассмотренными выше двумя фазами и четырьмя стадиями развития ЭКЗ. Всего же выделено 11 типов муниципальных образований, так как кроме основных вариантов динамики удельного веса народов, а именно увеличения доли славянского или тюркского населения, встречаются районы, где наблюдается сокращение доли славян и тюрков, что чаще всего связано с миграционным притоком на эти территории иных народов.

В целом следует отметить, что преобладающим трендом динамики соотношения славянских и тюркских народов в Поволжско-Уральском регионе является увеличение доли славянского населения (розово-оранжевая цветовая гамма). Рост доли славян продолжается в большинстве муниципальных образований, расположенных за пределами славяно-тюркской контактной зоны, а точнее, на северной и западной окраинах Поволжско-Уральского региона (тип 4с). Хотя здесь высока доля районов, где из-за миграционного притока других народов (или же увеличения доли титульных народов в нетюркских республиках) произошло одновременное уменьшение доли славянского и тюркского населения (тип 4).

На территориях, окружающих тюркские республики Урало-Поволжья, а также пограничных с Казахстаном, преобладающим типом динамики ЭКЗ стало растворение славяно-тюркской контактной зоны в пользу славян (светло-розовый цвет, тип 3с). При этом в самих тюркских



республиках, а также в ряде районов, расположенных на небольшом отдалении от них или же пограничных с Казахстаном, часто наблюдается рост славяно-тюркской контактности при увеличении доли славян (розовый цвет, тип 2с) или тюркских народов (синий цвет, тип 2т).

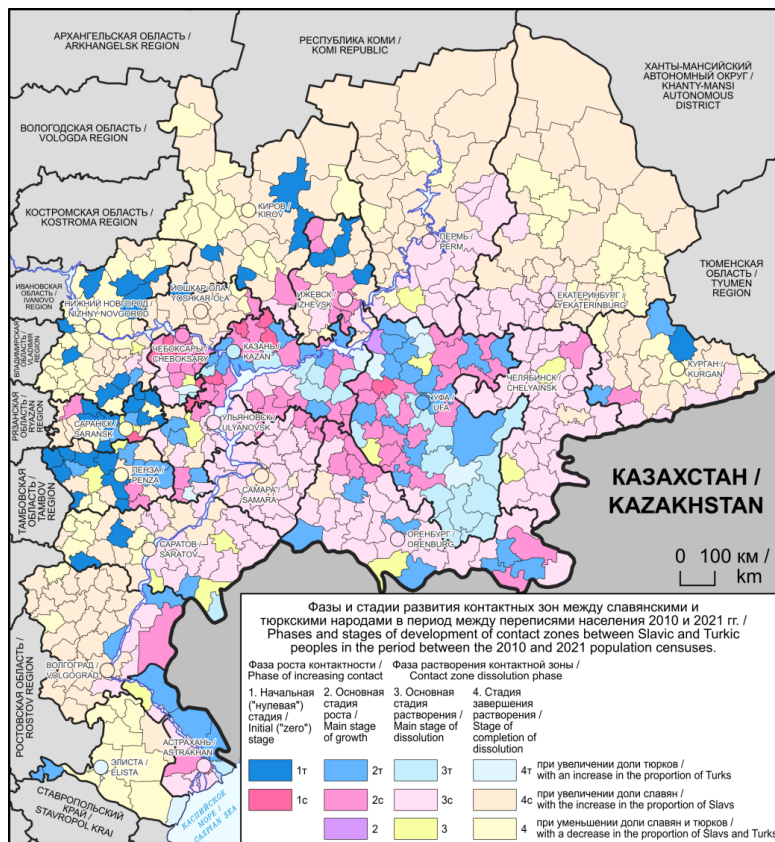


Рис. 2. Изменение территориальной структуры контактной зоны славянских и тюркских народов между переписями населения 2010 и 2021 г.

Рост доли тюркских народов с 2010 по 2021 г. (сине-голубая цветовая гамма) в Поволжско-Уральском регионе был представлен лишь частично на территориях, входящих в славяно-тюркскую контактную зону. Основная (голубой цвет, тип 3т) и завершающая (светло-голубой цвет, тип 4т) стадии растворения ЭКЗ в пользу тюркских народов характеризуют группы муниципальных образований тюркских республик (особенно в южной части Башкортостана и на востоке Татарстана), а также единичные районы вне этих республик, например, расположенные на границе с Казахстаном в Саратовской и Астраханской областях. А вот в Калмыкии растворение славяно-тюркской контактной зоны в столице и одном из районов, сопровождаемое ростом доли тюркского населения, объясняется все же исключительно увеличением удельного веса калмыков и уменьшением суммарной доли славянского и тюркского населения.



Особо нужно отметить тип динамики, характеризуемый ростом доли тюркских народов на начальной («нулевой») стадии развития ЭКЗ (ярко-синий цвет, тип 1т). Этот тип муниципальных образований представлен в ряде регионов, не входящих в славяно-тюркскую контактную зону. Обычно такой рост на этих территориях связан не с увеличением численности тюркского населения, а с менее значительным падением его численности на фоне более быстрой убыли славянского населения. То есть эти районы едва ли можно рассматривать в качестве формирующихся новых участков славяно-тюркской контактной зоны, так как для этого необходим стабильный рост не только доли, но и численности тюркского населения.

Обсуждение и заключение

Главной особенностью территориальной структуры славяно-тюркской контактной зоны в Поволжско-Уральском регионе является наличие двух соприкасающихся поясов, первый из которых образуют тюркские республики Урало-Поволжья с прилегающими территориями, а второй — районы российско-казахстанского приграничья. В первом поясе представлены как ярко выраженные ЭКЗ с перевесом тюркского или славянского населения, так и территории с доминированием тюркских народов. Во втором поясе преобладают несколько менее выраженные ЭКЗ с перевесом славянского населения.

Вместе с тем научный интерес представляет не только оценка степени выраженности ЭКЗ, но и этнической контрастности в пределах двух поясов славяно-тюркской контактной зоны. Так, например, авторами публикаций [4; 9] было предложено осуществить типологию ЭКЗ по степени этнокультурной близости (положительной или отрицательной комплиментарности) составляющих ЭКЗ народов. В частности, на Северном Кавказе выделено два типа и подтипа ЭКЗ: 1а) исключительно комплиментарные; 1б) относительно комплиментарные; 2а) исключительно контрастные; 2б) относительно контрастные [9, с. 134]. Данная типология ЭКЗ строится на основе качественных признаков (историческая, языковая, конфессиональная и т. п. близость этносов).

Нами же предложено осуществить аналогичную классификацию ЭКЗ на основе количественных признаков [20]. В ее основу классификации положен коэффициент этнической контрастности (далее — КЭК), рассчитанный Е. Л. Сороко [17; 29] по итогам переписи населения 2010 г. для 11 народов, проживающих в России. Поэтому в качестве второго названия данного показателя нами был предложен вариант «коэффициент Сороко». Он рассчитывается исходя из частоты межэтнической брачности и изначально был обозначен автором как «межэтнические расстояния». Схожий показатель для оценки степени ассимилируемости этносов использует, например, А. Ю. Орлов [14].

Коэффициент этнической контрастности присутствует в представленной выше формуле расчета индекса этнической контактности [13; 19], однако апробацию этого показателя нам удалось осуществить только на уровне республик Урало-Поволжья [20]. Значение КЭК, равное единице, по замыслу Е. Л. Сороко, должно отражать отсутствие предпо-



чений при создании супружеских пар. Величина КЭК менее единицы означает предпочтительное образование этнически смешанных семей, более единицы — существование каких-то препятствий для заключения смешанных браков. Так, например, рассчитанное Е. Л. Сороко «межэтническое расстояние» русских с чувашами составило 0,75, с татарами — 0,84, с казахами — 0,97, с башкирами — 1,55 [17, с. 113].

Нами предложена следующая классификация ЭКЗ по степени этнической близости народов: 1) исключительно комплиментарные (при КЭК менее 0,8); 2) относительно комплиментарные (при КЭК от 0,8 до 0,9, например, Чувашия и Удмуртия); 3) условно комплиментарные (КЭК от 0,9 до 1, например, Мордовия и Татарстан); 4) относительно контрастные (КЭК от 1 до 1,2, например, Башкортостан) [20, с. 71]. Рассчитанное для всей славяно-тюркской контактной зоны в европейской части России значение КЭК составляет 1,03, то есть рассматриваемую зону в целом можно отнести к классу относительно контрастных ЭКЗ, а корректировка МИМЭК с учетом КЭК является минимальной.

При этом в пределах славяно-тюркской контактной зоны в Поволжско-Уральском регионе можно выделить три части, характеризующиеся разной величиной КЭК. В первую входят Чувашия, Татарстан и прилегающие территории; ее можно отнести к классу относительно комплиментарных ЭКЗ. Вторая часть включает Башкортостан и ряд более восточных территорий Южного Урала, и ее можно охарактеризовать как контрастную ЭКЗ. Третья часть — это российско-казахстанское приграничье, которое может рассматриваться как условно комплиментарная ЭКЗ.

Основными тенденциями в динамике славяно-тюркской контактной зоны в период между переписями населения 2010 и 2021 г. являлись: 1) растворение ЭКЗ в пользу славян за пределами тюркских республик Урало-Поволжья; 2) рост контактности, сопровождающийся увеличением доли как славян, так и тюрков в границах тюркских республик. Но на значительной части территории тюркских республик наблюдалось также и растворение ЭКЗ в пользу титульных этносов.

Кроме того, при рассмотрении динамики славяно-тюркской контактной зоны можно обратить внимание на постепенное стирание перемычки между двумя основными поясами, охватывающими тюркские республики Урало-Поволжья и российско-казахстанское приграничье. Связующее звено этих двух поясов ЭКЗ приходится на территорию Оренбургской области, где самый узкий его участок, известный как Кувандыкский коридор, представлен двумя районами (Гайским и Кувандыкским). Этот участок славяно-тюркской контактной зоны в 2010—2021 гг. находился в стадии растворения ЭКЗ в пользу славянского населения. Но все же следует отметить, что расположенные к востоку от Кавандыкского коридора Новоорский и Ясный муниципальные районы все же имеют иную динамику, а точнее, переживают рост славяно-тюркской контактности при увеличении доли тюркского населения.

Выявленные в ходе исследования тренды в динамике территориальной структуры славяно-тюркской контактной зоны в Поволжско-Уральском регионе с высокой степенью вероятности сохранятся в ближайшей перспективе. Наиболее значимыми этом плане будут процессы, развивающиеся за пределами тюркских республик Урало-Поволжья,



определяемые в большей степени ассимиляционными процессами, чем иными факторами динамики этнической структуры населения. Как показало наше предыдущее исследование [13], в самих тюркских республиках Урало-Поволжья между переписями населения в постсоветское время были представлены разные варианты динамики титульных народов (особенно на северо-западе Башкортостана), что, однако, принципиально не изменило территориальную структуру ЭКЗ. Но все же в данном случае нужно учесть общую тенденцию постсоветского периода к росту доли тюркского населения на большей части территории Татарстана и Башкортостана, что следует ожидать и в ближней перспективе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта № 23-17-00005 «Этноконтактные зоны на постсоветском пространстве: генезис, типология, конфликтогенность».

Список литературы

1. Асылгужин Р. Р. Некоторые аспекты расселения и этнической идентичности тюркского населения в Южном Зауралье: башкиры и мишари Челябинской области РФ // Проблемы востоковедения. 2016. № 2 (72). С. 14 – 21. EDN: WMHPZ.
2. Воронцов В. С., Касимов Р. Н. Татары в Удмуртской Республике: история появления и специфика расселения в крае // Педагогический родник. 2017. № 2. С. 45 – 50. EDN: YLDCUJ.
3. Габдрафиков И. М. Переписи населения в татаро-башкирском пограничье: политизация этностатистики // Вестник антропологии. 2021. № 3. С. 17 – 23. <https://doi.org/10.33876/2311-0546/2021-3/17-23>.
4. Герасименко Т. И., Родман Б. Б. Этноконтактные зоны как вид этнокультурных регионов // Социально-экономическая география. Вестник Ассоциации российских географов-обществоведов. 2018. № 7. С. 51 – 59. EDN: URONKN.
5. Герасименко Т. И., Святоха Н. Ю. Роль трансграничных миграций в формировании и трансформации этноконтактных зон (пример Российско-Казахстанского порубежья) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 1 (68). С. 41 – 58. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-1-41-58>.
6. Горохов С. А. Религиозная мозаичность как фактор экономического развития регионов современного мира // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2014. № 4. С. 56 – 61. EDN: TAVMZH.
7. Иванов В. П. Динамика расселения и численности чувашей в XX в. // Регионоведение. 2005. № 3 (52). С. 191 – 197. EDN: MBVVD.
8. Ларина Е. И., Наумова О. Б. Миграция казахов в западной части российско-казахстанского пограничья // Вестник Евразии. 2006. № 4. С. 32 – 48. EDN: HVPYFH.
9. Лысенко А. В., Азанов Д. С., Водопьянова Д. С. Этноконтактные зоны в системе этнокультурного районирования Северного Кавказа // Наука. Инновации. Технологии. 2013. № 1. С. 130 – 137. EDN: RTNOIX.
10. Манаков А. Г., Григорьева О. А. Изменение этнической структуры населения республик Урало-Поволжья: выявление трендов с 1926 по 2010 гг. // Вестник Псковского государственного университета. Сер.: Естественные и физико-математические науки. 2023. Т. 16, № 1. С. 13 – 30. EDN: RBSHYL.



11. Манаков А. Г., Петрова А. А. Картографирование расселения и динамики численности татар в советское и постсоветское время // Вестник Псковского государственного университета. Сер.: Естественные и физико-математические науки. 2022. Т. 15, №1. С. 41–52. EDN: WKMLCV.

12. Манаков А. Г., Сидорович А. А., Иванов И. А. Сдвиги в структуре этнического пространства Прибалтики с конца XIX века до начала 1920-х годов // Псковский регионологический журнал. 2024. Т. 20, №3. С. 3–23. <https://doi.org/10.37490/S221979310031766-5>.

13. Манаков А. Г., Теренина Н. К., Иванов И. А. Динамика этноконтактных зон в тюркских республиках Урало-Поволжья в постсоветский период // Регионология. 2024. Т. 32, №1. С. 108–125. <https://doi.org/10.15507/2413-1407.126.032.202401.108-125>.

14. Орлов А. Ю. Геодемографические исследования этноассимиляционных процессов (на примере населения Приволжского федерального округа) // География и природные ресурсы. 2011. №1. С. 129–136. EDN: NDRINP.

15. Сафин Ф. Г., Абрамова С. Р., Ишемгулов М. Н. Этнодемография башкир в регионах России (1970–2010) // Научный диалог. 2021. №3. С. 397–415. <https://doi.org/10.24224/2227-1295-2021-3-397-415>.

16. Сафин Ф. Г., Кулышарипов Ф. Р., Скогорев С. В. Контрадикторность этнодемографических процессов в Башкортостане (1979–2020 гг.) // Вестник антропологии. 2023. №3. С. 319–337. <https://doi.org/10.33876/2311-0546/2023-3/319-337>.

17. Сороко Е. Л. Этнически смешанные супружеские пары в Российской Федерации // Демографическое Обозрение. 2014. Т. 1, №4. С. 96–123. <https://doi.org/10.17323/demreview.v1i4.1804>.

18. Ташипекова А. Т., Ташипеев Г. А. К вопросу о расселении казахов в Саратовском Поволжье // Современные евразийские исследования. 2017. №3. С. 129–137. EDN: YAUYZF.

19. Теренина Н. К. Индекс этнической контактности как инструмент изучения территорий со смешанным национальным составом населения // Псковский регионологический журнал. 2022. Т. 18, №1. С. 101–116. <https://doi.org/10.37490/S221979310018427-2>.

20. Теренина Н. К., Владыкин Б. А. Динамика коэффициента этнической контрастности в республиках Урало-Поволжья с 1926 по 2021 гг. // Псковский регионологический журнал. 2024. Т. 20, №1. С. 60–76. <https://doi.org/10.37490/S221979310029516-0>.

21. Тесленок С. А., Исхакова М. Ю. Картографирование пространственно-временной динамики расселения татар на территории Республики Мордовия // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6, №3. С. 287–293. <https://doi.org/10.37279/2309-7663-2020-6-3-287-293>.

22. Трифонова З. А., Лобастова О. А., Ростовцева М. М., Викторов О. Н. Динамика расселения чувашей в России и сопредельных государствах с 1926 года по 2010 год // Вестник Чувашского университета. 2016. №4. С. 146–153. EDN: ХНҚКҮТ.

23. Уставщикова С. В. Изменения в этнической гетерогенности регионов Приволжского федерального округа // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер.: Науки о Земле. 2017. Т. 17, №1. С. 20–26. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2017-17-1-20-26>.



24. Эккель Б. М. Расчет индекса мозаичности для этнического состава республик, краев и областей СССР // Советская социология. 1979. Т. 18, вып. 1. С. 47–63. <https://doi.org/10.2753/SOR1061-0154180147>.

25. *Dražanová L.* Historical Index of Ethnic Fractionalization Dataset (HIEF) // Harvard Dataverse. 2019. Vol. 2. doi: 10.7910/DVN/4JQRCL/KXFOBL. URL: <https://dataverse.harvard.edu/file.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/4JQRCL/KXFOBL> (дата обращения: 08.01.2025).

26. *Dražanová L.* Introducing the Historical Index of Ethnic Fractionalization (HIEF) Dataset: Accounting for Longitudinal Changes in Ethnic Diversity // Journal of Open Humanities Data. 2020. Vol. 6, №1. <https://doi.org/10.5334/johd.16>.

27. *Greenberg J. H.* The Measurement of Linguistic Diversity // Language. 1956. Vol. 32, №1. P. 109–115. <https://doi.org/10.2753/SOR1061-0154180147>.

28. *Németh Á.* Ethnic diversity and its spatial change in Latvia, 1897–2011 // Post-Soviet Affairs. 2013. <https://doi.org/10.1080/1060586X.2013.807604>.

29. *Soroko E.* How the methods of natural sciences can help in the studies of ethnically mixed families? // Journal of Physics: Conference. Ser. 2: Computer Simulations in Physics and Beyond, CSP 2017. 2018. P. 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/955/1/012035>.

30. *Ziller C.* Ethnic Diversity, Economic and Cultural Contexts, and Social Trust: Cross-Sectional and Longitudinal Evidence from European Regions, 2002–2010 // Social Forces. 2014. Vol. 93, №3. P. 1211–1240. <https://doi.org/10.1093/sf/sou088>.

Об авторе

Наталья Константиновна Теренина — канд. геогр. наук, доц., Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: brazelon@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-5288-9409

SPIN-код: 3280-7324

N. K. Terenina

SPATIAL FEATURES OF THE DYNAMICS OF THE SLAVIC-TURKIC CONTACT ZONES IN THE VOLGA-URAL REGION IN 2010–2021

Pskov State University, Pskov, Russia

Received 09 January 2025

Accepted 10 February 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-1

To cite this article: Terenina N.K., 2025, Spatial features of the dynamics of Slavic-Turkic contact zones in the Volga-Ural region in 2010–2021, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 5–17. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-1.

The article examines the dynamics of the territorial structure of contact zones between Slavic and Turkic peoples in the Volga-Ural region during the second decade of the 21st century. The empirical basis of the study consists of ethnic statistics at the municipal level, derived from



the 2010 and 2021 population censuses. The article employs original methodologies for identifying the external boundaries of two-component ethno-contact zones, assessing their degree of distinctiveness and ethnic contrast, and determining the stages of their development over a given time period. The key trends in the dynamics of Slavic-Turkic contact zones in the second decade of the 21st century include an increase in contact intensity, manifested in the growing proportion of both Slavs and Turks, as well as the partial dissolution of ethno-contact zones in favor of titular ethnic groups within the borders of Turkic republics. Outside the Turkic republics of the Volga-Ural region, the dissolution of ethno-contact zones tends to favor Slavic populations.

Keywords: ethnic contact index, two-component ethnic contact zone, ethnic contrast, Soroko coefficient

The study was supported by the Russian Science Foundation within project № 23-17-00005 “Ethnic contact zones in the post-Soviet space: genesis, typology, conflict potential”.

The author

Dr Natalia K. Terenina, Pskov State University, Russia.

E-mail: brazelon@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-5288-9409

SPIN-код: 3280-7324

А. Д. Прокофьев

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАЗЛИЧИЯ
В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ЗАНЯТОСТИ
У ЭТНОГЕОГРАФИЧЕСКИХ ГРУПП В США**

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 26.12.2024 г.

Принята к публикации 27.01.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-2

18

Для цитирования: Прокофьев А. Д. Пространственные различия в профессиональной структуре занятости у этногеографических групп в США // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 18 – 39. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-2.

В силу этногеографического разнообразия американского социума, тема различий в занятости между этногеографическими группами в США вызывает неугасающий интерес у исследователей-обществоведов. В то же время, несмотря на немалое количество работ по данной теме, вопрос изменения структуры занятости этногеографических групп в пространстве был обделён вниманием. В связи с этим данное исследование ставит перед собой цель выявить пространственные различия в занятости этногеографических групп в США. Проанализированы 25 крупнейших городских территорий и 12 этногеографических групп. Для сравнения структуры занятости этногеографической группы со структурой занятости всего населения рассматриваемой городской территории, а также со структурой занятости городских представителей данной группы в США в работе использован индекс диссимилиации. Кроме того, были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между городскими и общеамериканскими внутри-профессиональными отклонениями для каждой группы. В результате было выявлено, что рассматриваемые этногеографические группы, за исключением американцев, в большинстве случаев проявляют общность в выборе профессий на крупнейших городских территориях США. Анализ также позволил выделить городские общности, совсем не похожие по своей структуре занятости на остальных представителей данных групп в других городах США – русских в Сакраменто и Портленде и мексиканцев в Бостоне.

Ключевые слова: этногеографическая группа, структура занятости, профессиональная специализация, городская территория, население США, пространственные различия

Введение

Население Соединенных Штатов отличается этногеографической пестротой, которая находит свое отражение во многих сферах жизни страны, в том числе в экономике. Так еще в «Гарвардской энциклопедии



американских этнических групп» 1980 г. уникальный паттерн занятости выделялся в качестве одной из главных отличительных черт этнических групп в США [22], что подтверждалось последующими исследованиями [14; 26; 27]. Особенно узкоспециализированными с профессиональной точки зрения являются иммигранты первого поколения, что отчасти связано с тем, что они полагаются на социальные связи при поиске работы, а этнические сети связывают вновь прибывающих иммигрантов с их оседлыми соотечественниками и облегчают этот процесс. В результате происходит сегментация рынка труда по этническому признаку, и формируются определенные отрасли и профессии с концентрацией работников одного этногеографического происхождения.

Американскими исследователями было разработано четыре подхода, объясняющих различия в занятости этногеографических групп. Впервые их обобщенный обзор был сделан в статье Цинфана Вана [25]. *Неоклассическая теория* (она же *теория человеческого капитала*) утверждает, что такие различия возникают из-за изменений в спросе на рабочую силу и ее предложении. Согласно данной теории, некоторые работники обладают специализированными знаниями и навыками, которые востребованы в определенных сферах деятельности, и это обуславливает выбор профессий, которые максимизируют отдачу от их конкурентных преимуществ [20]. При этом, такие знания и навыки в силу тех, или иных причин (например, врожденных способностей, культурно-исторических факторов и т.д.) могут различаться у представителей разных этнических групп, в результате чего та, или иная группа получает сравнительное преимущество в определенном секторе экономики [25].

В то же время *теория сегментации труда* говорит о существовании двух сегментов рынка труда — первичном и вторичном. Первичный характеризуется лучшими условиями, более высокой заработной платой, долгосрочной занятостью и возможностями для продвижения по службе. Вторичный имеет противоположные характеристики: плохие условия труда, низкую заработную плату, краткосрочную занятость и минимальные возможности для карьерного продвижения [25]. Коренные меньшинства (из-за дискриминации и меньших возможностей для развития важных навыков) и иммигранты (из-за культурных, языковых и информационных барьеров), как правило, представляют большинство работников во вторичном сегменте труда [14]. С этой точки зрения этнические меньшинства или иммигранты находятся в менее выгодном положении в конкуренции на открытом рынке труда независимо от их образования и уровня квалификации [25].

Теория социального капитала утверждает, что этническая специализация формируется посредством социальных связей (сетей) среди представителей одной этнической группы для доступа к возможностям трудоустройства, в то время как работодатели используют социальные связи своих сотрудников для сокращения расходов [12; 20]. Социальный капитал развивается внутри групп на основе некоторого набора общностей и формирует фундамент, с помощью которого члены поддерживают друг друга посредством передачи информации и предоставления возможностей [14]. Таким образом, информация о возможностях ведения бизнеса и занятости в определенных секторах экономики может рас-



пространяться работниками этих секторов среди лиц той же этнической принадлежности, в результате чего происходит концентрация представителей этнической группы в определенных профессиях [25].

Наконец, *теория преемственности (сукцессионная теория)* объясняет формирование этнической ниши через этническую преемственность и пространственное несоответствие мест приложения труда и мест проживания представителей группы [20]. Она предполагает, что специализация иммигрантов и этнорасовых меньшинств формируется по мере того, как «белые» работники (или более ассимилированные, предприимчивые иммигранты) децентрализуются и переезжают в пригороды, оставляя вакантные низкооплачиваемые и менее востребованные рабочие места для «небелых» этнических групп и новых иммигрантов [14]. Пространственное несоответствие мест приложения труда и мест проживания представителей группы проявляется в том, что этнические общины, географически расположенные ближе к определенным промышленным или профессиональным секторам, с большей вероятностью будут работать в этих секторах, чем члены других этнических общин [20].

Вышеприведенные теории подтверждают, что различия между этногеографическими группами по занятости существуют. Однако, несколько вопросов остаются без ответа. Всегда ли этногеографическая специфика доминирует над спецификой места? Если нет, то в каких случаях и почему этого не происходит? Попытка ответить на данные вопросы и составляет содержание настоящей работы.

Цель исследования состоит в выявлении пространственных различий в занятости этногеографических групп в США. Объект исследования — этногеографические группы населения США. Предмет исследования — пространственные различия в занятости их представителей. Для достижения цели поставлены три задачи. Первая состоит в определении профессиональной специализации этногеографических групп на крупнейших городских территориях США. Вторая заключается в рассмотрении степени соответствия занятости этногеографических групп на городских территориях их общегрупповой занятости в США. Третьей задачей является выяснение того, на что больше похожа структура занятости рассматриваемых этногеографических групп — на структуру занятости городских территорий, или на общегрупповую занятость, а также объяснение причин локальных изменений профессиональной структуры занятости групп.

Обзор предыдущих исследований

Тема этнической (этногеографической) занятости не обойдена вниманием зарубежных исследователей: ей посвящено большое количество работ, прежде всего, североамериканских ученых — социологов, географов, экономистов. Можно выделить два основных направления исследований структуры занятости этнических и расовых групп в США. Первое рассматривает данное явление с точки зрения сегрегации и неравенства, второе — с позиции выделения этнических ниш занятости.

«Ниша занятости» — это устоявшаяся концепция, описывающая избыточную представленность иммигрантов и работников из числа



этнических меньшинств в определенных отраслях и профессиях [27]. Впервые термин «этническая ниша» был предложен Роджером Вальдингером [23] и чаще всего определяется как экономические секторы, где доля занятых представителей этнической группы превышает долю занятости всего населения на 50 % и более [24].

Предполагается, что самая высокая вероятность работать в нише у новоприбывших иммигрантов, у которых недостаточно знаний английского языка, и тех, у кого есть связи с уже занятыми в нише работниками [27].

Пожалуй, наиболее известное исследование по теме этнических ниш в США было проведено в 2003 г. Франклином Вилсоном, которое включало 100 этнических групп в 216 метрополитенских ареалах в 1990 г. Он обнаружил, что наибольшая доля занятых в этнических нишах наблюдалась у латиноамериканцев и азиатов, средняя – у коренных меньшинств (афроамериканцев, американских индейцев и т.д.) и наименьшая – у европейцев. В то же время выводы о повторяемости ниш у этнических групп в разных городах в данном исследовании были неоднозначными. Для большинства групп не удалось найти доказательств межгородского совпадения ниш в конкретных секторах занятости: подобные свидетельства нашлись только для небольшого числа групп для ограниченного числа секторов [26].

Различными американскими социологами подробно рассматривалось образование ниш в отдельных секторах экономики. Так, П. Шпиндлер-Руис изучил влияние этнических ниш в отношении динамики заработков мексиканских иммигрантов в строительной отрасли в 20 метрополитенских ареалах США с 2009 по 2015 г. [20], а Р. Ли проанализировала последствия найма китайской и латиноамериканской рабочей силы в качестве сотрудников ресторанов Лос-Анджелеса, принадлежащих китайцам [17].

Наконец, в недавних исследованиях коллективов географов из университетов штатов Джорджия, Аризона и Нью-Йорк была рассмотрена динамика этнических ниш в контексте структурной трансформации экономики. К. Ян Лю и Э.Д. Ван Холм проследили изменение профессиональных ниш с 1990 по 2010 г. для низкоквалифицированных иммигрантов, чтобы понять эволюцию этих ниш за два десятилетия [27]. Ш. Багчи-Сеном с соавторами была проанализирована динамика ниш занятости у азиатов и афроамериканцев в метрополитенском статистическом ареале Буффало-Ниагара-Фолс с 2000 по 2010 г. в контексте отраслевой трансформации экономики [11].

Но, несмотря на большое количество исследований по теме ниш занятости, проведенных в США за последние десятилетия, все они сводятся к рассмотрению отраслей или профессий с избыточной концентрацией изучаемой группы по отношению ко всему населению анализируемой территории, отделяя их от всей структуры занятости определенным количественным порогом. При этом выводы, особенно касающиеся географической повторяемости ниш, могут значительно отличаться в зависимости от выбранных пороговых значений. Также в проведенных исследованиях не уделяется внимание профессиям, в которых группа,



наоборот, деконцентрируется. Поэтому подход выделения этнических ниш имеет свои недостатки при рассмотрении различий в структуре занятости этнических групп населения США.

В то же время, в американской науке важное место занимает анализ профессиональной сегрегации, который проводился как социологами (например, Р. Тесфай и К. Томас [21]), так и географами (например, М. Шарма, О. Алонсо-Вильяр [19; 10]). В работах, посвященных вопросам профессиональной сегрегации и неравенству рассматривается неравномерность распределения групп по профессиям по отношению к другой группе, или всему населению. Чаще всего эта неравномерность выражается в качестве меры по отношению ко всей структуре занятости группы.

Вопросы этнической экономики рассматривались и российскими авторами. Так, В. И. Дятлов в своих работах исследует феномен этнических рынков и, в частности, роль китайских иммигрантов в торговле Иркутска [1; 5]. Он приходит к выводу, что еще в начале XX в. благодаря своей энергии, предприимчивости, трудолюбию и корпоративности, китайцы за сравнительно короткое время заняли значительную часть сферы мелкой и средней розничной торговли Восточной Сибири и Дальнего востока России, сделав ее по сути своей нишей [2]. В настоящее время они сохраняют важное значение в сфере малого и среднего предпринимательства в Иркутске, благодаря своей нише в рыночной торговле города [3]. При этом понимание принимающего общества исходит из безусловной презумпции того, что на «китайском рынке» действуют не торговцы (в том числе китайского происхождения и гражданства), а китайцы как группа — люди, чье экономическое поведение, деловые практики, человеческие лояльности определяются их «китайскостью». Таким образом, В. И. Дятлов приходит к заключению, что групповые связи и лояльности (земляческие, семейные, клановые, этнические или маркируемые в качестве этнических) могут быть мощным рыночным, экономическим ресурсом [4]. В. В. Радаев утверждает, что практически во всех странах обнаруживаются этнические меньшинства, которые преуспевают на почве предпринимательской деятельности, обгоняя и вытесняя другие этнические группы и титульные этносы. Это объясняется тем, что разные этнические группы имеют неодинаковые предпочтения в отношении одних и тех же видов труда [8].

В работах российских исследователей затрагивались также и вопросы занятости некоторых этногеографических групп в США. Так, Л. В. Смирнягин пишет, что в 1980-х гг. члены польской общины Чикаго составляли значительную часть среди рабочих мясокомбинатов, хотя у местных жителей эта работа считалась грязной и малопочтенной [9]. В статье А. М. Кульчитской и Т. Е. Самсонова затронуты вопросы занятости американцев китайского происхождения [6].

Таким образом, обычно в исследованиях профессиональной сегрегации рассматривается небольшое число групп, как правило, расовых меньшинств и латиноамериканцев. Работы, посвященные профессиональной сегрегации европейских групп очень редки. В большинстве из



них внимание уделяется сегрегации в целом — наличию отклонений, но не рассматривается их направленность (в большую, или меньшую сторону), величина и профессии, в которых эти отклонения происходят.

Материалы и методы исследования

В работе рассмотрены 12 этногеографических групп населения США: *американцы, афроамериканцы, мексиканцы, индийцы, китайцы, англичане, немцы, французы, ирландцы, итальянцы, поляки и русские*. Выбор конкретных этногеографических групп обусловлен двумя факторами. Во-первых, они представляют различные регионы мира и волны массовой иммиграции в США. Во-вторых, они характеризуются высокой численностью (более 2 млн чел.) и высокой представленностью в населении всех крупных городских территорий США. «Этничность» и используемый в американской статистике термин «происхождение», хотя и близки между собой, все же не тождественны, так как происхождение является более широким понятием. Поэтому в данной работе вместо понятия «этническая группа» использован термин «этногеографическая группа», который подразумевает выполнение одного из условий:

1) респондент относит себя к этнической группе, на которую указывает происхождение;

2) респондент не относит себя к этнической группе, на которую указывает происхождение, но заявляет о связи с соответствующей территорией [7].

Для количественного анализа в работе используются данные пятилетних агрегатов обследования американского общества (American Community Survey (ACS)) за 2021 г. [28]. Рассматривается структура занятости этногеографических групп по 25 профессиям (occupation).

Также под «общеамериканскими», или «среднеамериканскими», значениями в тексте подразумеваются значения только для городского населения США. Занятость всех городских представителей этногеографической группы в США называется «общегрупповой».

В качестве единицы анализа были выбраны 25 крупнейших городских территорий (urban area). Самой малочисленной из них является Сакраменто (1,9 млн чел). Все население этих городских территорий составляет 45 % от городского населения США и 36,3 % от всего населения страны.

Для сравнения структур занятости этногеографической группы на городской территории со структурой занятости всего населения городской территории, а также городских представителей данной группы в США в работе предложена модифицированная формула индекса диссимилиации Дункана:

$$D = \frac{1}{2} \sum_i^n \left| \frac{a_i}{A} - \frac{(b_i - a_i)}{(B - A)} \right|, \quad (1)$$

где — a_i число занятых представителей этногеографической группы на городской территории в профессии i ; b_i — число всех занятых на городской территории в профессии i (число всех занятых городских представителей данной этногеографической группы в профессии i в США);



A – численность всех работающих представителей этногеографической группы на городской территории; B – численность всего занятого населения на городской территории (численность всех занятых городских представителей данной этногеографической группы в США).

Изменения в формулу внесены с целью исключения неравномерного влияния этногеографических групп на общую занятость городских территорий из-за их разных долей в общей численности населения.

Индекс диссимилиации между структурой занятости этногеографической группы в городе и структурой занятости населения города в целом по профессии будет сокращенно называться «индекс диссимилиации “группа-город”». Индекс диссимилиации между профессиональной структурой занятости группы в городе и профессиональной структурой занятости всех городских представителей данной этногеографической группы в США будет называться «индекс диссимилиации “группа-группа”». Для удобства он будет рассчитан в %. Значения индекса диссимилиации также иногда будут называться коэффициентами диссимилиации. Таким образом, сравнение полученных индексов позволит определить, к чему ближе занятость группы в каждом городе – к занятости группы в целом в США или к занятости всего населения данной городской территории.

Для понимания места той или иной этногеографической группы на рынке труда будет использован показатель медианного дохода в каждой профессии. В соответствии с ним профессии были распределены на 4 группы, для чего медианные доходы по всем профессиям были разделены на 4 равных интервала – низкий, ниже среднего, выше среднего и высокий. Это сделано для удобства описания и понимания различий между группами.

В данном исследовании будет определена профессиональная специализация рассматриваемых этногеографических групп и городских территорий. В случае, когда доля занятых в профессии превышает среднюю долю в США в 1,5 раза и более, такой вид деятельности будет считаться специализацией городской территории или этногеографической группы. Так как «нишевость» и «специализация» по сути являются синонимами [26], в настоящей работе был сделан выбор в пользу термина «специализация», так как он выглядит более уместным в контексте исследования.

На величину коэффициентов диссимилиации оказывает влияние специализация рассматриваемых городских территорий.

Для того, чтобы его минимизировать и рассмотреть распределение этногеографических групп в каждой профессии, было рассчитано отклонение F (формула 2) – отклонение доли представителей этногеографической группы, занятых в профессии, среди всех жителей территории, занятых в данной профессии, от доли всех занятых представителей этногеографической группы среди всех занятых жителей территории. Отклонение F измеряется в процентах. Значение, близкое к -100% , свидетельствует о том, что на рассматриваемой территории в профессии нет представителей искомой этногеографической группы. При максимальном положительном отклонении (близким к $+100\%$) в профессии



i все работники являются представителями этой этногеографической группы, но при этом группа имеет незначительный вес в населении территории.

$$F = \frac{a_i}{b_i} - \frac{A}{B}. \quad (2)$$

Далее был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена между отклонениями F этногеографической группы на городской территории и отклонениями F городских представителей этой группы в целом по США. Как показал рассчитанный тест Харке-Бера, значения F у *индийцев, китайцев, поляков* и *русских* не имеют нормального распределения. Поэтому был использован ранговый коэффициент корреляции Спирмена – непараметрическая мера корреляции, которая может применяться при отсутствии у данных нормального распределения.

Таким образом, в результате должны быть выявлены различия в занятости этногеографических групп между городскими территориями, проявляющиеся в специализации этногеографических групп, а также разном характере схожести их занятости с городской и общегрупповой занятостью.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования был сделан расчет индекса диссимилиации между структурой занятости этногеографической группы в городе и структурой занятости населения города в целом (индекс диссимилиации «группа-город»), значения которого представлены в таблице 1. В первую очередь нужно отметить, что наиболее отличную от городского населения США профессиональную структуру имеют *индийцы*, для которых индекс диссимилиации составляет 35. Отличие структуры занятости *индийцев* обусловлено тем, что 31,7% из них выбрали профессии, связанные с компьютерами, инженерией и наукой, тогда как в целом в данных сферах занято только 6,9% всего городского населения США. При этом доля занятых в компьютерных и математических профессиях превышает среднеамериканскую в 6,3 раза, в архитектурных и инженерных – в 2,7 раз, в профессиях в области естественных, физических и социальных наук в 2,4 раза. Также *индийцы* в 1,9 раз чаще работают врачами-диагностами и специалистами по лечению в сравнении со средним значением занятых в этих профессиях среди городского населения США. Таким образом, *индийцы* специализируются на одних из наиболее высокооплачиваемых сфер деятельности в США, а компьютерные и математические профессии, где концентрация *индийцев* наиболее высока, занимают второе место по медианному годовому доходу в стране (87306\$).

Вторые по значению индекса диссимилиации среди рассматриваемых этногеографических групп – *мексиканцы*, у которых данный показатель (24) уже существенно ниже, чем у *индийцев*, от которых они по структуре занятости значительно отличаются. Так 16,5% *мексиканцев* работает в сфере природных ресурсов, строительства и технического обслуживания.



ния, тогда как в целом среди городского населения США в этой сфере занято 7,8 %. В частности, в сельском хозяйстве, рыболовстве и лесном хозяйстве занятость *мексиканцев* в 4,8 раз выше среднеамериканской, в строительстве и добыче полезных ископаемых — в 2,3 раза. К другим видам деятельности, где концентрация *мексиканцев* значительно выше, чем в среднем среди городских жителей США, относятся профессии по уборке и обслуживанию зданий и территорий (в 2,1 раза), так называемые производственные профессии (production occupations) (в 1,6 раз), профессии, связанные с перемещением грузов (в 1,6 раз), а также профессии из сферы приготовления и подачи пищи (1,5 раза). Отличие от *индийцев* проявляется в доходности профессий, в которых концентрируются *мексиканцы* — все они, за исключением строительства и добычи полезных ископаемых, относятся к наиболее низкооплачиваемым в стране.

Очень близки к *мексиканцам* по количественному отличию от общеамериканской структуры занятости, *китайцы* и *русские*, для которых значения коэффициента диссимилиации составляют 21,0 и 19,6 соответственно. *Китайцы* по своим сферам концентрации очень похожи на *индийцев*, только эта концентрация менее выражена. Они также имеют повышенную долю занятых в профессиях, связанных с компьютерами, инженерией и наукой — 19,1 %. Но, в отличие от *индийцев*, они больше склонны работать в профессиях в области естественных, физических и социальных наук, где доля занятых городских *китайцев* в 3,4 раза выше, чем в целом у городского населения США, в то время как доля занятых в компьютерных и математических профессиях в 2,8 раз выше, а в архитектурных и инженерных — в 2,3 раза. Кроме того, *китайцы* характеризуются в 1,5 раза более высокой долей занятых в сфере бизнеса и финансовых операций. Эти профессии, как и в случае с *индийцами*, характеризуются годовыми медианными доходами выше среднего.

Русские, проживающие в городах США, имеют несколько отличную от азиатских этногеографических групп структуру занятости. Среди *русских* 19,1 % работает в сферах образования, юриспруденции, общественных работ, искусства и медиа, в то время, как для всех городских американцев данный показатель составляет 11,6 %. Это наибольшая доля среди рассматриваемых этногеографических групп. Кроме того, занятость *русских* в юридических профессиях, самых высокооплачиваемых в США (медианный годовой доход 88013\$), в 3,1 раз выше общеамериканских значений и в 2,1 раз выше в сфере искусства, дизайна, развлечений, спорта и СМИ. Также *американцы русского происхождения* значительно чаще склонны работать в профессиях в области естественных, физических и социальных наук — в 2,1 раз, в сфере бизнеса и финансовых операций — 1,5 раза, врачами-диагностами и специалистами по лечению — 1,5 раза. Перечисленные специальности, за исключением профессий в сфере искусства, дизайна, развлечений, спорта и СМИ, также характеризуются доходами выше среднего.

Коэффициент диссимилиации «группа-город» в целом в США превышает 10,0 для *афроамериканцев*, *англичан* и *итальянцев* (табл. 1). *Афроамериканцы* отличаются высокой долей занятых младшей и средней квали-



фикации в сфере здравоохранительной деятельности. Это достаточно низкооплачиваемая сфера, медианный годовой доход в которой составляет 25 441 \$. Данными видами деятельности *афроамериканцы* занимаются в 2 раза чаще, чем городские американцы в среднем. Также в 1,9 раз больше *афроамериканцев* работает в сфере тушения и предотвращения пожаров, а также в других службах безопасности, в 1,6 раз — в профессиях, связанных с перемещением грузов и в 1,5 раз — в сфере транспорта. В целом все перечисленные профессии характеризуются доходами ниже среднего. *Англичане* в 1,7 раз чаще в сравнении с городскими американцами работают в юридических профессиях и в 1,5 раза чаще в профессиях в сфере искусства, дизайна, развлечений, спорта и СМИ. У *итальянцев* ярко выраженная специализация относительно городского населения США отсутствует.

У *поляков, ирландцев, французов и немцев* значения коэффициента диссимилиации не превышают 10. Специализацию можно выделить только у *ирландцев* и *поляков* — юриспруденция. В целом значения коэффициентов диссимилиации у этих групп близки друг к другу. Очень похожа и их географическая изменчивость.

Интересно, что больше всего на общеамериканскую структуру занятости похожа структура занятости *американцев*¹, для которых целом в США коэффициент диссимилиации составляет 5,1. Причем данная особенность характерна для всех рассматриваемых городских территорий, и только в Риверсайде и Хьюстоне индекс диссимилиации немногим превышает 10. На 18 из 25 рассматриваемых городских территорий отличия структуры занятости *американцев* от общегородской структуры занятости минимальны среди всех рассматриваемых этногеографических групп. При этом ни на одной городской территории *американцы* не доминируют по численности, а их доля в населении только на трех городских территориях превышает 5 %, и нигде не превышает 10 %.

Теперь рассмотрим степень схожести структуры занятости представителей этногеографических групп, проживающих на городских территориях, со структурой занятости всех городских представителей этих групп в США. Коэффициенты диссимилиации «группа-группа» представлены в таблице 2. В большинстве случаев у всех анализируемых этногеографических групп, структура занятости на рассматриваемых городских территориях больше похожа на структуру занятости городского населения группы, чем городской территории в целом. Это говорит о том, что групповые особенности профессиональной структуры занятости не случайны и повторяются в различных городах, что, в свою очередь, указывает на существование этногеографической специфики занятости в городах США. Однако есть ряд исключений, которые заслуживают внимательного рассмотрения.

¹ В данном случае американцы — это те, кто на вопрос о своем происхождении ответил «американец» (American), то есть, как правило белые жители США британского происхождения, которые далеки от своих первоначальных этнических предков и больше не ассоциируют себя с ними.



Таблица 1

Значения индекса диссимилации между структурной занятости этногеографической группы в городе и структурной занятости населения города в целом по профессиям (диссимилация «группа-город») ¹

Городская территория	Американцы	Афроамериканцы	Индийцы	Китайцы	Англичане	Французы	Немцы	Ирландцы	Итальянцы	Мексиканцы	Поляки	Русские
Атланта	5,3	20,4	34,1	24,4	17,9	17,5	18,5	14,8	16,5	45,2	18,5	22,2
Балтимор	6,6	21,7	27,8	28,1	15,1	14,0	10,0	10,6	11,4	26,8	12,1	23,7
Бостон	7,2	23,1	34,6	23,8	11,0	6,1	16,5	11,0	9,1	11,3	11,1	21,9
Чикаго	5,1	20,8	33,0	24,7	19,3	14,6	14,4	14,5	12,8	31,3	8,0	21,7
Даллас	9,0	19,6	42,8	29,9	20,8	19,4	19,8	16,5	17,4	31,8	19,6	25,0
Денвер	6,1	19,1	35,4	20,3	14,6	8,5	12,4	10,5	9,6	31,0	16,5	13,9
Детройт	8,4	24,5	41,1	36,2	10,5	6,9	9,4	8,9	8,9	23,8	8,0	19,4
Хьюстон	11,7	20,8	36,1	28,2	22,4	18,7	22,4	18,6	19,1	25,7	21,5	25,7
Лас-Вегас	10,0	16,6	30,6	19,9	17,7	15,1	14,4	15,2	12,7	27,2	14,2	22,6
Лос-Анджелес	8,2	15,5	32,1	19,4	22,8	18,5	21,1	20,5	19,6	27,7	27,2	30,8
Майами	8,5	18,1	29,9	19,5	17,5	18,6	15,2	13,6	14,7	22,7	21,7	26,2
Миннеаполис	7,8	24,6	35,3	21,0	11,5	8,3	9,1	8,3	9,9	29,3	7,6	9,4
Нью-Йорк	8,8	20,1	25,5	17,3	20,0	21,4	14,0	14,2	13,1	36,6	13,2	20,5
Филадельфия	5,6	23,4	30,9	23,7	12,2	11,5	9,0	10,1	10,0	35,4	9,4	19,9
Финикс	8,0	15,5	44,8	24,4	13,9	10,9	12,0	10,3	11,9	26,6	12,9	20,4
Портленд	9,6	15,3	39,1	17,6	11,9	10,5	9,2	10,6	9,6	28,8	15,6	10,6
Риверсайд	12,2	17,2	36,7	28,5	21,0	21,6	18,8	16,8	17,8	24,7	18,3	28,6
Сакраменто	9,5	14,8	23,1	20,1	14,3	10,8	11,4	11,8	9,6	21,7	13,8	15,6
Сан-Антонио	9,4	12,8	43,9	30,5	21,4	15,8	16,7	15,5	17,4	17,0	19,2	28,5
Сан-Диего	8,7	15,0	46,0	27,2	17,5	16,0	15,2	14,0	14,2	28,7	17,3	21,9
Сан-Франциско	9,0	20,3	34,1	13,7	20,0	16,5	18,2	16,9	15,2	32,0	22,2	21,9
Сиэтл	9,2	23,1	37,8	22,6	12,1	10,2	9,1	9,5	10,7	31,0	12,2	13,4
Сент-Луис	7,9	26,1	48,3	35,4	11,2	9,7	10,4	8,3	9,2	26,3	12,6	24,7
Тампа	5,9	16,1	35,4	27,5	10,6	6,6	9,0	8,3	10,3	34,5	9,0	19,3
Вашингтон	7,7	19,8	26,3	22,9	19,7	20,1	19,5	18,2	18,0	24,7	21,6	23,8
США	5,1	17,0	35,0	21,0	13,9	9,0	9,4	10,0	10,8	24,0	10,0	19,6

¹ Коэффициент диссимилации для США в целом рассчитан между структурной занятости всех городских представителей рассматриваемых этногеографических групп и структурной занятости всего городского населения.



Таблица 2

Значения индекса диссимилляции между структурной занятости группы в городе и структурной занятости городского населения группы в целом по профессиям («группа-группа»)¹

Городская территория	Американцы	Афро-американцы	Индийцы	Китайцы	Англичане	Французы	Немцы	Ирландцы	Итальянцы	Мексиканцы	Поляки	Русские	Все население
Атланта	9,0	10,0	10,6	9,9	11,0	16,7	15,4	11,5	12,7	23,2	14,6	12,7	6,8
Балтимор	11,2	8,7	10,2	17,3	10,4	14,4	8,4	8,9	9,7	22,3	8,7	12,4	8,7
Бостон	12,9	10,0	10,9	11,7	8,3	5,6	19,1	7,8	5,5	31,0	12,6	14,3	11,6
Чикаго	7,1	6,6	8,3	6,8	9,1	8,6	7,6	7,2	5,6	10,1	6,7	7,8	4,3
Даллас	9,6	10,4	12,3	12,4	10,0	11,8	11,9	10,1	11,7	8,0	11,9	13,2	6,6
Денвер	10,0	9,3	11,7	8,3	8,9	9,0	9,8	9,1	8,0	8,1	13,3	9,0	8,2
Детройт	10,3	9,2	15,8	21,2	6,9	9,6	6,3	6,3	8,1	12,1	8,4	12,9	6,6
Хьюстон	10,5	10,0	13,9	12,0	8,5	12,3	13,2	9,2	11,1	8,5	14,8	13,3	5,7
Лас-Вегас	13,1	14,2	22,5	27,9	9,6	15,0	10,4	9,3	13,0	14,1	15,0	16,1	14,2
Лос-Анджелес	9,3	13,7	10,3	14,0	11,7	12,7	13,2	13,0	11,7	8,4	18,3	14,0	4,5
Майами	9,5	9,8	19,7	16,9	10,3	12,1	9,5	9,4	10,5	18,4	13,7	12,8	9,1
Миннеаполис	7,1	10,2	13,8	12,9	6,1	6,2	6,4	6,5	8,1	12,0	5,5	11,8	8,2
Нью-Йорк	14,6	11,1	15,1	13,2	13,7	19,6	10,9	10,3	8,6	16,3	10,4	8,6	8,3
Филадельфия	6,3	6,9	8,7	13,2	4,1	8,2	4,7	4,8	4,1	14,9	5,8	8,8	6,3
Финикс	9,9	11,2	13,0	11,7	6,7	9,6	7,4	7,4	5,7	6,9	7,9	8,7	5,7
Портленд	7,6	9,5	15,2	12,4	6,2	6,9	5,9	5,8	9,0	8,0	11,9	16,4	6,0
Риверсайд	8,2	10,6	22,1	14,1	11,2	10,4	8,6	10,0	10,9	11,2	14,5	23,4	13,5
Сакраменто	12,5	8,7	20,4	13,8	7,2	10,3	6,7	4,3	5,7	7,4	11,2	25,5	4,3
Сан-Антонио	8,7	7,3	16,3	24,4	5,6	8,3	6,1	6,8	11,1	12,2	10,0	18,6	6,2
Сан-Диего	12,4	10,6	20,1	12,9	9,0	12,2	9,7	9,6	9,4	7,6	12,0	10,0	5,9
Сан-Франциско	19,2	12,4	15,6	9,5	19,5	22,0	22,5	18,6	16,2	7,5	25,7	15,8	14,2
Сигл	8,8	9,7	21,0	14,9	6,9	6,6	8,3	8,0	10,9	13,6	12,1	12,6	9,9
Сент-Луис	6,8	6,6	19,5	24,1	4,5	7,1	4,4	4,9	6,4	12,6	7,0	12,7	4,4
Тампа	7,9	8,8	12,3	14,7	6,5	6,6	7,7	7,0	6,5	17,1	7,3	12,2	6,6
Вашингтон	24,1	16,8	13,1	21,7	25,1	30,5	28,2	27,2	27,2	24,6	30,2	23,4	18,0

¹ Коэффициент диссимилляции для столбца «всё население» рассчитан между структурной занятости всего населения рассматриваемых городских территорий и структурной занятости всего городского населения США. Серым отмечены более низкие значения коэффициента в сравнении с коэффициентами «группа-город».

Единственной из этногеографических групп, у которых на большинстве (в 18 из 25) рассматриваемых городских территорий структура занятости ближе к структуре занятости территории, являются *американцы* (рис. 1). Это говорит о том, что *американцы* — единственная этногеографическая группа из рассматриваемых, у которой не выражены определенные этногеографические предпочтения в профессии и которая чаще всего «подстраивается» под городскую специфику. Можно сказать, что *американцы* представляют последнюю стадию, как это называют некоторые авторы, «экономической ассимиляции» [13; 15].

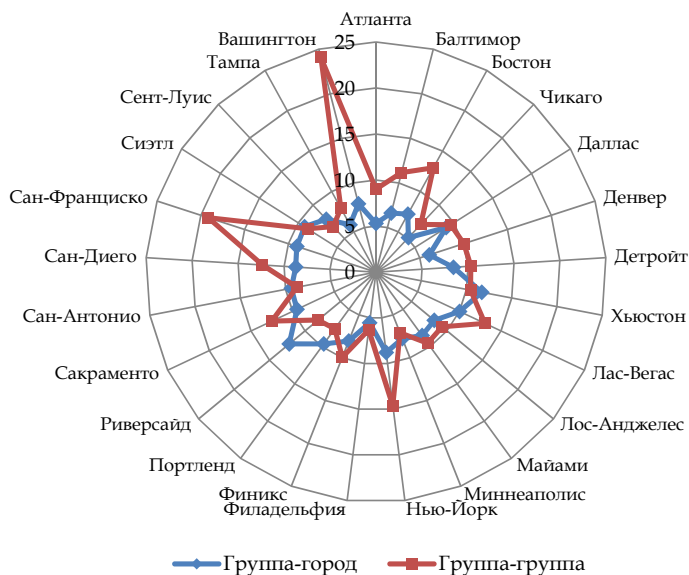


Рис. 1. Сравнение значений коэффициентов диссимилиации «группа-город» и «группа-группа» для *американцев*

Среди городских территорий с наиболее специфичной структурой занятости следует отметить Риверсайд, где, как уже было сказано, более половины населения составляют *мексиканцы*. В Риверсайде 20 % населения работает в сфере производства, транспортировки и перемещения грузов, тогда как для всего городского населения США эта доля составляет 12,5 %. Риверсайд является единственной городской территорией, где при коэффициенте диссимилиации выше 10 структура занятости всех рассматриваемых этногеографических групп больше похожа на структуру занятости всех своих городских представителей.

Кроме Риверсайда, сильно выделяется высоким уровнем специализации структура занятости таких городов как Вашингтон, Лас-Вегас, Сан-Франциско и Бостон. Это, в свою очередь, сказывается на структуре занятости рассматриваемых этногеографических групп на данных городских территориях, делая ее более отличной от структуры занятости всех городских представителей в США. Особенно интересными здесь оказались бостонские *мексиканцы*, у которых доля занятых в высокодоходных профессиях составляет 24,9 % (в 2,3 раза выше, чем у городских



мексиканцев в США) — почти на уровне европейских бостонцев. Поэтому коэффициент диссимилиации «группа-группа» у мексиканцев в Бостоне самый высокий среди рассматриваемых городских территорий (рис. 2). В более ранних исследованиях уже отмечалось, что мексиканская община Бостона отличается не только от мексиканцев других городов, но и от других латиноамериканцев города. Она характеризуется значительно более высоким уровнем образования (в 2,5 раза больше лиц с высшим образованием в сравнении с другими латиноамериканцами), большей представленностью в городских колледжах и университетах, и по своему образовательному профилю больше похожа на нелатиноамериканское население города [18]. Такая специфичность мексиканцев Бостона объясняется тем, что штат Массачусетс в целом и Бостон в частности являются одним из двух ведущих инновационных центров в США с большим количеством университетов и исследовательских центров, что привлекает наиболее высококвалифицированную группу мексиканских американцев [16].

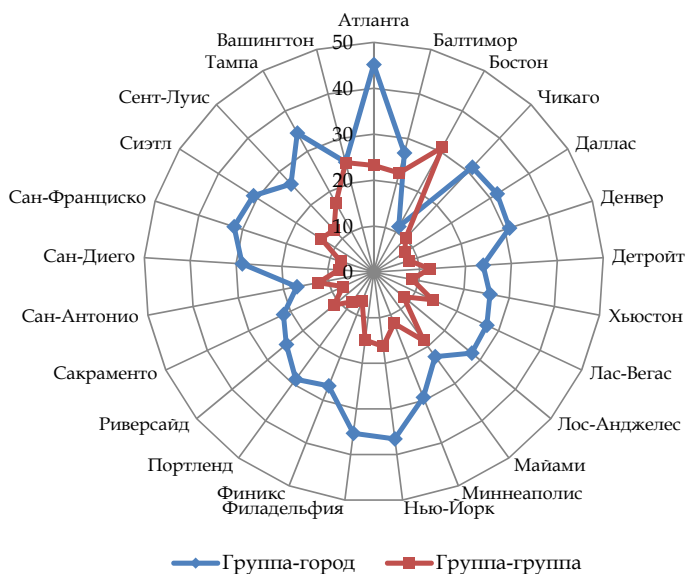


Рис. 2. Сравнение значений коэффициентов диссимилиации «группа-город» и «группа-группа» для мексиканцев

В противоположность Риверсайду, Вашингтону, Лас-Вегасу, Сан-Франциско и Бостону следует отметить такие города как Чикаго, Лос-Анджелес, Сакраменто и Сент-Луис, занятость всего населения которых наиболее близка к среднеамериканской структуре занятости (рис. 3).

Коэффициент диссимилиации между общей структурой занятости этих городских территорий и структурой занятости городского населения США составляет не более 5. За исключением Лос-Анджелеса, где доля занятых в сфере искусства, дизайна, развлечений, спорта и СМИ превышает среднеамериканскую в 2 раза, эти города также не имеют ярко выраженных сфер специализации.

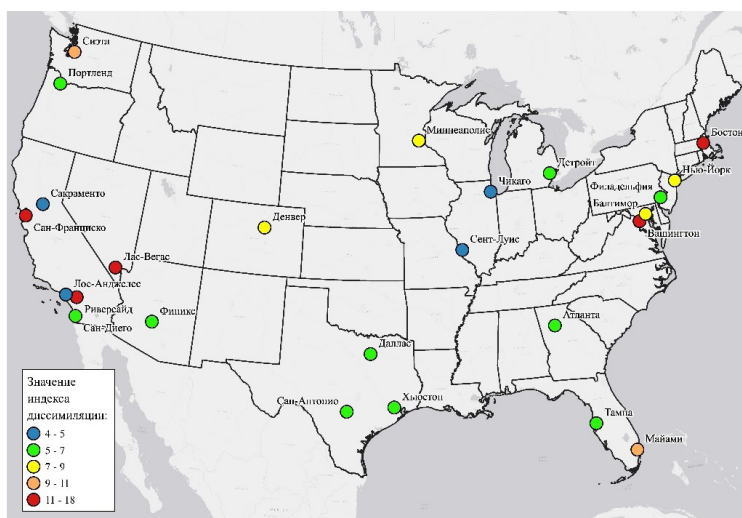


Рис. 3. Значения индекса диссимилиации между структурой занятости всего населения рассматриваемых городских территорий и структурой занятости всего городского населения США

Среди городских территорий с высокой степенью совпадения структуры занятости с общеамериканской структурой занятости можно выделить случаи Сакраменто и Портленда. При высоком соответствии общегрупповому распределению по профессиям для всех групп в этих городах, высоким значением коэффициента диссимилиации выделяются *русские*. *Русские* в Сакраменто и Портленде достаточно сильно отличаются от городских *русских* США. Так, только чуть более половины (51,7 %) *русских* из Сакраменто и 69,1 % *русских* из Портленда родились в США, тогда как в целом для городских *русских* данный показатель составляет 79,3 %. В обеих городских территориях у *русских* значительно выше занятость в рабочих профессиях с доходами ниже среднего, по сравнению со всеми городскими *русскими* в США.

Как можно убедиться, в ряде случаев специализация города оказывает сильное влияние на структуру занятости этногеографических групп. Сравнение рассчитанных коэффициентов диссимилиации позволяет понять, что больше влияет на структуру занятости группы в конкретном месте — специфика места, или же групповые особенности. Но мы не знаем, какая доля территориальной изменчивости занятости этногеографических групп обусловлена различиями структуры экономики городских территорий, а какая — групповыми предпочтениями в выборе профессии. Чтобы исключить влияние структуры занятости городской территории в целом и рассмотреть различия в представленности этногеографических групп в численности занятых в тех или иных профессиях, был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена между отклонениями F этногеографической группы на городской территории и отклонениями F городских представителей данной группы в целом по США (табл. 3).



Таблица 3

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между отклонениями F этногеографической группы на городской территории и отклонениями F городских представителей данной группы в целом по США. Серым обозначены коэффициенты, для которых p-value составляет более 0,05

Городская территория	Американцы	Афро-американцы	Индийцы	Китайцы	Англичане	Французы	Немцы	Ирландцы	Итальянцы	Мексиканцы	Поляки	Русские
Атланта	0,54	0,92	0,95	0,92	0,93	0,86	0,95	0,92	0,81	0,80	0,87	0,92
Балтимор	0,56	0,98	0,91	0,87	0,87	0,61	0,77	0,72	0,79	0,53	0,81	0,96
Бостон	0,49	0,89	0,85	0,93	0,84	-0,19	0,91	0,74	0,56	0,23	0,91	0,97
Чикаго	0,08	0,97	0,89	0,87	0,78	0,94	0,92	0,94	0,94	0,98	0,50	0,97
Даллас	0,53	0,91	0,93	0,86	0,94	0,94	0,93	0,93	0,90	0,97	0,92	0,81
Денвер	0,54	0,92	0,86	0,88	0,95	0,63	0,92	0,93	0,88	0,98	0,92	0,84
Детроит	0,53	0,90	0,87	0,86	0,94	0,55	0,88	0,87	0,89	0,83	0,86	0,61
Хьюстон	0,10	0,84	0,92	0,93	0,98	0,93	0,94	0,89	0,84	0,98	0,87	0,91
Лас-Вегас	0,17	0,61	0,68	0,74	0,93	0,75	0,85	0,74	0,81	0,90	0,75	0,86
Лос-Анджелес	0,17	0,66	0,96	0,92	0,96	0,94	0,93	0,95	0,96	0,97	0,93	0,99
Майами	0,40	0,91	0,83	0,87	0,94	0,88	0,90	0,94	0,89	0,61	0,89	0,92
Миннеаполис	0,58	0,89	0,80	0,64	0,95	0,67	0,93	0,94	0,71	0,91	0,85	0,56
Нью-Йорк	0,27	0,92	0,81	0,88	0,91	0,94	0,87	0,91	0,87	0,81	0,91	0,94
Филадельфия	0,66	0,97	0,88	0,87	0,93	0,88	0,79	0,76	0,80	0,83	0,91	0,96
Финикс	0,52	0,73	0,90	0,89	0,93	0,60	0,93	0,91	0,94	0,99	0,87	0,90
Портленд	0,56	0,84	0,89	0,88	0,92	0,73	0,83	0,94	0,80	0,94	0,79	0,36
Риверсайд	0,19	0,58	0,84	0,90	0,87	0,87	0,86	0,88	0,83	0,96	0,78	0,63
Сакраменто	0,32	0,88	0,77	0,79	0,90	0,62	0,86	0,93	0,86	0,94	0,74	0,16
Сан-Антонио	0,43	0,80	0,87	0,85	0,86	0,64	0,95	0,92	0,53	0,94	0,85	0,77
Сан-Диего	0,46	0,84	0,92	0,94	0,96	0,89	0,92	0,95	0,89	0,98	0,89	0,84
Сан-Франциско	0,36	0,91	0,83	0,75	0,92	0,90	0,93	0,98	0,96	0,97	0,94	0,93
Сиэтл	0,68	0,83	0,91	0,96	0,95	0,84	0,89	0,90	0,85	0,92	0,87	0,82
Сент-Луис	0,40	0,91	0,83	0,71	0,83	0,66	0,77	0,80	0,74	0,64	0,59	0,66
Тампа	0,46	0,92	0,85	0,82	0,92	0,62	0,89	0,92	0,89	0,85	0,81	0,85
Вашингтон	0,41	0,90	0,93	0,96	0,87	0,92	0,91	0,94	0,94	0,70	0,89	0,93



У англичан на всех рассматриваемых городских территориях наблюдается очень высокое совпадение со всеми городскими англичанами. Можно предположить, что английское происхождение могут указывать люди определенного социального статуса как некий признак элитарности. Они специализируются на наиболее прибыльных сферах деятельности. В то же время английское происхождение указывает на то, что человек ведет свою родословную несколько веков, так как англичане были наиболее ранними переселенцами в США. Среди американцев, наоборот, совпадений почти нет и распределение по роду занятий в каждом городе можно считать зависящим от городской специфики. Получается, что американцы — эта общность, которая проявляет себя, как бы парадоксально это ни звучало, отсутствием общности, по крайней мере, профессиональной, ведь остальные рассматриваемые этногеографические группы проявляют схожесть в выборе профессий в разных географических контекстах. Из европейских групп наиболее слабо проявляется общность у французов, которые также были одними из первых переселенцев в США наряду с англичанами, но в отличие от последних, у них гораздо слабее выделяется как определенная специализация, так и профессиональное сходство между различными городами.

В Лас-Вегасе наблюдается пониженная, в сравнении с остальными городскими территориями, корреляция (ниже 0,8) для значительной части рассматриваемых этногеографических групп. Причем в первую очередь более низкие значения коэффициента наблюдаются у неевропейских этногеографических групп: афроамериканцев, китайцев и индийцев. Также ниже 0,8 коэффициенты ранговой корреляции у французов, ирландцев и поляков.

Хорошо видны и описанные случаи специфичности этногеографических общин отдельных городов — мексиканцы в Бостоне и русские в Портленде и Сакраменто. К ним еще добавляются французы Бостона, у которых в целом распределение по профессиям очень ровное, за исключением повышенной доли в сельском хозяйстве — сфере, обычно занятой как раз мексиканцами (доля мексиканцев среди всех занятых — 11,8%, а среди занятых в сельском хозяйстве — 56,3%). Во всех этих случаях при значении коэффициента корреляции ниже 0,4, можно считать, что профессиональная представленность на данных городских территориях у конкретных групп совсем не похожа на общегрупповую в США.

Напротив, Вашингтон и Сан-Франциско с изначально «нетипичной» занятостью для групп оказались как раз-таки очень типичными для всех групп при отсутствии влияния структуры экономики. Это говорит о том, что именно специфичность структуры экономики Вашингтона и Сан-Франциско влияет на отклонения в занятости рассматриваемых этногеографических групп, тогда как распределение групп в каждой отдельной профессии близко соответствует среднеамериканскому.

Нельзя не отметить более высокую схожесть структур занятости мексиканцев с общегрупповой структурой занятости в городах, расположенных в относительной близости к мексиканской границе — Финикс, Сакраменто, Сан-Франциско, Сан-Диего, Даллас, Денвер, Лос-Анджелес,



Хьюстон, Риверсайд и Сан-Антонио, на что указывают как более низкие коэффициенты диссимиляции «группа-группа» в этих городах, так и коэффициенты корреляции.

Таким образом, корреляционный анализ в целом подтверждает высокую степень соответствия профессиональной структуры занятости рассматриваемых этногеографических групп (за исключением *американцев*) на большинстве городских территорий их общегрупповой занятости этих групп.

Заключение

Проведенное исследование показало, что рассматриваемые этногеографические группы имеют различную профессиональную структуру занятости в США. Наиболее ярко профессиональная специализация проявляется у групп, в которых значительную долю составляют иммигранты, прибывшие в три последних десятилетия. Наиболее ярко отличие структуры занятости проявляется у *индийцев*, а кроме того, у *мексиканцев* и *китайцев*. У *русских* и *афроамериканцев* также сохраняется высокая степень отличия от общеамериканской структуры занятости, но и в этих группах иммигранты составляют существенную часть. Среди групп, с низкой (менее 7%) долей лиц, рожденных за пределами США, наиболее отличной от общеамериканской структурой занятости и более выраженной специализацией характеризуются *англичане*. У *поляков*, *ирландцев*, *французов*, *немцев* и *итальянцев* значения коэффициента диссимиляции по отношению к городскому населению США наиболее низкие и близки друг к другу, а профессиональную специализацию можно выделить только у *ирландцев* и *поляков*. Наконец, *американцы* характеризуются наибольшей схожестью с общеамериканской структурой занятости.

Коэффициенты диссимиляции и корреляционный анализ указывают на то, что в большинстве случаев на крупнейших городских территориях США структура занятости этногеографических групп больше похожа на общеамериканскую структуру занятости этих групп. Это позволяет сделать важный вывод о существовании в США групповых особенностей занятости, которые сохраняются в разных территориальных контекстах, повторяясь от одной территории к другой. Другими словами, этногеографические различия в структуре занятости не случайны и рассматриваемые этногеографические группы проявляют общность в выборе профессий в разных географических условиях. Более того, у европейских этногеографических групп, кроме *русских*, очень похожа и географическая изменчивость коэффициентов «группа-город». Единственным исключением из всех групп являются *американцы*, для которых характерно отсутствие межтерриториальной общности по роду занятий. Их структура занятости на каждой городской территории наиболее приближена к средней занятости всего населения этой территории, то есть в каждом случае как бы подстраивается под локальную специфику. Из европейских групп наиболее слабо проявляется межтерриториальная общность структуры занятости у *французов*, которые были одними из первых переселенцев в США наряду с *англичанами*, но в отличие от последних, гораздо слабее проявляют как определенную специализацию,



так и профессиональное сходство между жителями различных городов. Можно предположить, что процесс экономической ассимиляции в США проявляется сначала в снижении специализации, что произошло у большей части рассматриваемых европейских этногеографических групп, а затем в постепенном снижении профессиональной схожести в разных территориальных контекстах, что частично проявляется у *французов*, *американцев*, таким образом, можно рассматривать как финальную стадию экономической ассимиляции. Тем не менее пример *англичан* – одной из наиболее ранних групп мигрантов, у которых сохраняется как четкая специализация городских представителей, так и высокое соответствие общегрупповой структуре занятости на рассматриваемых городских территориях, может свидетельствовать о нелинейности процесса экономической ассимиляции в США.

Удалось выяснить, что в Вашингтоне и Сан-Франциско высокие отклонения занятости у групп преимущественно связаны влиянием структуры экономики этих городских территорий. В то же время в Лас-Вегасе и Бостоне наблюдается несколько иное распределение групп внутри профессий. Таким образом, отличие структуры занятости этногеографических групп в этих городах связано не только со спецификой занятости на данных городских территориях, но и с нестандартными характеристиками некоторых этногеографических групп. Интересной особенностью также стало высокое соответствие профессиональных структур занятости *мексиканцев* с общегрупповой занятостью в городах, расположенных вблизи мексиканской границы. Наконец, были выделены уникальные территориальные общности – *русские* в Сакраменто и Портленде и *мексиканцы* в Бостоне, совсем не похожие по своей структуре занятости на остальных представителей данных групп в других городах США.

В целом ввиду многогранности исследуемой темы приведенный в работе анализ охватывает лишь один из аспектов этногеографических различий занятости в США. Дальнейшие исследования, рассматривающие пространственную общность занятости этногеографических групп в динамике могут пролить свет на процессы конвергенции их профессиональных структур.

Список литературы

1. Григоричев К. В., Дятлов В. И. «Китайские рынки» России: роль в постсоциалистической трансформации (случай Иркутска) // Вестник Томского государственного университета. 2017. №419. С. 121 – 132. doi: 10.17223/15617793/419/16.
2. Дятлов В. И. Миграция китайцев и дискуссия о «желтой опасности» в дореволюционной России // Вестник Евразии. 2000. №1. С. 63 – 89. EDN: HYZENH.
3. Дятлов В. И. «Китайский» рынок «Шанхай» в Иркутске: роль в жизни городского сообщества // Известия Иркутского государственного университета. Сер.: Политология. Религиоведение. 2014. Т. 10. С. 103 – 119. EDN: TAWWWJ.
4. Дятлов В. И. Этнические рынки на постсоветском пространстве: локальность и трансграничность // Развитие территорий. 2017. №1 (7). С. 53 – 56. EDN: YRCFUL.



5. Дятлов В. И. «Этнические рынки» — мигрантские локальности в постсоветском городском пространстве // Журнал исследований социальной политики. 2020. №4 (18). С. 577–592. doi: 10.17323/727-0634-2020-18-4-577-592. EDN: CKFFRT.
6. Кульчитская А. М., Самсонов Т. Е. Региональное своеобразие китайского населения США // Региональные исследования. 2018. №4 (62). С. 17–27. EDN: GLFHZM.
7. Прокофьев А. Д. Пространственная неоднородность территории США: этногеографический фактор // Географический вестник = Geographical Bulletin. 2024. №2 (69). С. 93–108. doi: 10.17072/2079-7877-2024-2-93-108. EDN: RAOGOB.
8. Радаев В. В. Экономическая социология. М., 2008.
9. Смирнягин Л. В. Районы США: Портрет современной Америки. М., 1989. EDN: YFNWYV.
10. Alonso-Villar O., Gradin C., Del Rio C. Occupational segregation of Hispanics in U.S. metropolitan areas // Applied Economics. 2013. Vol. 45, №30. P. 4298–4307.
11. Bagchi-Sen S., Schunder T., Tai X. An analysis of employment patterns of domestic migrants and immigrants in a Rustbelt city: A study of Buffalo-Niagara Falls // Growth and Change. 2019. Vol. 51, №1. P. 123–143. doi: 10.1111/grow.12345.
12. Bailey T., Waldinger R. Primary, Secondary, And Enclave Labor Markets: A Training Systems Approach // American Sociological Review. 1991. Vol. 56, №4. P. 432–445. doi: 10.2307/2096266.
13. Borjas G. J. Immigration Economics. Harvard University Press, 2014.
14. Christopher S. C., Leslie T. F. Assessing Immigrant Niches Across Large American Metropolitan Areas // Population space and place. 2015. Vol. 21, №2. P. 171–192. doi: 10.1111/pirs.12130.
15. Collins W. J., Zimran A. The economic assimilation of Irish Famine migrants to the United States // Explorations in Economic History. 2019. Vol. 74. P. 1–22. doi: 10.1016/j.eeh.2019.101302.
16. Granberry P., Valentino K. Latinos in Massachusetts: Mexicans. Gaston Institute Publications, 2020.
17. Lee R. Who does the dishes? Precarious employment and ethnic solidarity among restaurant workers in Los Angeles Chinese enclave // Ethnicities. 2018. Vol. 19, №2. P. 1–19. doi: 10.1177/1468796818789455.
18. Profiles of Boston's Latinos. Boston Planning & Development Agency Research Division, 2017.
19. Sharma M. Economic Growth Potentials and Race / Ethnicity in Tennessee: Diversity and Economy // International Journal of Applied Geospatial Research. 2018. Vol. 9, №2. P. 33–54. doi: 10.4018/IJAGR.2018040103.
20. Spindler-Ruiz P. Mexican Niches in the US Construction Industry: 2009–2015 // Journal of International Migration and Integration. 2021. Vol. 22, №2. P. 405–427. doi:10.1007/s12134-019-00749-x.
21. Tesfai R., Thomas K. J. A. Dimensions of Inequality: Black Immigrants' Occupational Segregation in the United States // Sociology of Race and Ethnicity. 2019. Vol. 12, №6. P. 1–21. doi:10.1177/2332649219844799
22. Thernstrom S., Orlov A., Handlin O. Harvard Encyclopedia of American Ethnic Groups. Cambridge ; Massachusetts ; L., 1980.
23. Waldinger R. The making of an immigrant niche // International Migration Review. 1994. Vol. 28, №1. P. 3–30.
24. Waldinger R., Bozorgmehr M. Ethnic Los Angeles. Russell Sage Foundation, 1996.



25. Wang Q. Labour market concentration of Asian ethnic groups in US metropolitan areas: a disaggregated study // Population, Space and Place. 2004. Vol. 10, №6. P. 479–494. doi: 10.1002/psp.348.

26. Wilson F.D. Ethnic niching and metropolitan labor markets // Social Science Research. 2003. Vol. 32, №3. P. 429–466. doi:10.1016/S0049-089X(03)00015-2.

27. Yang Liu C., Van Holm E.J. The Geography of Occupational Concentration Among Low-Skilled Immigrants // Economic Development Quarterly. 2019. Vol. 33, №2. P. 1–14.

28. Explore Census Data // The United States Census Bureau. URL: <https://data.census.gov/advanced> (дата обращения: 10.12.2024).

Об авторе

Алексей Денисович Прокофьев – асп., Санкт-Петербургский государственный университет, Россия.

E-mail: alexinho97pro@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6121-6345

SPIN-код: 2544-0984

A. D. Prokofev

SPATIAL DIFFERENCES IN THE OCCUPATIONAL STRUCTURE AMONG ETHNOGEOGRAPHIC GROUPS IN THE UNITED STATES

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Received 26 December 2024

Accepted 27 January 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-2

To cite this article: Prokofev A.D., 2025, Spatial differences in the occupational structure among ethnogeographic groups in the United States, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 18–39. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-2.

Due to the ethnogeographic diversity of American society, the issue of employment differences between ethnogeographic groups in the United States continues to attract considerable attention from social science researchers. However, despite a substantial body of work on this topic, the question of changes in the employment structure of ethnogeographic groups across space has been relatively overlooked. In this regard, the present study aims to identify spatial differences in the employment of ethnogeographic groups in the U.S. The analysis covers 25 major urban areas and 12 ethnogeographic groups. To compare the employment structure of an ethnogeographic group with the overall employment structure of the population in a given urban area, as well as with the employment structure of urban members of the same group across the U.S., the dissimilarity index was used. Additionally, Spearman's rank correlation coefficients were calculated between the urban and national within-profession deviations for each group. The results reveal that, with the exception of Americans, the ethnogeographic groups studied tend to exhibit similarities in their choice of professions in the largest urban



areas in the U. S. The analysis also highlighted urban communities that are notably different in their employment structure from other members of these groups in other cities across the U. S. – Russians in Sacramento and Portland, and Mexicans in Boston.

Keywords: ethnogeographic group, employment structure, occupational specialization, urban area, US population, spatial differences

The author

Alexey D. Prokofiev, PhD student, Saint Petersburg State University, Russia.

E-mail: alexinho97pro@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6121-6345

SPIN-code: 2544-0984

УДК 910.3

Т. В. Сукманова, Н. С. Белов

**ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК ИНСТРУМЕНТ МОДЕЛИРОВАНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ
И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

40

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

Поступила в редакцию 26.12.2024 г.

Принята к публикации 06.02.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-3

Для цитирования: Сукманова Т. В., Белов Н. С. Цифровой двойник как инструмент моделирования и оптимизации сложных природных и технических систем // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 40–57. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-3.

Рассматривается концепция цифрового двойника (далее – ЦД) как сложная киберфизическая система, представляющая собой виртуальную репрезентацию физических объектов, процессов или систем. Осуществлен ретроспективный анализ эволюции данной технологии, начиная с ее зарождения в практике NASA и заканчивая современными концептуальными подходами, такими как модель жизненного цикла изделия, предложенная Майклом Гривзом, и мультифизические модели, разрабатываемые Глассеном. В отличие от простого моделирования, ЦД обеспечивает динамическое соответствие виртуальной и физической сущностей за счет непрерывного обмена данными и обратной связи. Выделены ключевые методологические аспекты создания и эксплуатации ЦД, включая вопросы интеграции гетерогенных данных, выбора адекватных моделей и обеспечения интероперабельности. Проведен критический анализ преимуществ и ограничений данной технологии с учётом ранее высказанных соображений о необходимости валидации и ограничениях, связанных с доступностью и качеством данных. Рассматриваются перспективы дальнейшего развития ЦД, в частности, интеграция с технологиями искусственного интеллекта и анализа больших данных для решения комплексных задач устойчивого развития и минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду, включая обсуждавшиеся аспекты мониторинга загрязнения и управления природными ресурсами. Отдельно подчеркивается, что, в отличие от простой базы данных, ЦД обладает операциональной моделью, обеспечивающей интерпретацию и использование данных для решения конкретных задач.

Ключевые слова: Цифровой двойник, моделирование, индустрия 4.0, геоэкология, устойчивое развитие



Введение

Концепция цифрового двойника (далее — ЦД), представляющего собой виртуальную реплику физического объекта или системы, имеет глубокие корни, уходящие на несколько десятилетий назад. Ее становление тесно связано с бурным развитием информационных технологий и всеобъемлющей цифровой трансформацией различных сфер деятельности человека. ЦД служат незаменимым инструментом для моделирования, анализа и оптимизации сложных процессов и систем. От простых моделей, созданных на ранних этапах развития этой технологии, до современных алгоритмических представлений ЦД значительную эволюцию, расширяя свои возможности и сферы применения.

Одним из наиболее ранних примеров использования концепции ЦД можно считать разработку NASA в 1960-х гг. хотя сам термин еще не был введен. В рамках миссии «Аполлон-13» инженеры создали «живую модель» космического аппарата, которая позволила детально воссоздать аварию, вызванную взрывом кислородного бака, и проанализировать ее последствия. Благодаря этой модели специалисты смогли разработать эффективные меры по спасению экипажа и обеспечению безопасного возвращения космического корабля на Землю [4].

Корни концепции ЦД уходят в 1993 г., когда Дэвид Гелентер, профессор компьютерных наук Йельского университета, представил в своей работе «Mirror Worlds» идею «зеркальных (вычисляемых) миров». Гелентер описал концепцию создания виртуальных копий реальных объектов или систем, которые могли бы служить точными отражениями их физических аналогов. Автор сравнивал такие виртуальные копии с «высокотехнологичными куклами-вуду», подчеркивая возможность взаимодействия с виртуальной моделью для воздействия на реальный объект. Гелентер предвидел революционный потенциал этой технологии, утверждая, что «зеркальные миры» превратят компьютеры из простых инструментов в мощные средства моделирования и прогнозирования, позволяющие глубже проникнуть в сущность реальности.

Идея создания виртуальных аналогов физических объектов для управления их жизненным циклом получила значительное развитие в последние десятилетия. Одним из пионеров в этой области стал Майкл Гривз, который в 2003 г. предложил концепцию ЦД в рамках курса по управлению жизненным циклом продукта в Мичиганском университете [11].

Согласно Гривзсу, ЦД состоит из трех основных компонентов (рис. 1):

- физический продукт: реальный объект, существующий в физическом пространстве;
- виртуальный продукт: цифровая копия физического продукта, представленная в виртуальном пространстве;
- подключенные данные: информационные связи, объединяющие физический и виртуальный продукты, обеспечивая постоянный обмен данными между ними.

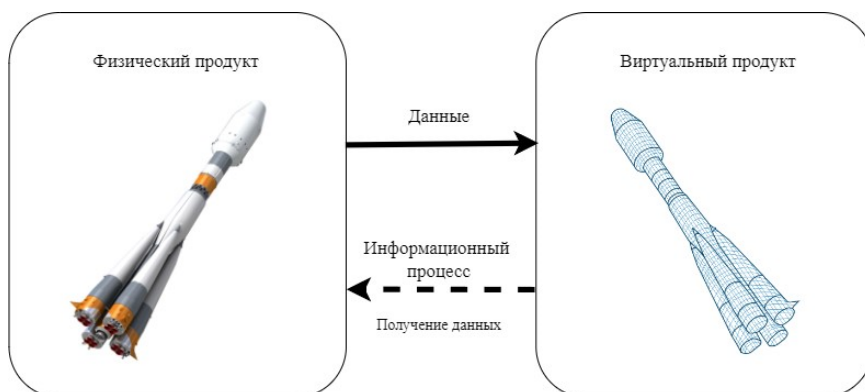


Рис. 1. Информация от «зеркальной модели»

В дальнейшем концепция ЦД претерпела существенные изменения. В 2012 г. Э.Х. Гласген и его коллеги предложили более детальное определение, описав ЦД как интегрированную мультифизическую, многомасштабную вероятностную симуляцию сложного продукта (рис. 2).

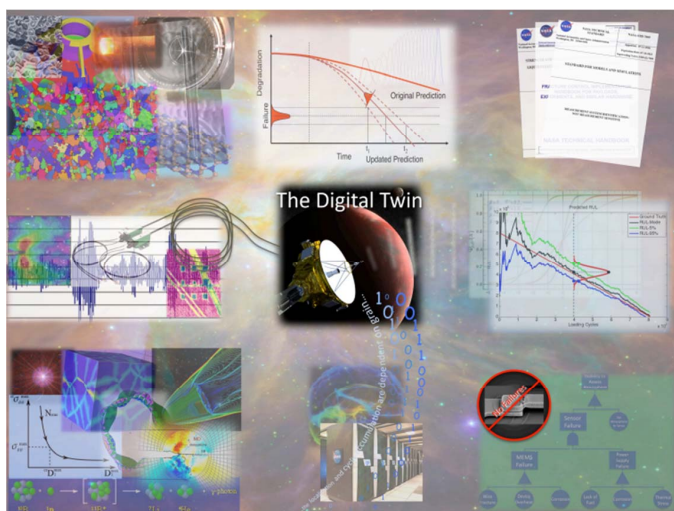


Рис. 2. Графическое представление парадигмы ЦД [10]

Ключевыми особенностями этого подхода являются:

- интеграция физических моделей: использование наиболее точных физических моделей для описания поведения объекта;
- многомасштабность: возможность моделирования процессов на разных масштабных уровнях (от микро до макро);
- вероятностный характер: учет неопределенности и вероятностных факторов, влияющих на поведение системы;
- обновление данных в реальном времени: постоянное обновление модели с использованием данных от датчиков и других источников.



Сопоставление двух концепций представлено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение концепций Гривза и Гласгена

Характеристика	Концепция Гривза	Концепция Гласгена
Фокус	Управление жизненным циклом продукта	Интегрированная симуляция
Структура	Три основных компонента	Мультифизическая, много-масштабная модель
Динамика	Статичная связь между физическим и виртуальным продуктом	Постоянное обновление модели на основе данных в реальном времени

43

Последние годы свидетельствуют о стремительном росте интереса к технологии ЦД и ее широком внедрении в различные отрасли промышленности. По данным исследований, пик ее популярности пришелся на 2018–2019 гг. [15]. ЦД представляет собой виртуальную копию физического объекта, процесса или системы, которая позволяет проводить детальный анализ и моделирование его поведения в реальном времени. Эта технология, являющаяся неотъемлемой частью концепции Индустрии 4.0, открывает новые возможности для повышения эффективности производства, снижения рисков и улучшения качества продукции.

Преимущества использования цифровых двойников:

- мониторинг и анализ в режиме реального времени;
- виртуальное тестирование и оптимизация;
- прогнозирование отказов;
- повышение качества продукции.

В настоящее время существует ряд международных и российских стандартов, регламентирующих создание и использование ЦД. Эти стандарты определяют требования к разработке, внедрению и эксплуатации ЦД, обеспечивая их совместимость и интеграцию с другими системами предприятия (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение части нормативно-правовой базы в области ЦД

Характеристика	ISO 23247-3:2021 [14]	ГОСТ Р 57700.37-2021 [1]	ГОСТ Р 58301-2018 [2]
Фокус	Динамическая связь между физическим и виртуальными мирами	Жизненный цикл изделия	Информационные наборы, отражающие свойства изделия
Определение цифрового двойника	Цифровая модель, обеспечивающая конвергенцию физического и виртуального состояний	Система, состоящая из цифровой модели и двусторонних информационных связей	Не используется термин «цифровой двойник»



Характеристика	ISO 23247-3:2021 [14]	ГОСТ Р 57700.37-2021 [1]	ГОСТ Р 58301-2018 [2]
Связь с физическим объектом	Постоянная связь и синхронизация	Двусторонняя информационная связь	Неявно выражена
Жизненный цикл	Подчеркивается динамика и эволюция	Охватывает весь жизненный цикл изделия	Фокусируется на определенных этапах жизненного цикла
Составляющие	Цифровая модель, данные	Цифровая модель, информационные связи	Информационные наборы

Все три стандарта рассматривают ЦД как виртуальное представление физического объекта или процесса. ISO 23247-3:2021 [14] акцентирует внимание на динамическом аспекте ЦД, ГОСТ Р 57700.37-2021 [1] подчеркивает его роль в жизненном цикле изделия, а ГОСТ Р 58301-2018 [2] фокусируется на информационных наборах, составляющих электронный макет изделия. Несмотря на некоторые различия в терминологии и акцентах, все три стандарта отражают общую идею ЦД как инструмента для моделирования, анализа и управления физическими объектами и процессами.

ЦД находят все более широкое применение в различных сферах, включая урбанистику и управление инфраструктурой. ЦД города представляет собой детальную виртуальную копию реального городского пространства, постоянно обновляемую и синхронизированную с данными, поступающими от многочисленных датчиков. Эта кибернетическая система позволяет проводить симуляции различных городских сценариев, оптимизировать планирование, повышать эффективность управления городскими ресурсами и снижать риски. Моделирование городских процессов, таких как транспортные потоки или распространение загрязнений, становится возможным благодаря математическим моделям, интегрированным в ЦД. Это позволяет прогнозировать последствия различных решений и выбирать оптимальные стратегии развития города. Ключевым преимуществом ЦД городов является возможность повысить качество жизни. Оптимизация использования городских ресурсов, снижение уровня загрязнения и улучшение транспортной инфраструктуры – лишь некоторые из возможных способов применения этой технологии.

Кроме того, ЦД играют важную роль в управлении рисками. Моделируя различные угрозы, такие как природные катаклизмы или техногенные аварии, можно разрабатывать эффективные планы реагирования и минимизировать потенциальные потери. ЦД города представляет собой сложную систему, включающую в себя базы данных, математические модели, алгоритмы и интерфейс пользователя. Благодаря постоянному со-

вершенствованию технологий искусственного интеллекта (далее — ИИ), возможности ЦД постоянно расширяются, открывая новые перспективы для развития городов (рис. 3).

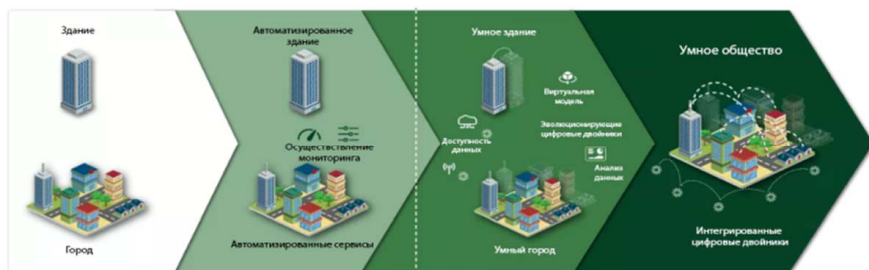


Рис. 3. Концепция «Умных городов» (ЦД городов) в настоящее время [6]

Сегодня наблюдается глобальная тенденция к созданию ЦД городов. Это виртуальные модели реальных городских пространств, позволяющие проводить комплексный мониторинг и моделирование различных городских процессов. Такие модели находят широкое применение в планировании и управлении городским развитием, позволяя эффективно решать задачи, связанные со строительством, транспортом, энергетикой, экологией и безопасностью.

Мировой опыт. Среди наиболее известных примеров городов, активно использующих ЦД, можно назвать Сингапур, Шанхай и Хельсинки. Эти мегаполисы создали детальные виртуальные копии своих территорий, которые позволяют эффективно управлять городскими ресурсами, оптимизировать транспортные потоки и повышать качество жизни населения.

Российская практика. В России также активно развивается технология ЦД городов. В 2019 г. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ утвердило национальный стандарт «Умный город», который определяет основные принципы и требования к созданию и развитию цифровых платформ для управления городским хозяйством.

Такие города, как Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург и Казань, уже активно внедряют ЦД в свою практику. В частности, Москва занимает лидирующую позицию в России по уровню развития систем «Умный город». В рамках городской стратегии «Умный город 2030» столица России активно развивает цифровые технологии для решения широкого спектра задач, включая оптимизацию транспортной системы, повышение энергоэффективности зданий, развитие цифровой экономики и улучшение экологической обстановки.

Ключевые направления развития ЦД городов (рис. 4):

- человеческий и социальный капитал: развитие систем здравоохранения, образования, социальной поддержки населения;
- городская среда: оптимизация использования городского пространства, создание комфортной и безопасной среды для жизни;

- цифровая мобильность: развитие интеллектуальных транспортных систем, оптимизация маршрутов, снижение транспортной нагрузки;
- экономика города: развитие цифровых технологий в промышленности, торговле, сфере услуг;
- цифровое правительство: оптимизация государственных услуг, повышение прозрачности и эффективности управления;
- безопасность и экология: обеспечение безопасности граждан, мониторинг экологической обстановки, снижение негативного воздействия на окружающую среду.

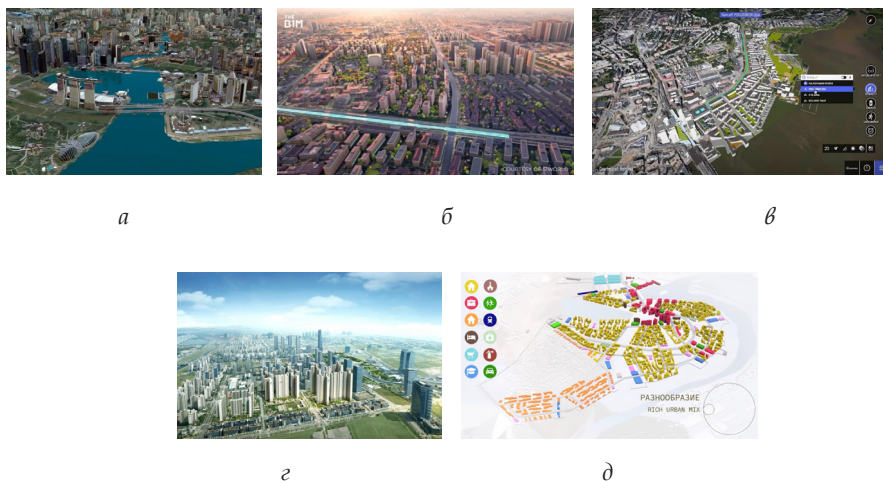


Рис. 4. Цифровые двойники городов: *а* – ЦД города «Сингапур»; *б* – ЦД города «Шанхай»; *в* – ЦД города «Хельсинки»; *г* – ЦД городов «Казань»; *д* – ЦД одного из районов Москвы [3; 8; 9; 13; 18; 20]

Поскольку ЦД городов представляют собой детальные виртуальные реплики реальных городских пространств, создаваемые на основе многочисленных данных, полученных с помощью современных технологий дистанционного зондирования (лазерного сканирования, аэрофото съемки, мобильной фотограмметрии и других), то и обработка и анализ этой информации с применением алгоритмов машинного обучения и ИИ позволяют создавать высокоточные и актуальные цифровые модели городских территорий. Одним из ключевых преимуществ ЦД является возможность комплексного анализа городской среды и принятия на основе полученных сведений взвешенных управленческих решений. Анализ пространственных данных позволяет идентифицировать наиболее перспективные локации для развития городской экономики, оптимизировать транспортные потоки, повысить энергоэффективность городской инфраструктуры и улучшить экологическую обстановку. Таким образом, ЦД городов служат основой для разработки и реализации стратегий устойчивого развития, позволяя прогнозировать последствия различных планировочных решений и оптимизировать использование городских ресурсов. Благодаря возможности детального моделирования городской среды, ЦД позволяют идентифицировать проблемные зоны,



связанные с загрязнением окружающей среды, и разрабатывать эффективные меры по их устранению. Кроме того, анализ данных мобильности населения позволяет оптимизировать расположение общественных пространств и транспортной инфраструктуры, повышая качество жизни горожан.

В современном градостроительстве все большую роль играет технология информационного моделирования зданий (далее — BIM). BIM-модель представляет собой детальную цифровую копию здания или сооружения, которая не только визуализирует его геометрию, но и содержит исчерпывающую информацию о всех его компонентах: от конструктивных элементов до инженерных систем. Эта технология позволяет интегрировать данные о проектировании, строительстве и эксплуатации объекта в единую информационную среду, что существенно повышает эффективность всех этапов жизненного цикла здания и способствует оптимизации процессов взаимодействия между различными участниками строительства. BIM-моделирование позволяет создавать точные виртуальные прототипы зданий, что дает возможность проводить всесторонний анализ проектных решений, выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях и оптимизировать строительные процессы (рис. 5).

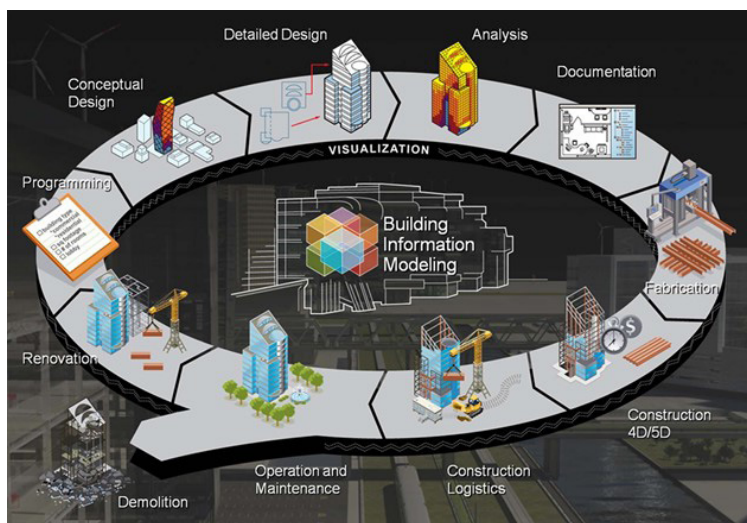


Рис. 5. Этапы создания BIM-модели [5]

ЦД человека открывают новые горизонты в персонализированной медицине, позволяя создавать детальные виртуальные модели пациентов. Они основаны на обширных данных, включающих генетическую информацию, физиологические показатели, анамнез и образ жизни, и дают возможность проводить глубокий анализ состояния здоровья, моделировать различные заболевания и разрабатывать индивидуальные планы лечения. Концепция «цифрового человека» предполагает создание комплексной виртуальной модели организма, включающей не только анатомические особенности, но и физиологические процес-

сы, генетическую информацию и сведения об образе жизни пациента. Такая модель позволяет прогнозировать развитие заболеваний, разрабатывать персонализированные планы лечения и оценивать эффективность различных терапевтических подходов в виртуальной среде. Особую актуальность цифровые двойники приобрели в условиях пандемии COVID-19. Виртуальные модели пациентов, созданные на основе данных, собираемых с помощью смартфонов, позволили отслеживать динамику распространения инфекции, прогнозировать ее течение и разрабатывать эффективные стратегии борьбы с заболеванием. Для реализации концепции цифровых двойников в здравоохранении необходима надежная информационная инфраструктура, обеспечивающая сбор, хранение и анализ больших объемов данных. Блокчейн-технологии могут быть использованы для создания безопасных и прозрачных платформ для обмена медицинскими данными между различными участниками системы здравоохранения (рис. 6).

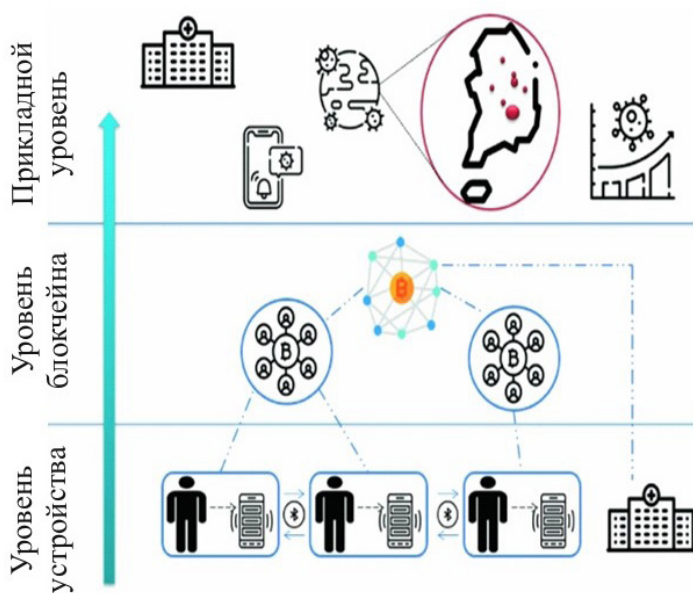


Рис. 6. Схема, основанная на блокчейн системе ЦД для «умного здорового города»

ЦД представляет собой многоаспектную киберфизическую систему, служащую для имитационного моделирования, углубленного анализа и оптимизации сложных объектов и процессов в разнообразных предметных областях. Данный термин, обладая высокой степенью концептуальной гибкости, находит применение в широком спектре научных и прикладных дисциплин, охватывая естественные (химия, биология, медицина), технические (инженерное дело, производство, строительство), социальные (социология, психология, история) и гуманитарные (урбанистика, культурология) области знания, адаптируясь к их специфическим эпистемологическим и методологическим требованиям (рис. 7).



Сфера применения	Иные специализированные названия	Определение
Химия	Цифровой двойник химических процессов Химия в облаке	компьютерное моделирование атомной или молекулярной структуры вещества, которое позволяет исследовать и предсказывать их свойства, реакции и поведение в различных условиях. Метод обеспечивает понимание и визуализацию химических процессов.
Инженерия	Цифровой двойник детали	виртуальная копия детали, созданная при помощи компьютерного моделирования. Двойник может быть использован для тестирования, анализа и оптимизации детали без необходимости физического изготовления. Данный подход позволяет сократить время затраты на разработку детали, а также минимизировать возможные ошибки при её создании и эксплуатации.
Производство	Цифровой двойник производства	виртуальная копия реального предприятия, создания на основе данных и информации, собранных с помощью различных технологий и систем. Он позволяет анализировать и оптимизировать бизнес-процессы, прогнозировать результаты и принимать управленческие решения на основе данных.
Строительство и проектирование	BIM модели	это 3D модель какого-либо объекта (здания), в которой объединены все жизненные циклы от строительства до сноса. BIM модель представляет собой полный информационный ресурс, посредством которого можно управлять документами, моделированием и координацией на протяжении любого периода работы с объектом.
Урбанистика/ Градостроительство	Цифровой двойник города "Умный город"	копия реального прототип будущего города, на базе которого можно анализировать жизненные циклы объекта, его реакцию на возможные изменения и внешние воздействия. Это точное отображение реального города в цифровой реальности, информация к которому поступает с различного рода датчиков, систем мониторинга и датчиков ресурсов.
Биология	Цифровой двойник Биомоделирование	компьютерная модель биологического объекта (организм, клетка, биомолекула), созданную с использованием методов компьютерного моделирования. Цифровой двойник обеспечивает возможность изучения структуры объекта, функций и взаимодействий. Копии могут использоваться для проведения различных экспериментов, анализа воздействия изменений и прогнозирования поведения биологических систем.
Медицина	Цифровой двойник человек Цифровой атлас человек	прототип виртуальной модели человеческого организма, которая содержит информацию о различных аспектах здоровья, анатомии, физиологии, биологических процессах и ментальных данных конкретного человека. Используются следующие данные: рентгеновские снимки, магнитно-резонансная томография, анализ биомаркеров и т.д.
История	Цифровая история Цифровые гуманитарные науки	это виртуальная копия исторического объекта, здания, места или события, созданная с помощью современных технологий (3D-сканирование, фотограмметрия, компьютерное моделирование и визуализация). Он позволяет сохранить исторические объекты/события в виртуальном пространстве, что дает возможность изучать их без физического доступа к ним. Копия также используется для восстановления утраченных объектов и анализа исторических данных.
Психология/ социология философия	Цифровой след человек Цифровой аватар Цифровая философия	прототип виртуальной модели социального и цифрового следа, который содержит информацию о различных психологических характеристиках, личностных особенностях, поведенческих паттернах и эмоциональных реакциях конкретного человека, а также социальный цифровой след в сети Интернет. Двойник может быть применен для продолжения "деятельности" человека и для генерирования "новой деятельности и знаний".

Рис. 7. Терминологическая вариабельность ЦД от сферы применения



Формирование ЦД базируется на интеграции методов вычислительного моделирования, включая математические модели, численные методы и алгоритмы, с эмпирическими данными, получаемыми посредством разветвленной сети сенсорных устройств и систем мониторинга. Эта синергия позволяет создавать виртуальные репрезентации, адекватно отображающие свойства, динамику и интеракции моделируемых сущностей. Применение ЦД обеспечивает возможность проведения *in silico* исследований, направленных на изучение поведения сложных систем в различных условиях, прогнозирование вероятных исходов, верификацию гипотез и оптимизацию технологических и социальных процессов без необходимости осуществления дорогостоящих и потенциально опасных экспериментов в реальном мире.

Развитие инфраструктуры ЦД в различных областях порождает существенную методологическую проблему, связанную с демаркацией границ их концептуального содержания, элементного состава и структурной организации. В частности, возникает необходимость в четком определении компонентов, находящихся за пределами понятия ЦД, особенно в контексте экологии и природопользования, где сложность и многофакторность систем требуют особого внимания к точности моделирования.

Рассмотрим некоторые заблуждения, связанные с ЦД. Первое из них касается ЦД и производных технологий ИИ, включая машинное обучение (далее — МО). Несмотря на то, что ЦД часто интегрируют алгоритмы МО и методы ИИ для обработки и анализа больших массивов данных, поступающих в режиме реального времени, редукция концепции ЦД исключительно к алгоритмам ИИ представляется методологически некорректной. ЦД в своей основе предполагает не только статистическую обработку данных, но и построение моделей, основанных на механистическом понимании функционирования моделируемых систем, учитывая причинно-следственные связи и фундаментальные законы, действующие в рассматриваемой предметной области. Иными словами, ЦД стремится к созданию не просто корреляционной, а каузальной модели, отражающей внутреннюю структуру и динамику объекта или процесса.

Следовательно, для достижения адекватного и содержательного понимания сущности ЦД, особенно в сложных областях, таких как экология и природопользование, критически необходимо наличие глубоких знаний в соответствующей предметной области. Без фундаментального понимания физических, химических, биологических и других процессов, определяющих функционирование экосистем, создание валидных и репрезентативных ЦД становится невозможным. Применение методов ИИ и МО в данном случае выступает как вспомогательный инструмент для обработки информации и выявления закономерностей, но не заменяет собой необходимость в глубоком предметном знании и построении моделей, основанных на фундаментальных научных принципах. Таким образом, ЦД представляет собой сложную киберфизическую систему, объединяющую методы вычислительного моделирования, анализ данных и обширные предметные знания, а не является простым приложением методов ИИ к наборам данных [12; 16].



Второе заблуждение заключается в том, что ЦД не сводится к простой агрегации обширных массивов интегрированных или взаимосвязанных данных, представляя собой качественно иное явление. Хотя ЦД и оперируют значительными объемами эмпирической информации, их существенная характеристика заключается в способности к контекстуализации данных, наделению их смыслом в рамках определенной предметной области посредством сопряжения с методами моделирования и имитации. Эта особенность обеспечивает возможность интеграции гетерогенных источников информации, включая данные, полученные из различных сенсорных сетей, баз данных, экспертных оценок и результатов моделирования, что, в свою очередь, обуславливает возможность проведения более глубокого и многоаспектного анализа моделируемых систем. Критический анализ этого аспекта позволяет выявить ряд важных моментов. Во-первых, простое накопление информации, даже структурированных и взаимосвязанных, не гарантирует возникновения ЦД. Необходимым условием является наличие модели, описывающей закономерности функционирования системы и позволяющей интерпретировать данные в рамках этой модели. Во-вторых, контекстуализация данных подразумевает не только установление связей между отдельными элементами информации, но и учет внешних факторов, влияющих на систему, а также целей и задач моделирования. В-третьих, сопряжение данных с моделированием и имитацией позволяет не только анализировать текущее состояние системы, но и прогнозировать ее поведение в различных условиях, а также оптимизировать ее параметры. Отличие ЦД от простой базы данных заключается в наличии операциональной модели, обеспечивающей интерпретацию и использование данных для решения конкретных задач анализа, прогнозирования и управления [7; 19].

Третье распространенное заблуждение заключается в отождествлении ЦД с понятием «модель». В научной литературе выделяется обширная типология моделей, включающая статические, динамические, объяснительные, описательные, статистические, имитационные и другие виды, каждая из которых обладает специфическими характеристиками и методологическими основаниями. ЦД, в свою очередь, могут использовать разнообразные модельные подходы, адаптированные к конкретным системным сущностям и целевым установкам. Однако ключевым дифференцирующим признаком ЦД является их динамическая природа, обусловленная непрерывным обновлением на основе актуальных данных, что обеспечивает адекватное отражение текущего состояния моделируемых объектов или процессов. Такая характеристика принципиально отличает ЦД от статических моделей, представляющих собой фиксированный во времени срез реальности.

Интерактивность, обеспечиваемая ЦД, предоставляет пользователям возможность исследования динамики развития различных сценариев, позволяя оперативно реагировать на поступающие данные и использовать их для принятия обоснованных решений в режиме реального времени. Это свойство ЦД имеет особое значение в контексте управления сложными системами, где оперативное реагирование на изменяющиеся условия чрезвычайно важно. Критический анализ этого аспекта требует уточнения ряда значимых моментов. Во-первых, необходимо подчер-



кнуть, что ЦД не претендует на создание исчерпывающей репрезентации всех аспектов реальности. Как и любая модель, ЦД представляет собой упрощенную абстракцию, фокусирующуюся на определенных свойствах и отношениях, существенных для решения конкретных задач. Стремление к созданию всеобъемлющих ЦД для глобальных систем, хотя и возможно теоретически, не всегда является необходимым условием для достижения практической пользы. Эффективность ЦД определяется не масштабом модели, а ее адекватностью поставленным целям и задачам. Во-вторых, границы ЦД, определяющие область его применимости, устанавливаются заранее, исходя из целей моделирования и доступных ресурсов. Они могут быть скорректированы в процессе эксплуатации ЦД по мере получения новой информации и изменения требований. В-третьих, динамическая природа ЦД требует постоянного мониторинга и валидации, обеспечивающих соответствие модели реальному состоянию системы. Отсутствие адекватной валидации может привести к накоплению ошибок и, как следствие, к принятию неверных решений на основе данных ЦД. Таким образом, ЦД следует рассматривать не как синоним модели вообще, а как особый класс динамических моделей, характеризующихся непрерывным обновлением данных, интерактивностью и ориентацией на решение конкретных практических задач в рамках четко определенных границ [17].

Анализ существующих определений ЦД в экологии и природопользовании (далее — ЦД ЭП) демонстрирует отсутствие унифицированного, консенсусного определения. Этот обусловлен междисциплинарным характером области и разнообразием прикладных задач. Тем не менее можно выделить системообразующий признак ЦД ЭП, заключающийся в отображении сложной сети взаимосвязей между природными, антропогенными и природно-антропогенными факторами, формирующими экологические системы.

Интеграция гетерогенных данных, полученных из различных источников, включая данные дистанционного зондирования Земли, результаты натурных наблюдений, статистические данные, геоинформационные системы и др., в сочетании с применением адекватных математических, физических, химических, биологических и других моделей, позволяет ЦД ЭП осуществлять виртуальные эксперименты, направленные на оценку последствий реализации различных сценариев развития территорий и антропогенного воздействия на окружающую среду. Такой подход предоставляет возможность моделирования изменений в экосистемах без непосредственного вмешательства в реальную природную среду, что является его существенным преимуществом.

Критический анализ данной концепции выявляет ряд важных аспектов. Во-первых, сложность и многофакторность экологических систем обуславливают необходимость разработки специализированных моделей, учитывающих специфические особенности конкретных геосистем и процессов. Универсализация моделей в рассматриваемой области представляется затруднительной и может привести к снижению точности и адекватности результатов. Во-вторых, валидация ЦД ЭП представляет собой сложную задачу, требующую сопоставления результатов виртуальных экспериментов с данными натурных наблюдений



и экспертных оценок. Недостаточная валидация может привести к недостоверным прогнозам и, как следствие, к принятию неэффективных управленческих решений. В-третьих, необходимо учитывать ограничения, связанные с доступностью и качеством данных, используемых для построения ЦД ЭП. Неполнота или недостоверность исходных данных может существенно повлиять на точность и достоверность результатов моделирования.

Тем не менее ЦД ЭП предоставляет уникальную возможность для комплексного анализа и прогнозирования состояния окружающей среды, позволяя разрабатывать научно обоснованные стратегии управления природными ресурсами и минимизации негативного антропогенного воздействия. Возможность проведения виртуальных экспериментов позволяет оценить потенциальные риски и последствия различных управленческих решений, что способствует повышению эффективности природоохранной деятельности и устойчивому развитию территорий.

ЦД ЭП представляет собой динамическую, многомерную виртуальную репрезентацию реальной природной системы или экологического процесса, конструируемую на основе интеграции данных, получаемых из разнообразных источников. К ним относятся данные дистанционного зондирования Земли (например, спутниковые снимки), данные, поступающие с различных сенсорных устройств (датчиков), результаты вычислительного моделирования, а также информация из иных релевантных источников. В отличие от статических моделей, ЦД ЭП обладает способностью к непрерывной актуализации, отражая динамические изменения в моделируемой системе. Попытка визуализировать термин посредством существующих нейронных сетей (Kandinsky, Шедеврум и др.) представлено на рисунке 8.



Рис. 8. Восприятие термина «ЦД ЭП» нейронной сетью *Kandinsky by Sber AI*

Использование ЦД ЭП предоставляет возможность проведения имитационного моделирования различных сценариев развития экологической ситуации, прогнозирования изменений в экосистемах под воздей-



ствием различных факторов, включая антропогенные, и, как следствие, принятия более обоснованных и научно фундаментальных решений в области управления природными ресурсами и охраны окружающей среды. Этот подход позволяет перейти от реактивного управления к проактивному, основанному на прогнозировании и превентивных мерах.

Критический анализ данного определения требует учета ряда важных методологических аспектов, которые уже были частично сформулированы в статье и приводит нас к следующим выводам.

1. ЦД ЭП представляет собой сложную киберфизическую систему, а не простое собрание данных. Ключевым отличием ЦД ЭП является контекстуализация данных и их интерпретация в рамках определенной модели.

2. ЦД ЭП — упрощенная модель реальности с ограниченной областью применения. Стремление к созданию универсального ЦД ЭП для всех возможных ситуаций нецелесообразно. Границы и степень детализации ЦД ЭП должны определяться исходя из конкретных целей и задач моделирования.

3. Валидация ЦД ЭП — критический этап для обеспечения достоверности результатов. Сопоставление результатов моделирования с данными натурных наблюдений и экспертными оценками необходимо для верификации и калибровки модели. В контексте экологии и природопользования, где системы характеризуются высокой степенью сложности и нелинейности, эта задача приобретает особую актуальность.

4. Успешное применение ЦД ЭП требует междисциплинарного подхода. Необходимо учитывать, что успешное функционирование ЦД ЭП требует не только наличия данных и вычислительных ресурсов, но и глубоких предметных знаний в области экологии, природопользования, математического моделирования и информационных технологий. Междисциплинарный подход является необходимым условием для эффективного использования ЦД ЭП в управлении природными ресурсами.

В самом первом приближении дорожная карта создания ЦД выглядит следующим образом: формализация целей исследования — сбор и обработка данных — разработка концептуальной модели — математическое моделирование — валидация модели ЦД — калибровка модели ЦД — анализ чувствительности — использование модели ЦД.

Список источников

1. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. Введ. 01.01.2022. М., 2021.

2. ГОСТ Р 58301-2018. Управление данными об изделии. Электронный макет изделия. Общие требования. Введ. 05.12.2018. М., 2019.

3. 51World creates digital twin of the entire city of Shanghai // Unreal Engine. URL: <https://www.unrealengine.com/en-US/spotlights/51world-creates-digital-twin-of-the-entire-city-of-shanghai> (дата обращения: 12.12.2024).

4. Barricelli B.R., Casiraghi E., Fogli D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications // IEEE access. 2019. Vol. 7. P. 167653–167671. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.



5. BIM là gì? Những lợi ích của việc sử dụng Revit Mep là gì? // Mayercamnoi. URL: <https://mayercamnoi.com/BIM-la-gi-Nhung-loi-ich-cua-viec-su-dung-Revit-Mep-la-gi-1657944874/> (дата обращения: 12.12.2024).

6. Digital Twin a dynamic real-time model of what's happening in the physical world // Sensative.com. URL: <https://sensative.com/iot-use-cases-by-sensative/digital-twin/> (дата обращения: 14.12.2024).

7. Durão L. F. C. S., Haag S., Anderl R. et al. Digital twin requirements in the context of industry 4.0 // Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0: 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2–4, 2018, Proceedings 15. Springer International Publishing, 2018. P. 204–214. doi: 10.1007/978-3-030-01614-2_19.

8. El Azzaoui A., Kim T.W., Loia V., Park J.H. Blockchain-based secure digital twin framework for smart healthy city // Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering: MUE-FutureTech 2020. Springer Singapore, 2021. P. 107–113. doi: 10.1007/978-981-15-9309-3_15.

9. Future Moscow – Rublyovo Arkhangelskoye the Smart City by Zaha Hadid Architects // YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=t9PWVPxVRxk> (дата обращения: 14.12.2024).

10. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA. 2012. P. 1818. doi: 10.2514/6.2012-1818.

11. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // White paper. 2014. Vol. 1, №2014. P. 1–7.

12. Groshev M., Guimaraes C., Martin-Perez J., de la Oliva A. Toward intelligent cyber-physical systems: Digital twin meets artificial intelligence // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59, №8. P. 14–20. doi: 10.1109/MCOM.001.2001237.

13. Infrastructure Digital Twins // Bentley. URL: <https://www.bentley.com/software/infrastructure-digital-twins/> (дата обращения: 14.12.2024).

14. ISO 23247-3-2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 3: Digital representation of manufacturing elements. 01.01.2021. Geneva, 2021.

15. Jones D., Snider S., Nassehi A. et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2020. Vol. 29. P. 36–52. doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

16. Lv Z., Xie S. Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics // Digital Twin. 2022. Vol. 1. P. 12. doi: 10.12688/digitaltwin.17524.2.

17. Platenius-Mohr M., Malakuti S., Grüner S. et al. File-and API-based interoperability of digital twins by model transformation: An IIoT case study using asset administration shell // Future generation computer systems. 2020. Vol. 113. P. 94–105. doi: 10.1016/j.future.2020.07.004.

18. Singapore Land Authority 3D Smart Nation Map; Credit: Esri Singapore // GIS Resources. URL: <https://gisresources.com/singapore-land-authority-3d-smart-nation-map-debuts-on-the-world-stage> (дата обращения: 08.12.2024).

19. Uhlemann T.H.J., Schock C., Lehmann C. et al. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 9. P. 113–120. doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.043Get rights and content.



20. Zakirova T. Application of innovative standards of “green” construction in Tatarstan on the example of Kazan // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Vol. 274. P. 01001.

Об авторах

Татьяна Викторовна Сукманова — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: tanja.sukmanova@yandex.ru

ORCID: 0009-0007-3402-6400

SPIN-код: 3907-8766

Николай Сергеевич Белов — канд. геогр. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: belovns@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2350-3690

SPIN-код: 6141-3843

T. V. Sukmanova, N. S. Belov

DIGITAL TWIN AS A TOOL FOR MODELING AND OPTIMIZATION OF COMPLEX NATURAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

Received 26 December 2024

Accepted 06 February 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-3

To cite this article: Sukmanova T. V., Belov N. S., 2025, Digital twin as a tool for modeling and optimization of complex natural and technical system, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 40–57. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-3.

The concept of a digital twin (hereafter referred to as DT) is discussed as a complex cyber-physical system that represents a virtual representation of physical objects, processes, or systems. A retrospective analysis of the evolution of this technology is conducted, starting from its origins in NASA’s practice and culminating in contemporary conceptual approaches, such as the product life cycle model proposed by Michael Grieves and the multi-physics models developed by Glassgen. Unlike simple modeling, a DT ensures dynamic correspondence between the virtual and physical entities through continuous data exchange and feedback. Key methodological aspects of creating and operating a DT are identified, including issues related to the integration of heterogeneous data, the selection of appropriate models, and ensuring interoperability. A critical analysis of the advantages and limitations of this technology is provided, taking into account considerations regarding the need for validation and the limitations associated with the availability and quality of data. The prospects for further development of DT are discussed, particularly the integration with artificial intelligence technologies and big data analytics to address complex tasks related to sustainable development and the minimization of



anthropogenic impact on the environment, including aspects of pollution monitoring and natural resource management. It is specifically emphasized that, unlike a simple database, a DT possesses an operational model that enables the interpretation and use of data to solve specific tasks.

Keywords: Digital twin, modeling, Industry 4.0, geoecology, sustainable development

The authors

Tatiana V. Sukmanova, PhD student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: tanja.sukmanova@yandex.ru

ORCID: 0009-0007-3402-6400

SPIN-код: 3907-8766

57

Dr Nikolai S. Belov, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: belovns@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2350-3690

SPIN-код: 6141-3843

Р. А. Баймуратов, М. Г. Напреенко, А. А. Шангина

АККУМУЛЯЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ
МОХООБРАЗНЫХ ТОРФЯНО-БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ
КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

Поступила в редакцию 24.11.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-4

58

Для цитирования: Баймуратов Р. А., Напреенко М. Г., Шангина А. А. Аккумуляционная способность мохообразных торфяно-болотных экосистем Калининградской области // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 58–70. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-4.

Представлены результаты изучения накопительных способностей мохообразных в двух торфяно-болотных экосистемах разной степени нарушенности на территории Калининградской области – на болоте Большом и торфянике Виттгирренском. Были изучены широко распространённые виды болотных мхов: *Aulacomnium palustre*, *Polytrichum strictum*, *Sphagnum centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum* и *S. squarrosum*, а также эталонный вид *Pleurozium schreberi*. В ходе исследования, методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии, определено содержание 8 макро- и микроэлементов Mn, Zn, Ni, Fe, Br, Rb, Sr и Ca. Во мхах установлено статистически значимое отличие концентраций Mn, Zn, Ni, Br и Rb. Отмечена высокая корреляционная зависимость между железом и кальцием, что может свидетельствовать об одном источнике попадания данных элементов в растения. Виды мхов *Aulacomnium palustre* и *Sphagnum centrale* выделены как сходные по аккумуляционным способностям с эталонным *Pleurozium schreberi*.

Ключевые слова: аккумуляционные способности, мохообразные, нарушенные торфяники, биомониторинг, сфагнум, рентгенофлуоресцентная спектроскопия, Калининградская область

Введение

Мохообразные активно используются в качестве индикаторов состояния окружающей среды, а также для оценки уровня атмосферных осадений [1]. Ввиду отсутствия у мохообразных корневой системы, они получают минеральные вещества непосредственно из атмосферы, что делает их высоко чувствительными и эффективными индикаторами загрязнения воздуха [2]. Биомониторинг с использованием мохообразных



является хорошим вариантом оценки атмосферного осаждения загрязняющих веществ благодаря дешевизне, широкому распространению объектов исследования и устойчивости к стресс-реакциям [3].

Исследования аккумуляционных способностей мохообразных позволили определить наиболее подходящие (эталонные) для мониторинговых работ виды мхов: *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*, *Pseudoscleropodium purum*, *Hypnum cupressiforme* [4]. Одним из перспективных направлений развития методологии «моховой техники» на сегодняшний день стало выявление новых видов-индикаторов с аналогичными накопительными способностями. В литературных источниках помимо эталонных видов часто упоминаются *Abietinella abietina*, *Barbula indica*, *Camptothecium lutescens*, *Homalothecium sericeum* [5–7].

Накопительные способности некоторых болотных мхов также отражают геохимические особенности местности, но данные растения пока не относятся к индикаторным видам [8]. Тем не менее интерес к изучению их аккумуляционных способностей растет и способствует развитию метода бриоиндикации. Важно учитывать и то, что мохообразные выступают широко распространенными и даже средообразующими видами некоторых экосистем, в частности, болот.

В Калининградском регионе накопительные способности рассматриваемых видов растений изучаются сравнительно недавно, начиная с 1995 г. [9–13], при этом на территории области сфагновые мхи произрастают в основном на торфяных болотах, занимающих чуть более 5% площади [14].

Целью данного исследования является сравнение способностей доминирующих видов мхов накапливать различные химические элементы, включая тяжелые металлы на торфяниках с разной степенью антропогенной нарушенности.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования для изучения аккумуляционных способностей были выбраны торфяно-болотные экосистемы, расположенные в центральной части Калининградской области и характеризующиеся разной степенью антропогенной трансформации (рис. 1).

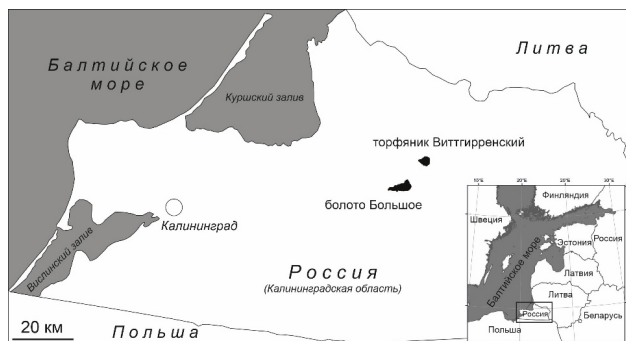


Рис. 1. Расположение исследуемых торфяно-болотных экосистем на территории Калининградской области



Болото Большое (далее — ББ), занимает площадь 600 га, расположено в Черняховском районе, внутри лесного массива Гремячьего (54°26'27.6" с. ш., 21°22'19.2" в. д.). В настоящий момент на ББ преобладают фитоценозы кочковато-мочажинного и сосново-кустарничкового окраинного комплексов, встречаются топяные участки [14]. Эдификаторами сообществ выступают различные виды сфагновых мхов. Данная экосистема слабо затронута антропогенным воздействием и на большей части сохранила типичные местообитания верхового болота (за исключением краевой части, где проводилась осушительная мелиорация) [15]. Отбор проб осуществлялся как в центральной части болота, сохранившейся в естественном состоянии, так и на его периферии — в полосе, подвергшейся осушению.

Торфяник Виттирренский (далее — ТВ) расположен в Славском районе, в 4 км к северу от ББ (54°28'46.2" с. ш., 21°23'46.0" в. д.), занимает около 120 га и представляет собой остаточную, сильно трансформированную торфяную залежь [16], сохранившуюся после промышленной фрезерной добычи торфа в 1970—1980-х гг. Доминирующей растительностью торфяника является молодая (15—30 лет) низкорослая березовая поросль с кочками из пушицы и вереска. В отдельных местах встречаются участки открытого торфа. Вдоль крупных канав и на сильно дренированных участках развит довольно высокий березовый древостой.

Отбор проб и методы анализа

Сбор растительного материала осуществлялся на основе рекомендаций по отбору проб в рамках международной программы по воздействию загрязнения воздуха на естественную растительность и сельскохозяйственные культуры *ICP-Vegetation* [17]. С площадок 10×10 м², выбранных в связи с высокой встречаемостью на них мохообразных [18], было отобрано 16 проб на ББ (9 площадок) и 18 проб на ТВ (7 площадок). Отбор проб осуществлялся с разных мест произрастания: напочвенный покров, кочки, влажные понижения, канавы различной глубины, сфагновые ковры (табл. 1).

Таблица 1

Описание площадок отбора

Площадка	Местообитание	Виды мхов
<i>Болото Большое</i>		
1	Краевой склон болота, сосново-кустарничково-сфагновый комплекс. Крупная кочка	<i>Sphagnum fuscum</i>
2	Кочковато-мочажинный комплекс с мелкими слабообводненными мочажинами в центре болота. Низкая кочка	<i>Sphagnum magellanicum</i>
3	Сосняк вересковый в центре болота. Межкочие	<i>Aulacomnium palustre</i>
4	Кочковато-мочажинный комплекс с низкими кочками на плато болота. Обводненный сфагновый ковер	<i>Sphagnum cuspidatum</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i>



Площадка	Местообитание	Виды мхов
5	Мочажинный комплекс на краевом склоне болота. Крупная мочажина и сфагновый ковер в основании кочки	<i>Sphagnum cuspidatum</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i>
6	Сосняк вересковый в центре болота. Высокая кочка	<i>Polytrichum strictum</i>
7	Сосняк багульниковый высокоствольный на периферии болота. Почва	<i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Sphagnum centrale</i>
8	Смешанный лес на осушенной торфяной почве на окраине болота. Почва	<i>Pleurozium schreberi</i>
9	Березняк с ивой на окраине болота на границе торфяной залежи. Канавы	<i>Sphagnum squarrosum</i>
<i>Торфляник Виттгенренский</i>		
1	Травяно-сфагновая топь на заброшенной карте торфоразработки. Сфагновый ковер (из нескольких видов)	<i>Sphagnum centrale</i> , <i>Sphagnum cuspidatum</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i>
2	Канавы с ситником и ивой серой между картами торфоразработок. В центре и на бровке канавы	<i>Aulacomnium palustre</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Polytrichum strictum</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i> , <i>Sphagnum squarrosum</i>
3	Березовая поросль с пушицей и сфагнами на заброшенной карте торфоразработки. Основание кочки	<i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Sphagnum fuscum</i>
4	Обводненное понижение с ситником	<i>Sphagnum cuspidatum</i>
5–6	Канавы межкартовая с крупными кочками пушицы и фрагментами сфагновых ковров	<i>Sphagnum centrale</i> , <i>Sphagnum cuspidatum</i>
7	Канавы межкартовая со сплошным сфагновым ковром и рассеянными кочками пушицы	<i>Sphagnum cuspidatum</i>

Для определения мохообразных применялись общепринятые методы, описанные в литературе. При идентификации мхов использовались определители [19–21]. Комплекс близкородственных видов *Sphagnum magellanicum* мы рассматриваем в прежнем объеме [21] – в качестве одного вида *Sphagnum magellanicum* s. l, поскольку для целей исследования нет необходимости разделения его на отдельные таксоны, которые очень близки экологически и могут произрастать в одной дерновинке [22], тем более, что процесс разделения этого комплекса на отдельные виды в узком понимании пока еще не закончен [23].

Процедура отбора проб включала ручной сбор и упаковку каждого образца в герметичные полиэтиленовые ZIP-пакеты. Дальнейшая пробоподготовка состояла в очистке проб от примесей в лабораторных условиях, высушивания в бумажных пакетах при комнатной температуре и влажности до постоянного веса при 40 °С [24]. Для определения элементного состава образцов использовали метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре Max G (Санкт-Петербург, Россия,



НПО Спектрон). Высушенные мохообразные измельчали в порошок, 0,25 г которого прессовали в таблетки с основанием из борной кислоты. Интенсивность флуоресценции измеряли по методике, разработанной производителем оборудования для элементного анализа растений: анод — Ag, кристалл-анализатор — LiF (200), напряжение — 40 кВ, ток — 0,1, время экспозиции — 100 с при определении Ca, Mn, Ni, Zn, Br, Rb и Sr (50 с для Fe). Результаты анализа контролировали с использованием стандартных образцов с известным составом, разработанных в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН: травосмеси, SSS 8922-2007; элодеи канадской, SSS 8921-2007; листа березы, SSS 8923-2007 [25].

Для выявления статистически значимых различий между концентрациями элементов в исследуемых экосистемах был проведен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Концентрации элементов схожи между собой при значимости $p > 0,05$.

Анализ корреляционных связей между элементами в пробах мохообразных, проведенный при помощи коэффициента корреляции Пирсона, выявил линейную зависимость, которая значима при $p \leq 0,01^{**}$ (99 % надежности) и при $p \leq 0,05^{*}$ (95 % надежности) [6; 7]. Для интерпретации тесноты связи между переменными использовалась шкала Чеддока, где степень корреляции определяется как слабая при $r < 0,3$, умеренная при $0,3 \leq r < 0,5$, заметная при $0,5 \leq r < 0,7$, высокая при $0,7 \leq r < 0,9$, весьма высокая при $r \geq 0,9$.

Статистическая обработка данных

Особенности содержания элементов в изученных видах мохообразных определялись при помощи описательной математической статистики. Для статистических расчетов использовалось программное обеспечение Microsoft Excel и IBM SPSS Statistics 23.

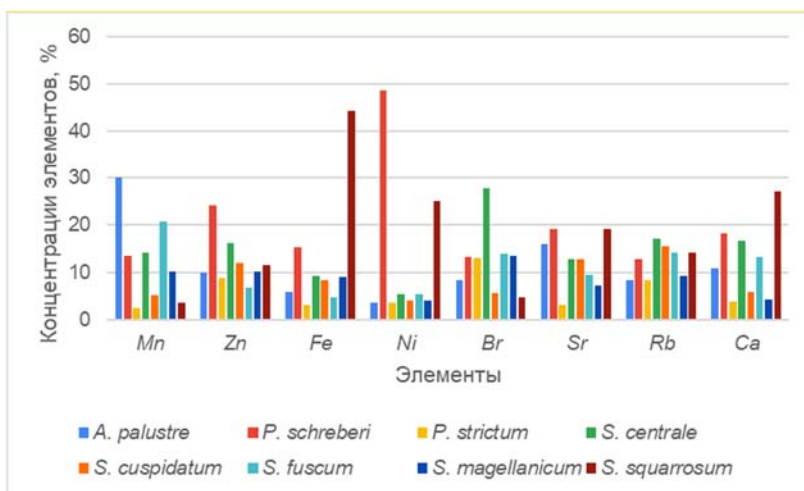
Результаты и обсуждение

На ББ в качестве широко распространенных видов было выделено и отобрано 11: *Aulacomnium palustre*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum strictum*, *Sphagnum angustifolium*, *S. centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fimbriatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum*, *S. rubellum* и *S. squarrosum*.

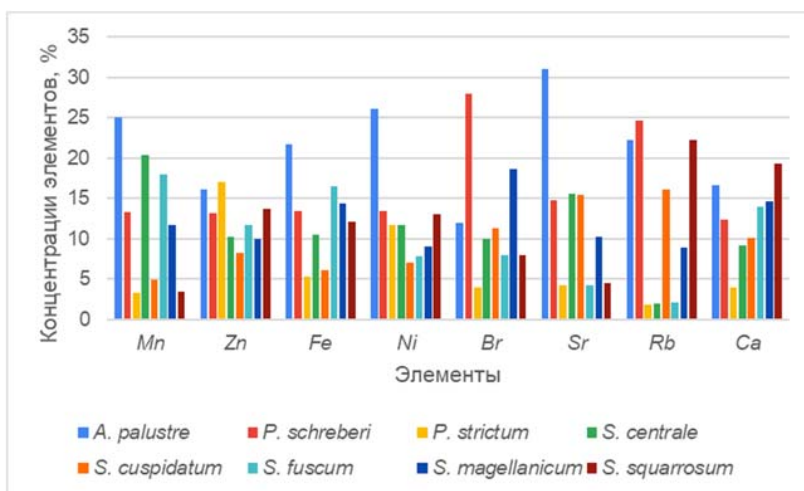
Доминирующими мохообразными на ТВ являются 12 видов: *Aulacomnium palustre*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*, *P. strictum*, *Sphagnum capillifolium*, *S. centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum*, *S. riparium*, *S. squarrosum* и *S. teres*.

Поскольку видовой состав мохообразных на каждом из торфяников не совпадает полностью, для исследования были отобраны и проанализированы только виды, обнаруженные на обеих территориях: *Aulacomnium palustre*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum strictum*, *Sphagnum centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum* и *S. squarrosum*.

В ходе работы в образцах проб мохообразных определены концентрации восьми макро- и микроэлементов: Mn, Zn, Ni, Fe, Br, Rb, Sr и Ca. На рисунке 2 показаны результаты накопления элементов разными видами мхов на торфяниках с разной степенью нарушенности.



а



б

Рис. 2. Концентрации элементов: а – на ББ; б – ТВ

Различия в аккумуляции элементов на торфяниках разной степени нарушенности

Концентрации определенных элементов на всех территориях исследования не выходят за пределы нормального диапазона их содержания в растениях [26]. Включая группу тяжелых металлов, все элементы в необходимых концентрациях нужны для нормального роста и развития растений [27], тогда как их недостаток или избыток может привести к физиологическому стрессу и иметь неблагоприятные последствия [28].



Исследование показало, что концентрации *Mn*, *Zn*, *Ni*, *Br* и *Rb* во мхах на торфяниках разной степени нарушенности статистически значимо отличаются ($p < 0,05$). Различия между концентрациями данных элементов в образцах, возможно, обусловлены следствием стресс-реакции мохообразных на сильные колебания УБВ [16]. Значения *Fe*, *Sr* и *Ca* на обеих экосистемах схожи. Максимальные концентрации отмечены в понижениях микрорельефа, что, предположительно, связано с аккумуляцией во мхах в процессе водной миграции элементов.

Расчитанный коэффициент корреляции Пирсона позволил отметить высокую взаимозависимость между железом и кальцием; заметную — в парах марганец — бром, цинк — никель, цинк — бром, цинк — рубидий, железо — никель, никель — кальций, бром — рубидий (табл. 2). Высокая и заметная корреляция может быть связана с общими источниками поступления элементов.

Таблица 2

Коэффициент корреляции Пирсона

	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Br</i>	<i>Sr</i>	<i>Rb</i>
<i>Zn</i>	0,346						
<i>Fe</i>	-0,077	0,283					
<i>Ni</i>	0,094	0,683**	0,616**				
<i>Br</i>	0,599**	0,560**	-0,038	0,103			
<i>Sr</i>	0,284	0,446*	0,427*	0,488*	0,128		
<i>Rb</i>	0,406*	0,539**	0,185	0,198	0,590**	0,436*	
<i>Ca</i>	0,168	0,460*	0,730**	0,565**	0,205	0,493*	0,449*

* Корреляция значима на уровне 0,05.

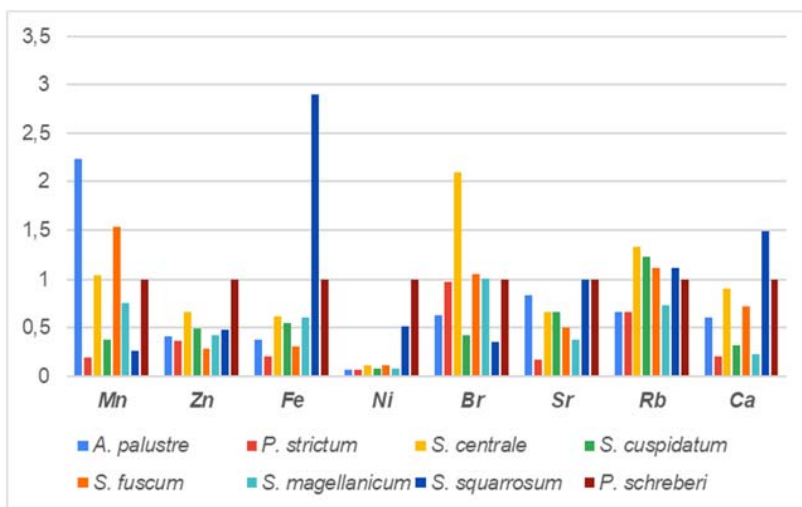
** Корреляция значима на уровне 0,01.

Для интерпретации результатов проведен факторный анализ, показавший, что на накопление во мхах изученных элементов влияет два фактора. Первый предположительно связан с водной миграцией элементов и отвечает за привнос *Zn*, *Ni*, *Fe*, *Sr* и *Ca*, поскольку максимальные значения для них были отмечены у образцов, приуроченных к обводненным понижениям микрорельефа. Вторым фактором может быть влияние морского аэрозоля, который служит источником накопления *Mn*, *Br* и *Rb* [24].

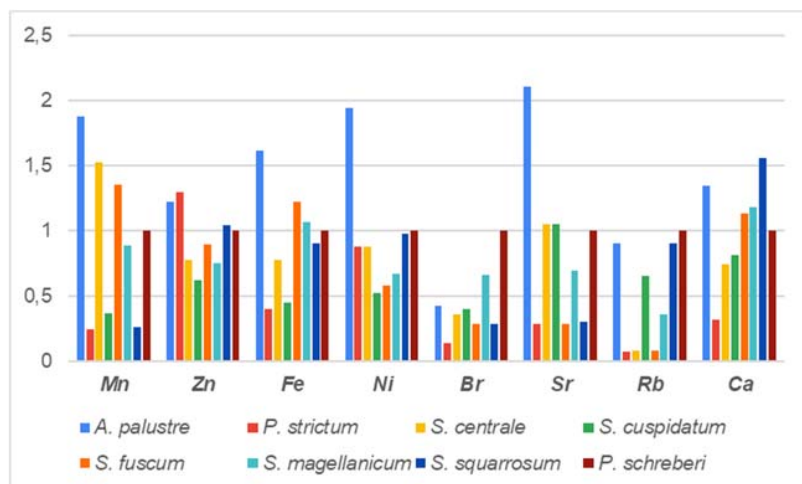
Аккумуляционная способность мохообразных определялась с помощью индексов, которые представляют собой отношения содержания *i*-го элемента в болотных мхах к концентрации их же в эталонном виде *Pleurozium schreberi* по формуле 1:

$$I_k = C_{i(\text{mox})} : C_{i(\text{P. schreberi})} \quad (1)$$

О близости аккумулярующих способностей мхов можно говорить в случае, если значение рассчитанного индекса близко к 1. На рисунке 3 представлена диаграмма распределения, которая демонстрирует количественное соотношение содержания микроэлементов в исследуемых видах мхов по сравнению с эталонным видом.



a



б

Рис. 3. Аккумуляционные способности мохообразных: а – на ББ; б – ТВ по отношению к эталонному виду *Pleurozium schreberi*

Выделить конкретные виды мохообразных, похожие на эталонный, сложно, однако из рисунка 3 можно сделать выводы о том, что практически аналогичной накопительной способностью на ББ обладают виды *Aulacomnium palustre*, *Sphagnum centrale* и *S. magellanicum* (рис. 3, а), тогда как на ТВ сходными с *Pleurozium schreberi* по аккумуляционным способностям могут считаться *Aulacomnium palustre* и *Sphagnum centrale* (рис. 3, б).

Стоит отметить виды, аккумуляционные способности которых выделяются на двух территориях исследования: это *Aulacomnium palustre* и *Sphagnum centrale*.



Аккумуляционная способность вида *Aulacomnium palustre* доказана рядом исследований [29; 30], в том числе в работе авторов [15]. Результаты нынешнего анализа коррелируют с данными предыдущего [15], дополняя их информацией о новых потенциально индикаторных видах мохообразных.

Полученные результаты коррелируют с данными ранних исследований [15; 29; 30], подтверждая высокую аккумулятивную способность *Aulacomnium palustre*. Рассматриваемый вид, имея обильный ризоидный войлок по всему побегу [29], способен активно накапливать в себе различные элементы. Вероятно, произрастание в мало нарушенной экосистеме ББ с относительно стабильным высоким уровнем обводнения не требует от растения концентрирования значительного количества элементов. Однако при попадании в «стрессовую» среду ТВ, где отмечены значительные колебания уровня болотных вод [16], *A. palustre* демонстрирует повышенную способность к накоплению элементов (полученные концентрации практически всех элементов, за исключением *Mn* для данного вида выше на ТВ).

У сфагновых мхов в целом нами отмечена более низкая способность к накоплению элементов, чем у *Pleurozium schreberi*, что согласуется и с данными по Центральной России [8]. Тем не менее следует отметить способность *Sphagnum centrale* к аккумуляции некоторых элементов, таких как марганец, цинк, бром, рубидий и кальций.

Таким образом, виды *Aulacomnium palustre* и *Sphagnum centrale* при дальнейшем изучении их аккумулярующих способностей могут быть рекомендованы в качестве индикаторов состояния атмосферного воздуха. Данные виды накапливают изученные элементы подобно эталонному *Pleurozium schreberi*.

Выводы

1. Средние содержания марганца, цинка, железа, никеля, брома, стронция, рубидия и кальция на торфяниках разной степени антропогенной нарушенности соответствуют нормальному уровню. Наиболее трансформированный ВТ характеризуется сниженным уровнем содержания элементов в мхах по сравнению с наименее затронутой антропогенным воздействием экосистемой ББ. Особенно это заметно для марганца, никеля, брома и рубидия.

2. На торфяниках разной степени антропогенной нагрузки отмечены значимые различия в накоплении *Mn*, *Zn*, *Ni*, *Br* и *Rb*, в то время как *Fe*, *Sr* и *Ca* концентрируются примерно одинаково.

3. Аккумуляционные способности видов *Aulacomnium palustre* и *Sphagnum centrale* в отношении изученных элементов подобна эталонному виду *Pleurozium schreberi*, что говорит о возможности их использования в качестве индикаторов загрязнения атмосферного воздуха.

Работа выполнена в рамках государственного задания БФУ им. И. Канта по теме НИР «Климатический мониторинг природных и антропогенных систем Калининградской области в условиях глобальных изменений окружающей среды» в части реализации проекта Министерства науки и высшего образования РФ по созданию карбоновых полигонов. Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания и предложения на стадии подготовки статьи.



Список литературы

1. Bozau E., Lojen S., Zupančič N. The peat bog at Zinnwald-Georgenfeld revisited after 25 years: Geochemical investigation of water, Sphagnum moss and peat cores // *Geochemistry*. 2022. Vol. 82, №1. P. 125823. doi: 10.1016/j.chemer.2021.125823.
2. Aceto M., Abollino O., Conca R. et al. The use of mosses as environmental metal pollution indicators // *Chemosphere*. 2003. Vol. 50. P. 333–342. doi: 10.1016/S0045-6535(02)00533-7.
3. García-Seoane R., Antelo J., Fiol S. et al. Unravelling the metal uptake process in mosses: Comparison of aquatic and terrestrial species as air pollution biomonitors // *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 333. P. 122069. doi: 10.1016/j.envpol.2023.122069.
4. Frontasyeva M., Galinskaya T. Ye, Krmar M. et al. Atmospheric deposition of heavy metals in northern Serbia and Bosnia-Herzegovina studied by the moss biomonitoring, neutron activation analysis and GIS technology // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2004. Vol. 259, №1. P. 141–144. doi: 10.1023/b:jrnrc.0000015819.67830.60.
5. Dyderski M. K., Czapiewska N., Zajdler M. et al. Functional diversity, succession, and human-mediated disturbances in raised bog vegetation // *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 562. P. 648–657. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.102.
6. Harmens H., Norris A. D., Steinnes E. et al. Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: spatial patterns and temporal trends in Europe // *Environmental Pollution*. 2010. Vol. 158. P. 3144–3156. doi: 10.1016/j.envpol.2010.06.039.
7. Harmens H., Norris D., Mills G. Heavy metals and nitrogen in mosses: spatial patterns in 2010/2011 and long-term temporal trends in Europe // *NERC/Centre for Ecology & Hydrology*. 2013. doi: icpvegetation.ceh.ac.uk.
8. Gorelova S. V., Frontasyeva M. V., Volkova E. V. et al. Trace element accumulating ability of different moss species used to study atmospheric deposition of heavy metals in Central Russia: Tula region case study // *International Journal of Biology and Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 10. P. 271–285.
9. Rühling Å. Atmospheric heavy metal deposition in Europe 1995–1996. Nordic Council of Ministers, 1998.
10. Королева Ю. В. Биоиндикация атмосферных выпадений тяжелых металлов на территории Калининградской области // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки*. 2010. №7. С. 39–44. EDN: MSYOOH.
11. Королева Ю. В. Использование мхов *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi* для оценки абсолютных значений атмосферных выпадений тяжелых металлов в Калининградской области // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки*. 2006. №7. С. 29–34. EDN: HVSBFR.
12. Frontasyeva M., Harmens H., Uzhinskiy A. et al. Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond. Dubna, 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.30159.71848.
13. Ананян А. С., Королева Ю. В., Алексеенок Ю. В. Биомониторинг тяжелых металлов на территории Калининградской области // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. Т. 12, №102. С. 25–31. doi: 10.23670/IRJ.2020.102.12.038.
14. Напреенко М. Г. Флора и растительность верховых болот Калининградской области : дис. ... канд. биол. наук. Калининград, 2002.



15. Баймуратов Р. А., Напреенко М. Г., Королева Ю. В. Аккумуляционные способности мохообразных нарушенных торфяников (на примере карбонового полигона в Калининградской области) // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Т. 23, №4. С. ES4002. doi: 10.2205/2023es000873.
16. Antsiferova O., Napreenko M., Napreenko-Dorokhova T. Transformation of soils and mire community reestablishment potential in disturbed abandoned peatland: A case study from the Kaliningrad Region, Russia // Land 2023. Vol. 12. P. 1880. doi: 10.3390/land12101880.
17. European surveys of heavy metal accumulation in mosses. 2017. doi: <https://isrvegetation.ceh.ac.uk/ourscience/heavy-metals> (дата обращения: 04.09.2024).
18. Напреенко М. Г., Напреенко-Дорохова Т. В., Карелина В. И., Пеленс Е. Д. Мониторинг видового состава и эколого-ценотических характеристик сфагновых мхов на карбоновом полигоне «Росьянка» (Калининградская область) // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2022. №1. С. 73–87. EDN: MHDSQQ.
19. Савич-Любичука Л. И., Смирнова З. Н. Определитель сфагновых мхов СССР. Л, 1968.
20. Dierssen K. Bestimmungsschlüssel der Torfmoose in Norddeutschland. Mitt. d. Arbeitsgemeinschaft Geobotanik in Schleswig-Holstein und Hamburg. 1996. Bd. 50. S. 86.
21. Игнатов М. С., Игнатова Е. А. Флора мхов средней части европейской России // Арктоа. 2003. Vol. 11.
22. Hassel K., Kyrkjeeide M. O., Yousefi N. et al. Sphagnum divinum (sp. nov.) and S. medium Limpr. and their relationship to S. magellanicum Brid // Journal of Bryology. 2018. doi: 10.1080/03736687.2018.1474424.
23. Shaw A. J., Piatkowski B., Duffy A. M. et al. Phylogenomic structure and speciation in an emerging model: the *Sphagnum magellanicum* complex (Bryophyta) // New Phytologist. 2022. Vol. 236. P. 1497–1511. doi: 10.1111/nph.18429.
24. Koroleva Y., Napreenko M., Baymuratov R., Schefer R. Bryophytes as a bioindicator for atmospheric deposition in different coastal habitats (a case study in the Russian sector of the Curonian Spit, South-Eastern Baltic) // International Journal of Environmental Studies. 2019. Vol. 77, №1. P. 152–162. doi: 10.1080/00207233.2019.1594301.
25. Stafilov T., Šajin R., Barandovski L. et al. Moss biomonitoring of atmospheric deposition study of minor and trace elements in Macedonia // Air Quality, Atmosphere and Health. 2018. Vol. 11. P. 137–152. doi: 10.1007/s11869-017-0529-1.
26. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / под ред. Ю. Е. Саета : пер. с англ. Д. В. Гричук, Е. П. Янина. М., 1989.
27. Kempter H., Krachler M., Shotyky W., Zaccone C. Validating modelled data on major and trace element deposition in southern Germany using Sphagnum moss // Atmospheric Environment. 2017. Vol. 167. P. 656–664. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.037.
28. Nagajyoti P. C., Lee K. D., Sreekanth T. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // Environmental Chemistry Letters. 2010. Vol. 8, №3. P. 199–216. doi: 10.1007/s10311-010-0297-8.
29. Ryzhakova N. K., Rogova N. S., Borisenko A. L. Research of mosses accumulation properties used for assessment of regional and local atmospheric pollution // Environmental Research, Engineering and Management. 2014. Vol. 69, №3. P. 84–91. doi: 10.5755/j01.ere.m.69.3.5566.



30. Рогова Н. С., Рыжкова Н. К., Борисенко А. Л., Меркулов В. Г. Изучение аккумуляционных свойств мхов, используемых при мониторинге загрязнения атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 79.

Об авторах

Рашид Александрович Баймуратов – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: baimuratov_rashid@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8439-809X

SPIN-код: 2174-6464

Максим Геннадьевич Напреенко – канд. биол. наук, ведущ. науч. сотр. Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: maxnapr@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0889-7276

SPIN-код: 7955-3719

Арина Алексеевна Шангина – студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: shanginaarina@yandex.ru

R. A. Baymuratov, M. G. Napreenko, A. A. Shangina

ELEMENT ACCUMULATION IN BRYOPHYTES IN PEATLAND ECOSYSTEMS OF THE KALININGRAD REGION, RUSSIA

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Received 24 November 2024

Accepted 25 January 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-4

To cite this article: Baymuratov R. A., Napreenko M. G., Shangina A. A., 2025, Element accumulation in bryophytes in peatland ecosystems of the Kaliningrad region, Russia, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, № 1. P. 58 – 70. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-4.

The results of studying the accumulation capabilities of mosses in two peatland ecosystems with different levels of disturbance in the Kaliningrad region – on the Bolshoye bog and the Wittgiren peatland – are presented. The study focused on widely distributed species of mosses: Aulacomnium palustre, Polytrichum strictum, Sphagnum centrale, S. cuspidatum, S. fuscum, S. magellanicum, and S. squarrosum, as well as the reference species Pleurozium schreberi. Using X-ray fluorescence spectroscopy, the content of eight macro- and microelements (Mn, Zn, Ni, Fe, Br, Rb, Sr, and Ca) was determined. Statistically significant differences were found in the concentrations of Mn, Zn, Ni, Br, and Rb in the mosses. A high correlation was observed



between iron and calcium, which may indicate a common source of these elements entering the plants. The moss species *Aulacomnium palustre* and *Sphagnum centrale* were identified as having accumulation capabilities similar to the reference species *Pleurozium schreberi*.

Keywords: element accumulation, bryophyte, disturbed peatlands, biomonitoring, X-ray fluorescence spectroscopy, Sphagnum, Kaliningrad region

The authors

Rashid A. Baimuratov, PhD student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: baimuratov_rashid@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8439-809X

SPIN-code: 2174-6464

Dr Maksim G. Napreenko, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: maxnapr@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0889-7276

SPIN-code: 7955-3719

Arina A. Shangina, student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: shanginaarina@yandex.ru

УДК 543.645.6

С. Л. Тихонов^{1,2}, Н. В. Тихонова¹

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА,
АНТИОКСИДАНТНЫЕ СВОЙСТВА
И ВЛИЯНИЕ НОВОГО СИНТЕЗИРОВАННОГО ПЕПТИДА
НА ОТЛОЖЕНИЕ ЛИПИДОВ В КЛЕТКАХ**

71

¹ Уральский государственный аграрный университет,
Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

Поступила в редакцию 02.09.2024

Принята к публикации 21.10.2024

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-5

Для цитирования: Тихонов С.Л., Тихонова Н.В. Физико-химическая характеристика, антиоксидантные свойства и влияние нового синтезированного пептида на отложение липидов в клетках // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 71–81. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-5.

Разработан и синтезирован новый пептид CG-16 с последовательностью СНАЕСГААСКЕFCLEG. Проведены исследования по оценке его физико-химических характеристик, антиоксидантных свойств и влияния на отложение липидов в клетках в эксперименте in vitro. Установлено, что пептид CG-16 не содержит антигенных детерминант. Результаты его поиска на платформах PeptideAtlas, UniProt и базе национального центра биотехнологической информации NCBI свидетельствуют о том, что полученный пептид является уникальным. Прогнозирование основных физико-химических свойств пептида CG-16 по показателям молекулярной массы, количества акцепторов водородных связей, количества доноров водородных связей, количества колец, количества атомов в самом большом кольце, общего заряда, количества жестких связей, гибкости, топологической площади полярной поверхности, прогнозируемой растворимости, количества кислотных участков свидетельствуют, что исследуемый пептид может быть эффективно использован в качестве биологически активного вещества. Установлено, что пептид CG-16 обладает антиоксидантной активностью и способен уменьшать накопление липидов в клетке.

Ключевые слова: пептиды, физико-химические характеристики, антигенность, антиоксидантные свойства, клеточные липиды



Введение

Активные формы кислорода (далее – АФК), в том числе перекись водорода (H_2O_2), супероксид-анионы (O_2^-) и гидроксильный радикал (ОН), образуются в аэробных организмах, а их последующая обработка системой антиоксидантной защиты является очень сложным и сбалансированным процессом [1]. Избыток АФК нарушает гомеостаз системы антиоксидантной защиты клеток, что приводит к окислительному стрессу, при этом последствия нарушения окислительно-восстановительного баланса клетки приводят к повреждению молекул белков, липидов и нуклеиновых кислот [2]. Повреждающее действие избытка АФК может быть снижено с помощью внутриклеточных антиоксидантных ферментов, в частности, супероксиддисмутазой, глутатионпероксидазой и каталазой, а также некоторыми неферментативными антиоксидантами, например, глутатионом, витаминами С и Е [3]. Однако при воздействии сильных стрессовых факторов, таких как токсины и окислители, эндогенных антиоксидантов может быть недостаточно для противодействия разрушительному воздействию АФК. Снизить отрицательное влияние АФК позволяет потребление пищевых антиоксидантов [4–6].

72

В связи с этим растет интерес к лечебно-профилактическому применению нутрицевтиков или функциональных пищевых продуктов с антиоксидантными свойствами в качестве безопасных альтернатив лекарственным препаратам [7]. Особое внимание заслуживают биоактивные пептиды с антиоксидантными свойствами. Биопептиды представляют собой класс многофункциональных соединений, полученных из пищевых белков, обладающие множеством важных физиологически связанных биологических активностей, таких как антиоксидантное, гипотензивное и противовоспалительное действия [8].

Более того, было подтверждено, что биоактивные пептиды пищевого происхождения безопасны, усваиваются мягче и легче, чем синтетические лекарственные средства [9].

Одной из распространенных и прогрессирующих болезней, связанных с нарушением перекисного окисления липидов, является неалкогольная жировая болезнь печени (далее – НАЖБП), которая характеризуется отложением липидов, окислительным стрессом и апоптозом [10].

НАЖБП становится серьезной клинической и социальной проблемой из-за большой распространенности среди населения, страдающего ожирением [11]. Она способствует развитию ожирения, сахарного диабета 2 типа, дислипидемии и сердечно-сосудистых заболеваний. Хотя НАЖБП не является критическим заболеванием, постоянное наличие стеатоза в печени может привести к фиброзу печени, циррозу и печеночной недостаточности [12]. Функция печени связана с метаболизмом глюкозы, липидов и поддержания липидного гомеостаза. Избыточное потребление пищевых жиров приводит к увеличению содержания свободных жирных кислот в сыворотке крови, что ускоряет накопление триглицеридов в гепатоцитах и в дальнейшем способствует возникновению НАЖБП [13]. Следовательно, фармакологические вмешательства, направленные на улучшение метаболизма липидов в печени и окислительного стресса имеют большое значение для профилактики и лечения НАЖБП.



Хотя синтетические препараты доступны для лечения метаболических заболеваний, они часто сопровождаются нежелательными побочными эффектами. Из-за растет интерес к изучению натуральных продуктов пищевого происхождения для облегчения метаболических заболеваний. За последние 20 лет многочисленные исследования показали, что биоактивные пептиды пищевого происхождения могут положительно влиять на основные системы организма, особенно на сердечно-сосудистую, эндокринную и иммунную системы, и сводить к минимуму риск развития хронических заболеваний [14].

Цель — исследовать физико-химические, антиоксидантные свойства и влияние нового синтезированного пептида на отложение липидов в эксперименте *in vitro*.

Материал и методы исследования

В качестве объекта исследований был использован пептид с последовательностью CHAECGAACKFCLEG (условное название пептида CG-16), синтезированный методом твердофазного синтеза и очищен в компании Permics Co., Ltd (Сучжоу, Китай) до чистоты более 95 %.

Его антигенность (аллергенность) оценивали по программе <http://imed.med.ucm.es/Tools/antigenic.pl>.

Идентификацию пептида проводили на платформах PeptideAtlas, (<https://db.systemsbiology.net/sbeams/cgi/PeptideAtlas/Search>), UniProt, (<https://www.uniprot.org/tool-dashboard>) и на базе данных национального центра биотехнологической информации NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>).

Физические и химические характеристики пептида определяли с помощью платформы ProtParam (<https://web.expasy.org/protparam/>). Вычисленные параметры включают молекулярную массу, теоретический pI, аминокислотный состав, атомный состав, коэффициент экстинкции, расчетный период полураспада, индекс нестабильности, алифатический индекс и общее среднее значение гидропатичности.

Прогнозирование токсичности и выведения пептида проводили на платформе ADMET1 ab 3 (<https://admetlab3.scbdd.com/documentation/#/>).

Его антиоксидантную активность определяли тремя методами: по способности улавливать свободные радикалы DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) и ABTS (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate)), а также по восстанавливающей силе при взаимодействии с комплексом Fe (III)-2,4,6-трипиридил-*s*-триазин методом FRAP (ferric-reducing antioxidant power) согласно (Feduraev P. et al., 2022) с некоторыми модификациями.

При определении антиоксидантной активности по методу DPPH 20 мкл пептида или стандартного раствора смешивали с 300 мкл свежеприготовленного 0,1 мМ раствора 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила. Смесь инкубировали в темноте при комнатной температуре в течение 30 мин. Уменьшение оптической плотности по сравнению с контролем регистрировали при 515 нм.

Для определения антиоксидантной активности по методу ABTS предварительно готовили раствор ABTS-радикала. ABTS-радикал гене-



рировали смешиванием аликвот 7,0 мМ раствора АВТС и 2,45 мМ раствора персульфата калия. Раствор выдерживали в течение 16 ч в темном месте при комнатной температуре. Для проведения реакции к 300 мкл подготовленного раствора катион-радикала АВТС⁺ добавляли 20 мкл раствора пептида или стандарта. Оптическую плотность измеряли при 734 нм после инкубации смеси в течение 15 мин при 37°С в темноте.

При определении восстанавливающей силы пептидов использовали свежеприготовленный реактив FRAP, путем смешивания 10 частей 0,3 М ацетатного буфера (рН 3,6), одной части 10 мМ раствора 2,4,6-трипиридил-*s*-триазина в 40 мМ HCl и одной части водного 20 мМ раствора хлорида железа FeCl₃ × 6H₂O. Реакция запускалась смешиванием 300 мкл FRAP-реактива и 20 мкл исследуемого образца пептида или раствора стандарта. Время реакции составляло 10 мин при 37°С в темноте. Увеличение оптической плотности по сравнению с контролем регистрировали при 593 нм.

В качестве стандартного раствора во всех методах использовали раствор тролокса (6-гидрокси-2,5,7,8-тетраметилхроман-2-карбоновой кислоты) известной концентрации. Результаты анализов выражены в мМ эквивалентов тролокса (ммоль эквивалентов тролокса/л).

Все спектрофотометрические измерения проводили с использованием микропланшетного ридера CLARIOstar (BMG Labtech, Германия).

По данным [15], олеиновая и пальмитиновая кислоты индуцируют внутриклеточное отложение липидов в клетках HepG2.

По результатам исследований [13] избыток свободных жирных кислот попадает в печень, они вызывают нарушения липидного обмена в гепатоцитах, ускоряя развитие НАЖБП, поэтому в эксперименте по накоплению липидов в клетках была использована олеиновая и пальмитиновая кислота и клетки HepG2.

Для имитации стеатоза гепатоцитов клетки HepG2 (1 × 10⁵/мл) были посеяны в 6-луночные планшеты, после чего они подвергались воздействию 0,5 мМ смеси олеиновой и пальмитиновой кислот в соотношении 2:1 с добавлением или без добавления 5 мкг/мл исследуемого пептида и инкубировали в течение 24 ч.

Уровень внутриклеточных триглицеридов и общего холестерина измеряли с помощью наборов для анализа (Beuotime).

Данные представлены в виде среднего значения ± стандартная ошибка. Значение при $P < 0,05$ считалось достоверным.

Результаты

Несмотря на то что не существует безошибочного метода прогнозирования антигенных пептидов, имеется несколько правил, которым можно следовать, чтобы определить, какие пептидные фрагменты белка могут быть антигенными. На рисунке 1 представлены результаты оценки антигенности пептида CG-16.

Установлено, что пептид CG-16 не содержит антигенных детерминант, следовательно, он не антигенен. Его значение средней антигенной активности составляет 1,1 ед. (пептиды антигенны при значении более 1,3 ед. и наличии антигенных детерминант).



ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ АНТИГЕННЫЕ ПЕПТИДЫ

Results

Ваша последовательность состоит из 16 остатков
Средняя антигенная активность этого белка составляет 1,0948

Антигенный график последовательности

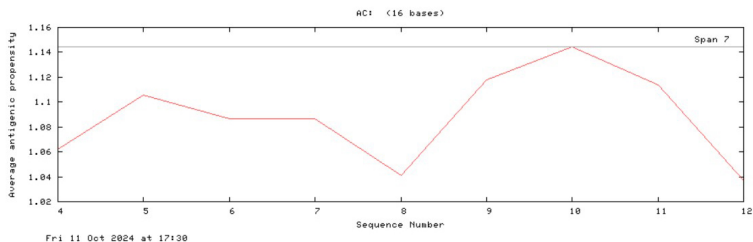


Рис. 1. Результаты оценки антигенности пептида CG-16

На рисунке 2 представлены результаты поиска пептида CG-16 на платформах PeptideAtlas, UniProt и в базе данных национального центра биотехнологической информации NCBI.

PeptideAtlas

CHAECGAACKFCLEG

Тип сборки: Human

В индексе для вашей поисковой строки не было найдено совпадений

UniProt BLAST Align Поиск пептидов Сопоставление идентификаторов SPARQL UniProtKB

Результаты работы инструмента

Ниже приведены результаты анализа вашего инструмента за последние 7 дней. Если у вас запущены задания Tools страницы, и по завершении задания вы получите уведомление.

Тип	Статус
ПОИСК ПЕПТИДОВ	выполнено (результаты не найдены)

NIH National Library of Medicine
National Center for Biotechnology Information

Протеин: Protein CHAECGAACKFCLEG

Виды: Настроить ...

Краткие сведения

Базы данных источников: Настроить ...

В Protein не был найден следующий термин: CHAECGAACKFCLEG

Ничего не найдено.

Рис. 2. Результаты поиска пептида CG-16 на платформах PeptideAtlas, UniProt и в базе данных национального центра биотехнологической информации NCBI



По данным, представленным на рисунке 2, совпадений пептида CG-16 с уже известными не установлено, следовательно он является уникальным.

С помощью платформы ProtParam проведено прогнозирование физико-химических характеристик пептида CG-16 и получены следующие результаты: количество аминокислот в пептиде — 16, молекулярная масса составляет 1670,91 Да, теоретическая изоэлектрическая точка (pI) находится на уровне 4,75, общее количество отрицательно заряженных остатков (Asp + Glu) равно 3, общее количество положительно заряженных остатков (Arg + Lys) равно 1, молекулярная формула: $C_{67}H_{103}N_{19}O_{23}S_4$, общее количество атомов — 216, предполагаемый период полувыведения — более 3,2 ч, пептид стабильный.

В таблице 1 представлены результаты прогнозирования его физико-химических свойств на платформе ADMET1 ab 3.

Таблица 1

Результаты прогнозирования физико-химических свойств пептида на платформе ADMET1 ab 3

Наименование показателя	Значение	Характеристика / результат
Молекулярная масса, Да	1669,64	До 2000 Да оптимально / оптимальное значение
Объем	1572,149	Нет данных оптимального значения
Плотность (Молекулярная масса / объем)	1,062	Нет данных оптимального значения
Количество акцепторов водородных связей (nHA), ед.	42,0	Оптимально: 0–42, исходя из мягкого правила, подобного лекарственному средству / оптимальное значение
Количество доноров водородных связей (nHD), ед.	24,0	Оптимально: 0–7, исходя из мягкого правила, подобного лекарственному средству / не является оптимальным
Количество колец (NRing), ед.	2,0	Оптимально: 0–6, исходя из мягкого правила, подобного лекарственному средству / оптимальное значение
Количество атомов, вовлеченных в самое большое системное кольцо, ед.	6,0	Оптимально: 0–18, исходя из мягкого правила, подобного лекарственному средству / оптимальное значение
Общий заряд	-1,75	Оптимальный: -4 до 4, исходя из мягкого правила, подобного лекарственному средству / оптимальное значение
Количество негибких связей, в отличие от вращающихся связей (nRig), ед.	30,0	Оптимально: 0–30, исходя из мягкого правила, подобного лекарственному средству / оптимальное значение
Гибкость (nRot / nRig), ед.	2,3	Оптимально: 1–5 / оптимальное значение
Топологическая площадь полярной поверхности; сумма табличных значений площади полярных фрагментов (TPSA), ед.	666,42	Оптимально: 0–740, согласно правилу Вебера / оптимальное значение

Наименование показателя	Значение	Характеристика / результат
Прогнозируемая растворимость соединения, выражаемая в виде логарифма ($\log P$), моль/л	1,47	Подходящими считаются соединения в диапазоне 0–3 логарифмических моль/л / оптимальное значение
$\log D7.4$, моль/л	0,067	Подходящими считаются соединения в диапазоне 1–3 логарифмических молей/л / оптимальное значение
Количество кислотных участков, меньшие значения указывают на более высокую кислотность (рKa (кислота)), ед.	1,382	Оптимально при значении ниже базового / оптимальное значение
рKa (базовый)	5,199	Оптимально при выше значения кислотных остатков / оптимальное значение
Температура плавления, °C	227,724	Нет данных
Температура кипения, °C	351,332	Нет данных

Результаты прогнозирования основных физико-химических свойств пептида CG-16 по показателям молекулярной массы, количества акцепторов водородных связей, количества доноров водородных связей, количества колец, количества атомов в самом большом кольце, общего заряда, количества жестких связей, гибкости, топологической площади полярной поверхности, прогнозируемой растворимости, количества кислотных участков позволяют свидетельствовать, что исследуемый пептид может быть эффективно использован в качестве биологически активного вещества.

Проведен трехфазный синтез пептида CG-16. На рисунке 3 представлена хроматограмма, а на рисунке 4 — масс-спектр исследуемого пептида.

Chromatogram

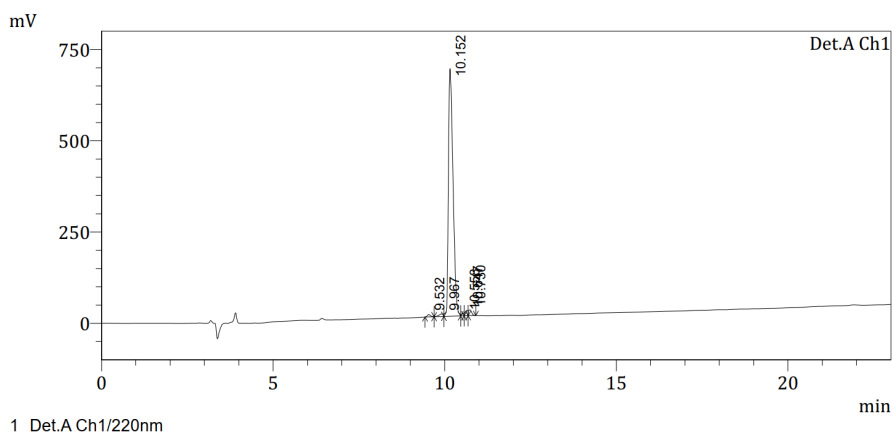


Рис. 3. Хроматограмма пептида CG-16

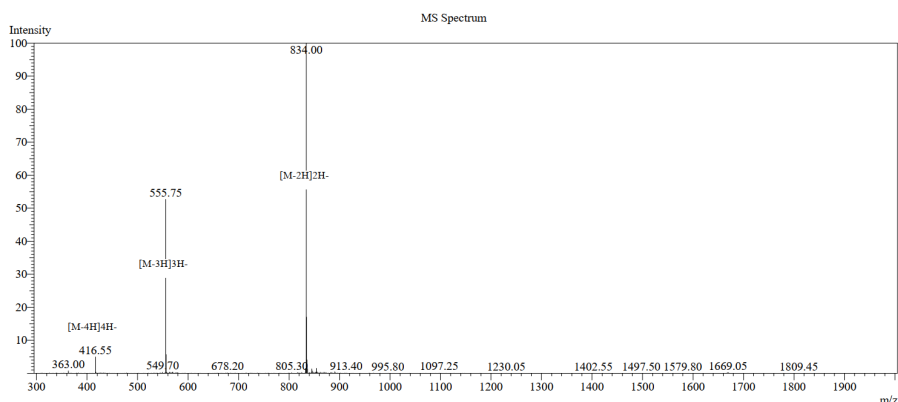


Рис. 4. Масс-спектр пептида CG-16

Хроматограмма и масс-спектр свидетельствуют о том, что синтезированный пептид по количеству и последовательности аминокислот, молекулярной массы соответствует прогнозируемым значениям.

Результаты исследований антиоксидантной активности (АОА) пептида представлены в таблице 2.

Таблица 2

Антиоксидантная активность (АОА) пептида CG-16, ммоль экв. тролокса/л

Метод определения	DPPH	ABTS	FRAP
Значение	6,71±0,03	7,94±0,01	5,82±0,04

Пептид CG-16 обладает антиоксидантной активностью. При определении методом ABTS она оказывается более высокой и составляет $7,94 \pm 0,01$ ммоль экв. тролокса/л. По сравнению с методами DPPH и FRAP это выше на 18,3 и 36,4 % соответственно.

Проведено исследование по влиянию пептида на отложение липидов в клетках HepG2. Установлено, что в них под воздействием олеиновой и пальмитиновой кислот в присутствии исследуемого пептида уровень внутриклеточных триглицеридов и общего холестерина ниже в 2,4 и 3,7 раза соответственно ($P < 0,05$) по сравнению с клетками без пептида. Наличие пептида значительно снизило внутриклеточный уровень триглицеридов и холестерина по сравнению с клетками, получавшими свободные жирные кислоты и не получавшими пептид, что указывает на способность пептида CG-16 уменьшать накопление липидов.

Заключение

В результате исследований разработан и синтезирован пептид CG-16. Предварительно спрогнозированы его физико-химические характеристики и антигенность, позволяющие установить, что пептид пригоден для синтеза, не аллергенен, обладает необходимыми свойствами для обеспечения его заданной биологической активности. Подтверждены



антиоксидантные и предупреждающие отложения липидов свойства пептида в эксперименте *in vitro*. Но вместе с тем для внедрения в производства пептида и использования его в качестве функционального ингредиента в составе пищевой продукции специализированного и профилактического назначения необходимо подтверждение полученных результатов в доклинических и клинических исследованиях.

Список литературы

1. Liochev S.I. Reactive oxygen species and the free radical theory of aging // Free Radic. Biol. Med. 2013. Vol. 60. P. 1–4. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2013.02.011.
2. Giorgi C., Marchi S., Simoes I.C.M. et al. Mitochondria and reactive oxygen species in aging and age-related diseases // Int. Rev. Cell. Mol. Biol. 2018. Vol. 340. P. 209–344. doi: 10.1016/bs.ircmb.2018.05.006.
3. Dobrovolny J., Smrcka M., Bienertova-Vasku J. Therapeutic potential of vitamin E and its derivatives in traumatic brain injury-associated dementia. Neurol. Sci. 2018. Vol. 39. P. 989–998. doi: 10.1007/s10072-018-3398-y.
4. Olagunju A.I., Omoba O.S., Enujiughu V.N. et al. Antioxidant properties, ACE/renin inhibitory activities of pigeon pea hydrolysates and effects on systolic blood pressure of spontaneously hypertensive rats // Food Sci. Nutr. 2018. Vol. 6. P. 1879–1889. doi: 10.1002/fsn3.740.
5. Hu X.M., Wang Y.M., Zhao Y.Q. et al. Antioxidant peptides from the protein hydrolysate of monkfish (*Lophius litulon*) muscle: Purification, identification, and cytoprotective function on hepG2 cells damage by H₂O₂ // Mar. Drugs. 2020. Vol. 18. P. 153. doi: 10.3390/md18030153.
6. Davis D.W., Tallent R., Navalta J.W. et al. Effects of acute cocoa supplementation on postprandial apolipoproteins, lipoprotein subclasses, and inflammatory biomarkers in adults with type 2 diabetes after a high-fat meal // Nutrients. 2020. Vol. 12. P. 1902. doi: 10.3390/nu12071902.
7. Cullen A.E., Centner A.M., Deitado R. et al. The impact of dietary supplementation of whole foods and polyphenols on atherosclerosis // Nutrients. 2020. Vol. 12. P. 2069. doi: <https://doi.org/10.3390/nu12072069>.
8. Zheng Y., Wang X., Zhuang Y. et al. Isolation of novel ACE-inhibitory and antioxidant peptides from quinoa bran albumin assisted with an *in silico* approach: Characterization, *in vivo* antihypertension, and molecular docking // Molecules. 2019. Vol. 24. P. 4562. doi: 10.3390/molecules24244562.
9. Gong P.X., Wang B.K., Wu Y.C. et al. Release of antidiabetic peptides from *Stichopus japonicus* by simulated gastrointestinal digestion // Food Chem. 2020. Vol. 315. P. 126273. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126273>.
10. Awad A.S. M., Haleem E.N., El-Bakly W.M., Sherief M.A. Thymoquinone alleviates nonalcoholic fatty liver disease in rats via suppression of oxidative stress, inflammation, apoptosis // Naunyn Schmiedebergs Arch. Pharmacol. 2016. Vol. 389. P. 381–391. <https://doi.org/10.1007/s00210-015-1207-1>.
11. Zhao W.J., Bian Y.P., Wang Q.H. et al. Blueberry-derived exosomes-like nanoparticles ameliorate nonalcoholic fatty liver disease by attenuating mitochondrial oxidative stress // Acta Pharmacol. 2021. Sin. Vol. 43. P. 645–658. <https://doi.org/10.1038/s41401-021-00681-w>.



12. Zhang Z., Zong C., Jiang M.H. et al. Hepatic HuR modulates lipid homeostasis in response to high-fat diet // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. P. 3067. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16918-x>.

13. Xu D.X., Guo X.X., Zeng Z. et al. Puerarin improves hepatic glucose and lipid homeostasis in vitro and in vivo by regulating the AMPK pathway // *Food Funct*. 2021. Vol. 12. P. 2726–2740. <https://doi.org/10.1039/D0FO02761H>.

14. Manikkam V., Vasiljevic T., Donkor O.N., Mathai M.L. A review of potential marine-derived hypotensive and anti-obesity peptides // *Crit. Rev Food Sci. Nutr*. 2016. Vol. 56. P. 92–112. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.753866>.

15. Willebrords J., Pereira I.V. A., Maes M. et al. Strategies, models and biomarkers in experimental non-alcoholic fatty liver disease research // *Prog. Lipid Res*. 2015. Vol. 59. P. 106–125. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2015.05.002>.

80

Об авторах

Сергей Леонидович Тихонов — д-р техн. наук, проф., Уральский государственный аграрный университет, Россия; Уральский государственный лесотехнический университет, Россия.

E-mail: tihonov75@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4863-9834

SPIN-код: 4649-8616

Наталья Валерьевна Тихонова — д-р техн. наук, проф., Уральский государственный аграрный университет, Россия.

E-mail: tihonov75@bk.ru

ORCID: 0000-0001-5841-1791

SPIN-код: 1303-8180

S. L. Tikhonov^{1,2}, N. V. Tikhonova¹

PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS, ANTIOXIDANT PROPERTIES AND THE EFFECT OF THE NEWLY SYNTHESIZED PEPTIDE ON LIPID DEPOSITION IN CELLS

¹ Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

² Ural State Forestry Engineering University, Ekaterinburg, Russia

Received 02 September 2024

Accepted 21 October 2024

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-5

To cite this article: Tikhonov S. L., Tikhonova N. V., 2025, Physicochemical characteristics, antioxidant properties and the effect of the newly synthesized peptide on lipid deposition in cells, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 71–81. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-5.

A novel peptide, CG-16, with the sequence CHAECGAACKFCLEG, was designed and synthesized. Studies were conducted to assess its physicochemical properties, antioxidant activity, and effects on lipid deposition in cells in an in vitro experiment. It was established that



the CG-16 peptide does not contain antigenic determinants. A search across the PeptideAtlas, UniProt, and the National Center for Biotechnology Information (NCBI) databases confirmed the uniqueness of the synthesized peptide. The prediction of key physicochemical properties of CG-16, including molecular weight, the number of hydrogen bond acceptors and donors, the number of rings, the number of atoms in the largest ring, overall charge, rigidity, flexibility, topological polar surface area, predicted solubility, and the number of acidic sites, suggests that this peptide could be effectively used as a biologically active compound. Furthermore, CG-16 demonstrated antioxidant activity and the ability to reduce lipid accumulation in cells.

Keywords: peptides, physico-chemical characteristics, antigenicity, antioxidant properties, cellular lipids

The authors

Prof. Sergey L. Tikhonov, Ural State Agrarian University, Russia; Ural State Forest Engineering University, Russia.

E-mail: tihonov75@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4863-9834

SPIN-код: 4649-8616

Prof. Natalya V. Tikhonova, Ural State Agrarian University, Russia.

E-mail: tihonov75@bk.ru

ORCID: 0000-0001-5841-1791

SPIN-код: 1303-8180

Абдул-Галил Ахмед Али, О. В. Кригер

ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Национальный исследовательский университет ИТМО,

Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 24.06.2024 г.

Принята к публикации 22.11.2024 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-6

82

Для цитирования: *Абдул-Галил Ахмед Али, Кригер О. В.* Получение и применение бактериальной целлюлозы // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 82–102. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-6.

*Бактериальная целлюлоза (далее – БЦ) представляет собой биоматериал, вырабатываемый некоторыми бактериями и обладающий уникальными свойствами, который отличается от растительной целлюлозы чистотой, высокой степенью кристалличности, отличной биосовместимостью, высокой влагоудерживающей способностью. Благодаря этим преимуществам БЦ находит все большее применение в различных промышленных сферах. Получение БЦ в промышленных масштабах ограничено, в частности, высокой стоимостью питательной среды. В обзоре представлен анализ научных сведений и официальных данных о свойствах и способах повышения продуктивности БЦ для применения на пищевых производствах в качестве пищевой добавки и пищевой упаковки. Поиск научной литературы осуществлен на английском и русском языках по базам данных Scopus, ScienceDirect, PubMed и eLIBRARY.RU. Анализ научных сведений и официальных данных показал, что физические факторы (температура, pH, источник углерода, условия культивирования) питательной среды влияют на выход и свойства БЦ. Использование сельскохозяйственных и пищевых отходов в качестве питательной среды увеличивает продуктивность штаммов *Komagataeibacter xylinus*. Комбинирование БЦ с другими компонентами (биологически активными веществами, металлами, пробиотиками, полимерами, антибиотиками и т. д.) приведет к улучшению функциональных свойств БЦ и расширит области ее применения в пищевой промышленности в качестве заменителя жира, для получения искусственного мяса, иммобилизации ферментов, создания биоразлагаемых упаковочных материалов.*

Ключевые слова: бактериальная целлюлоза, биосинтез БЦ, субстраты для культивирования, применение БЦ

Введение

Целлюлоза является самым распространенным биополимером на земле, содержащимся в конопле, льне или хлопке сосудистых растений [12]. В ее состав входят мономеры глюкозы, соединенные между собой β



(1–4) гликозидными связями с образованием длинных цепей и высокой степенью полимеризации. В связи с повышенным спросом на растительную целлюлозу и увеличением потребления древесины в качестве ее источника, обезлесение происходит во всем мире и создает глобальные экологические проблемы [24].

Однако целлюлоза может быть получена из организмов (таких как, микроорганизмы, водоросли и грибы) или с помощью ферментативных синтезов *in vitro*, начинающихся с фторида целлобиозы или химического синтеза из глюкозы путем полимеризации бензилированных и пивалоилированных производных по замкнутому циклу. Наиболее примечательными продуцентами бактериальной целлюлозы (далее — БЦ) являются непатогенные бактерии рода *Komagateibacter*, такие как *K. xylinus* (ранее назывались *Acetobacter*).

K. xylinus синтезируют внеклеточную целлюлозу или бактериальную наноцеллюлозу, образующую биопленку различной толщины с целью поддержания вблизи поверхности высокой насыщенности колоний кислородом. Пленка служит защитным барьером от высыхания, естественных врагов и радиации [23]. По сравнению с растительной целлюлозой и другими ее формами БЦ обладает особыми и уникальными свойствами, зависящими от условий культивирования.

Она имеет высококристаллическую наноструктуру, высокую чистоту (отсутствие лигнина и гемицеллюлозы) и наибольшую степень полимеризации. Вышеупомянутые свойства БЦ делают ее перспективной альтернативой целлюлозе растительного происхождения для конкретных применений в биомедицине, косметике, высококачественных акустических диафрагмах, производстве бумаги, пищевой промышленности и других областях.

Модификация БЦ путем введения других компонентов, таких как полимеры, армирующие агенты и активные соединения, приводит к получению функциональных полимеров с новыми свойствами, расширяющими применение БЦ в промышленных областях.

Однако производство БЦ на синтетических средах с различными источниками углерода и факторами роста, которые обычно добавляются в виде дрожжевого экстракта и пептона, является дорогостоящим. Таким образом, поиск недорогого сырья, содержащего большое количество сахаров, в качестве субстратов для производства БЦ имеет большое значение.

Цель данной статьи — выявление факторов получения БЦ при разных условиях культивирования за счет увеличения выхода продукта для дальнейшего применения в технологических и промышленных областях.

Материалы и методы исследования

Поиск осуществлен по базам данных Scopus, Web of Science, SEMANTIC SCHOLAR и eLIBRARY.RU на русском и английском языках. Поиск был ограничен рецензируемыми статьями в академических журналах и включал исследовательские и обзорные статьи, соответствовавшие тематике исследования.



Результаты исследования и их обсуждение

Свойства БЦ зависят от ряда факторов, таких как условия культивирования, тип микроорганизмов и состав питательной среды. Эти факторы оказывают сильное влияние на свойства полимера, такие как размер, кристаллизация, степень полимеризации или гигроскопичность.

Благодаря ориентации гидроксильных групп целлюлоза обладает как гидрофобными, так и гидрофильными свойствами. Хотя бактериальная целлюлоза химически идентична растительной, она также имеет различие по некоторым критериям: длине, кристаллизации, степени полимеризации, пропорции алломорфов I_α и I_β , высокой чистоте (не содержит лигнин и гемицеллюлозу), модулю Юнга с высокой прочностью на разрыв (> 2 ГПа), хорошей биосовместимостью и т. д. (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики бактериальной и растительной целлюлозы

Критерии	Растительная целлюлоза	Бактериальная целлюлоза
Состав	Целлюлоза, лигнин, гемицеллюлоза	Чистая целлюлоза
Кристалличность, %	44 – 65	80
Степень полимеризации	300 – 10000	14000 – 16000
Общая площадь поверхности, м ² /г	< 10	> 150
Влагосвязывающая способность, %	25 – 35	> 95
Относительная гидрофильность	20 – 30	40 – 50

Сложность структурной организации БЦ делает ее нерастворимой во многих растворителях (как в воде, так и в обычных органических растворителях, а также устойчивой к ферментативному и химическому гидролизу) и способствует высокой степени кристалличности [12]. БЦ является высокогидрофильным полимером благодаря многочисленным гидроксильным группам в молекуле глюкозы, может впитывать и долго удерживать огромное количество воды, в 200 раз превышающее собственную массу. Эти свойства, вероятно, благоприятствуют синергетическим и последовательным стадиям набухания субстрата, доступности ферментов гидролиза, а также позволяют наносить жидкие лекарственные препараты и биологически активные соединения на раневой перевязочный материал на основе БЦ.

Структурное расположение волокон БЦ обуславливает механические свойства, отличающиеся от свойств целлюлозы растительного происхождения, в том числе более высокую степень кристалличности (84 – 89 %). БЦ производится в чистом виде, без лигнина, гемицеллюлозы, пектина или любых других соединений, присутствующих в растительной целлюлозе, и не содержит компонентов животного происхождения, поэто-



му процесс очистки очень простой и недорогой [12]. БЦ в виде пленки может быть синтезирована любой формы и размера в зависимости от типа культуры, условий культивирования и вида микроорганизмов.

БЦ имеет уникальные физические и механические свойства, которых нет у других биоматериалов, о чем упоминалось ранее. Она также обладает ультратонкими волоконными сетями с порами переменной геометрии, способностью формироваться в различные структуры и может подвергаться физическим и химическим модификациям.

Макроструктура целлюлозы зависит от условий культивирования. В статической культуре она образуется на границе раздела воздуха / жидкости и среды, а встряхивание культуры приводит к диспергированию целлюлозных клубочков в жидкости. В статических условиях формируются трехмерные структуры БЦ в полупрозрачной, желатиновой, переплетенной и нановолокнистой сети линейных полисахаридных полимеров.

Подобно растительной целлюлозе, в структуре БЦ также имеются как кристаллические, так и некристаллические участки. Поскольку БЦ обладает высокой кристаллическостью, кристаллические участки являются основным компонентом ее структуры с короткими неупорядоченными участками в виде интервалов, что, вероятно, объясняется как высокой механической прочностью, так и гибкостью БЦ. Кроме того, ее значительная механическая прочность обусловлена линейными цепочками целлюлозы и сильной сплоченностью между макромолекулами.

Продуценты БЦ. Выбор штаммов бактерий, используемых для синтеза целлюлозы, является основным фактором, связанным с увеличением выхода БЦ и получением продукта со специфическими свойствами.

Целлюлозопродуцирующая бактерия была впервые описана в 1886 г. А. Дж. Брауном, который идентифицировал ее, изучая ферментацию, и назвал *Bacterium xylinum*. Однако как бактерия, продуцирующая уксусную кислоту, этот микроорганизм позже был переименован в *Acetobacter xylinum*. В настоящее время эта бактерия называется *Gluconacetobacter xylinus* или *Komagataibacter xylinus* и классифицируется как род *Gluconacetobacter*, один из 29 родов семейства *Acetobacteraceae*.

Недавние исследования показали, что целлюлоза может быть синтезирована различными бактериями, включая грамотрицательные виды, такие как *Acetobacter*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Alcaligenes*, а также грамположительные виды, такие как *Sarcina ventriculi*.

K. xylinus представляет собой грамотрицательную палочковидную бактерию без жгутиков, поэтому она неподвижна. По отношению к потреблению кислорода является строго аэробом, и поэтому во многих случаях она присутствует на границе раздела воздух-среда, где ее присутствие можно легко обнаружить благодаря образованию целлюлозной пленки или пелликулы [19].

K. xylinus не единственный вид среди уксуснокислых бактерий, обладающий огромным потенциалом для производства целлюлозы, поскольку другие виды, такие как *Komagataibacter hansenii*, *Komagataibacter medellinensis*, *Komagataibacter nataicola*, *Komagataibacter oboediens*, *Komagataibacter rhaeticus*, *Komagataibacter saccharivorans* и *Komagataibacter pomaceti*, были охарактери-

зованы как сильные продуценты целлюлозы и обычно встречаются в природе на гниющих фруктах и в различных нишах, где зафиксирован углерод в виде сахаров или алкоголя [26].

В настоящее время выделено большое количество продуцентов БЦ рода *Komagataeibacter*, в том числе из симбиотической культуры дрожжевых и уксуснокислых бактерий, еще называемой «чайный гриб», или ферментированный напиток, или комбуча, которая является источником продуцентов БЦ например культур *Komagataeibacter rhaeticus* P 1463, *Komagataeibacter sucrofermentans* H-110, *Komagataeibacter hansenii* C-110 (B-12950), обладающих высокой продуктивностью и способных синтезировать пленку бактериальной целлюлозы на синтетических средах до 8,2–9,5 г/л [4]. Штамм *Komagataeibacter* JF2, синтезирующий пленки с высокой степенью кристалличности, выделен из винного уксуса. Еще многие штаммы выделены из фруктового сока, сока цитрусовых [17]. Г. Нагметова и А. Курманбаев выделели 17 целлюлозопродуцирующих бактерий, используя плоды винограда разных сортов и комбучу [21].

K. xylinus характеризуется наивысшей эффективностью синтеза целлюлозы, способностью потреблять различные источники углерода и является непатогенным для человека. В течение одного часа эта бактерия преобразует 108 молекул глюкозы в цепочку целлюлозы.

Производство БЦ обычно протекает на среде Hestrin-Schramm, состоящий из глюкозы (2%), дрожжевого экстракта (0,5%), пептона (0,5%), Na_2HPO_4 (0,27%), лимонной кислоты (0,115%). При этом глюкоза служит источником углерода, пептон и дрожжевой экстракт действуют как источники азота [22].

БЦ может быть получена двумя способами культивирования: статической ферментацией и ферментацией с перемешиванием, что приводит к разнице в морфологии и механических свойствах [22] (рис. 1.).

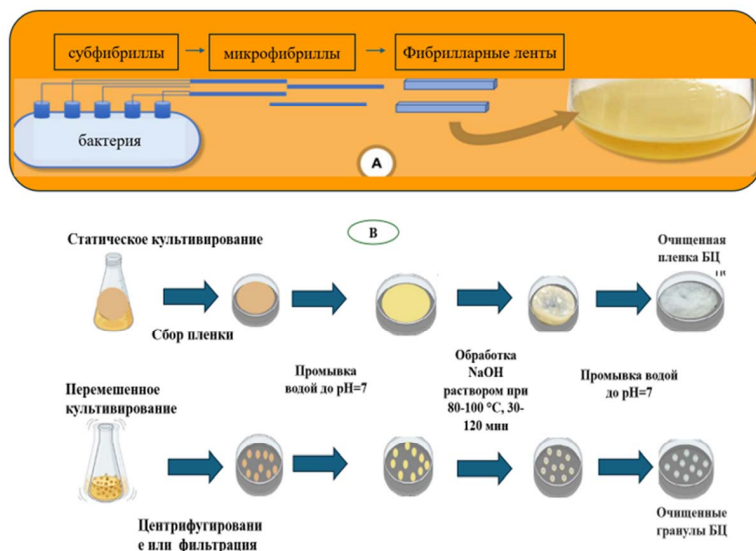


Рис. 1. А – биосинтез; В – процессы получения конечного продукта (чистая бактериальная целлюлоза)



При статической ферментации БЦ образуется в виде пленки на границе раздела воздуха / жидкости и питательной среды. Такой вид БЦ предпочтительнее использовать для производства продуктов, требующих фиксированной структуры, такого как ната-де-коко. В процессе ферментации с перемешиванием БЦ образуется в питательной среде в виде гранул, что способствует образованию устойчивых суспензий.

Очистка БЦ. По сравнению с растительной целлюлозой, очистка БЦ проста и недорога, поскольку в ней не содержатся лигнин и другие молекулы. Процесс очистки БЦ от бактериальных клеток и остатков питательных и метаболитических веществ питательной среды включает три этапа: (1) промывание пленки или гранул БЦ дистиллированной водой до нейтральной реакции; (2) обработку пленки БЦ щелочным раствором (0,1M NaOH) при 100 °С в течение 15 – 20 мин с целью отбеливания бактериальной целлюлозы от бактериальных клеток и красящих компонентов питательной среды; (3) промывание БЦ дистиллированной водой до pH = 7. Процесс повторится 3 раза для получения очищенной БЦ.

Ученые разработали новый способ очистки БЦ, позволяющий сократить продолжительность данного процесса и уменьшить энергозатраты. В этом методе удаление клеток бактерий и компонентов питательной среды осуществляется путем обработки раствором перманганата калия с концентрацией 0,1 – 10,0 % [2].

Влияние факторов внешней среды на биосинтез и свойства БЦ. Основными параметрами окружающей среды, влияющими на рост бактерий, продуцирующих целлюлозу, и биосинтез БЦ, являются состав питательной среды, pH, температура и содержание растворенного кислорода. Микроорганизмы быстро реагируют на эти факторы с точки зрения индукции и подавления синтеза белка и изменений в морфологии клеток [18] (рис. 2).



Рис. 2. Факторы, оказывающие влияние на производство БЦ

Состав питательной среды – один из ключевых факторов, влияющих на рост микроорганизмов и выход БЦ. Двумя основными компонентами среды, жизненно важными для роста, являются источники углерода и азота. Для увеличения производства БЦ были предложены различные источники углерода, включая моносахариды, олигосахариды, органические кислоты и спирты.

При производстве БЦ образуются другие побочные продукты, такие как глюконовая кислота и др. Они могут снизить выход БЦ. Например, глюконовая кислота уменьшает pH питательной среды [1].



В большинстве случаев глюкоза оказалась лучшим источником энергии для бактерий. Кроме того, она может быть непосредственно использована в качестве прекурсора для сборки глюкозных звеньев в целлюлозу, но при повышении начальной концентрации глюкозы выход БЦ в питательной среде уменьшался, так как глюкоза метаболизируется в галогеновую кислоту [1].

С.-С. Ван и соавторы недавно доказали, что использование фруктозы дает более высокий выход целлюлозы по сравнению с другими источниками углерода, в том числе с глюкозой [29].

Производство целлюлозы происходит в присутствии различных типов прекурсоров, включая гексаноат, гексозы, трехуглеродистые соединения пируват, дигидроксиацетон, пируват и глицерин, наряду с четырехуглеродистыми соединениями, такими как дикарбоновая кислота, которая связана с цитратным циклом [16].

Выход БЦ также может быть улучшен включением в питательную среду таких добавок, как глицерин, агар, ксантин, альгинат натрия, этанол, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), аскорбиновая кислота [18].

Этанол выполняет различные функции, поскольку он действует как источник энергии для выработки АТФ и стимулирует скорость роста бактерий, одновременно повышая продуктивность из-за окислительного стресса, когда используется в качестве основного источника углерода для производства БЦ. В противном случае при концентрации, превышающей 1 %, было отмечено ингибирование производства целлюлозы [1].

Уксусная кислота вмешивается в процесс биосинтеза, поскольку она реагирует как мономерный субстрат во время реакции полимеризации глюкозы в целлюлозу. Однако более высокие уровни уксусной кислоты могут подавлять рост клеток и становиться неэффективными в сочетании с избыточными концентрациями этанола. Источник углерода, используемый для культивирования продуцентов БЦ, влияет на следующие ее свойства: водоудерживающую способность, площадь поверхности, пористость, степень полимеризации, молекулярную массу, показатель кристалличности, средний размер кристаллитов, собственная вязкость, механических свойств и т. д. [26].

Существует много молекул, влияющих на кристаллический полиморф, индекс кристалличности, I_a целлюлозы и размер БЦ, синтезируемой штаммами *G. xylinus*, такие как лигносульфонат, карбоксиметилцеллюлоза, ксилоглюкан, 2,6-дихлор нитробензонитрил [16].

Температура. Одним из наиболее важных параметров является температура, так как она может регулировать характер адаптации организма для выживания, влияя на нормальную гомеостатическую физиологию. Высокие температуры вызывают денатурацию компонентов питательной среды, тогда как низкие замедляют клеточный метаболизм, обеспечивая небольшое количество энергии для развития клеток.

Бактерии, продуцирующие целлюлозу, могут расти при температуре от 25 до 30 °С, тогда как 28 °С — оптимальная температура для биосинтеза БЦ бактериями *Acetobacter xylinum* [33]. Для *Acetobacter senegalensis* MA1 требовалась более высокая температура по сравнению с другими бактериями — 33,5 °С.



Температура высушивания полимера на этапе очистки оказывает значительное влияние на его прочность. Многие авторы сравнивали качество полимера, высушенного при 25 и 105 °С, и обнаружили, что предел прочности при растяжении целлюлозы, высушенной при 25 °С, составлял 17,5 МПа и был в 15 раз выше, чем прочность целлюлозы, высушенной при более высокой температуре [18].

Водородный показатель (рН) является еще одним важным фактором в контроле окислительной ферментации при производстве БЦ. Оптимальный уровень рН питательной среды для роста бактерий и производства БЦ зависит от конкретного используемого штамма бактерий, но обычно находится в диапазоне 4 – 7 [18].

Экспериментальные наблюдения показали, что требуемый рН для роста продуцента бактериальной целлюлозы составляет 5,5 для *Acetobacter xylinum* [14] и 6,0 для *Komagataeibacter spp.* [31].

Два продукта из БЦ (**Biofilm[®]** и **Gengiflex[®]**) получены при кислотных условиях примерно между 4 и 4,5, что позволило избежать загрязнения среды во время культивирования БЦ [16].

Было отмечено, что показатель рН питательной среды может со временем снижаться из-за накопления вторичных метаболитов, таких как глюконовые, уксусные или молочные кислоты, образующиеся в результате потребления сахаров и источников азота продуцентами БЦ [1].

Аэрирование среды. Поскольку *Komagataeibacter xylinus* (продуценты БЦ) являются облигатными аэробами, содержание растворенного кислорода в питательной среде играет важную роль в метаболизме клетки, так же как выход и качество БЦ зависит от содержания растворенного кислорода.

Авторы определили, что высокий уровень растворенного кислорода в питательной среде приведет к увеличению концентрации глюконовой кислоты. Однако с другой стороны, низкое содержание кислорода препятствует росту бактерий и образованию БЦ. Максимальный выход БЦ получен при 10 %-ной концентрации растворенного кислорода.

Концентрацию растворенного кислорода в питательной среде можно опосредованно изменять с помощью скорости перемешивания, поэтому при культивировании в статических условиях выход БЦ меньше, чем при перемешивании, которое улучшает доставку кислорода к бактериям [1].

БЦ, полученная в перемешиваемой культуре, имеет более низкую степень полимеризации, меньшую кристалличность, высокое содержание целлюлозы I_{β} , низкий модуль Юнга, более высокую влагоудерживающую способность и вязкость суспензии по сравнению с БЦ, полученным в статической культуре.

Обработка целлюлозы раствором гидроксида натрия (NaOH) и раствором гипохлорита натрия (NaClO) увеличивает модуль упругости даже до 30 Гпа.

Производство БЦ на ферментативных средах из сельскохозяйственных и промышленных отходов. Из-за высокой себестоимости питательной среды HS, получение БЦ в промышленных масштабах ограни-



чено. В последние годы поиск экономически эффективных источников питательных веществ остается основой для снижения затрат на производство БЦ в промышленных целях.

Множество сельскохозяйственных и пищевых отходов, усваивающихся бактериями в качестве различных источников углерода и азота, такие как свекловичная меласса, апельсиновый, ананасовый, томатный соки и гидролизат пшеничной соломы, увеличивают выход БЦ, снижают издержки производства и улучшают экологическую обстановку [3].

Разработка питательной среды из сельскохозяйственных и промышленных отходов осуществляется при помощи химических и биотехнологических процессов: **предварительной обработки и гидролиза**.

Предварительная обработка различных видов отходов является важным шагом производства БЦ. Для нее были разработаны различные физические (измельчение и гидропиролиз) и химические (воздействие кислотой, щелочью, озоном) методы, обеспечивающие изменение размера, химического состава биомасс, оптимизируя условия для второго этапа – гидролиза. Эти методы должны отвечать следующим требованиям: увеличивать выход сахара или способность к последующему образованию сахаров путем ферментативного гидролиза, а также быть экономически эффективными.

Гидролиз – основной этап производства БЦ из сред на основе сельскохозяйственных и промышленных отходов, который позволяет конверсию обработанных отходов до сахаров, образующихся при получении БЦ с помощью штаммов-продуцентов до БЦ. Эффективность процесса гидролиза зависит от двух факторов: предварительной обработки и вида гидролиза (кислотного или ферментативного). При ферментативном гидролизе ферментам требуются определенные условия (рН и температура) для превращения комплексных молекул в простые, которые в противном случае могут быть усвоены микроорганизмом для производства БЦ. Наиболее распространенной кислотой для засахаривания отходов в производстве БЦ является разбавленная серная кислота.

В ряде исследований, представленных в таблице 2, акцентируется внимание на применении недорогих питательных сред, основанных на сельскохозяйственных и пищевых отходах, для синтеза бактериальной целлюлозы.

Таблица 2

Сравнительный анализ выхода БЦ, полученной на синтетической среде Hestrin-Schramm и на средах из различных сельскохозяйственных и промышленных отходов

Сельскохозяйственные отходы	Предобработка	Гидролиз	Выход (г/л)		Источник
			HS	CO	
Карагана коршинский	Гидротермальная, NaOH и этилендиамин	Ферментативный (15 FPU) Cellic CTec2 и (9 U) Cellic HTec2	3,0	4,6	[10]



Сельскохозяйственные отходы	Предобработка	Гидролиз	Выход (г/л)		Источник
			НС	СО	
Пшеничная солома	Ионная жидкость 1-аллил-3-метилимидазолий	Целлюлаза	3,7	8,3	[19]
Табачный экстракт	Путем кипячения в воде и паровой дистилляции (рН=9)	—	0,52	5,2	[31]
Листья сладкого сорго	Обработка фосфорной кислотной и перекисью водорода	Ферментативный (20 FPU) Cellic® CTec2	0,98	2,54	[28]
Рисовая лапша	Фильтрация	—	2,67	11,76	[27]
Цитрусовая мякоть, вода	—	Целлюлазы 50 U и 150 U	1,6	8,77	[9]
Кокосовая вода	—	Пектиназа	1,6	9,91	[9]
Меласса	—	—	1,6	2,9	[24]
Мякоть сладкого лайма	Извлечение при высокой температуре	Серная кислота	9,98	26,2	[11]
Кожура ананаса	Извлечение водой	—	2,57	11,44	[16]
Растительное масло	—	—	1	7,5	[32]
Грушевая кожура и выжимки	Измельчение	—	5,1	10,9	[20]
Мангифера, экстракт индики	Извлечение водой	—	1,61	25,43	[8]
Муцилаж какао, эксудат	Автоклавирувание	—	4,2	13,13	[25]

Применение БЦ в разных областях. Благодаря всем описанным выше свойствам БЦ может быть применена в любой области в качестве альтернативы растительной целлюлозе. В настоящее время БЦ используется в различных сферах, таких как пищевая, бумажная промышленность, медицина и фармакология (рис. 3).

Применение БЦ в пищевой промышленности. Физические и механические свойства БЦ, включая ее нерастворимость, быструю био-разлагаемость, прочность на растяжение, эластичность, долговечность, а также нетоксичность и неаллергенность, позволяют использовать ее для производства ряда продуктов с высокой добавленной стоимостью (рис. 3).

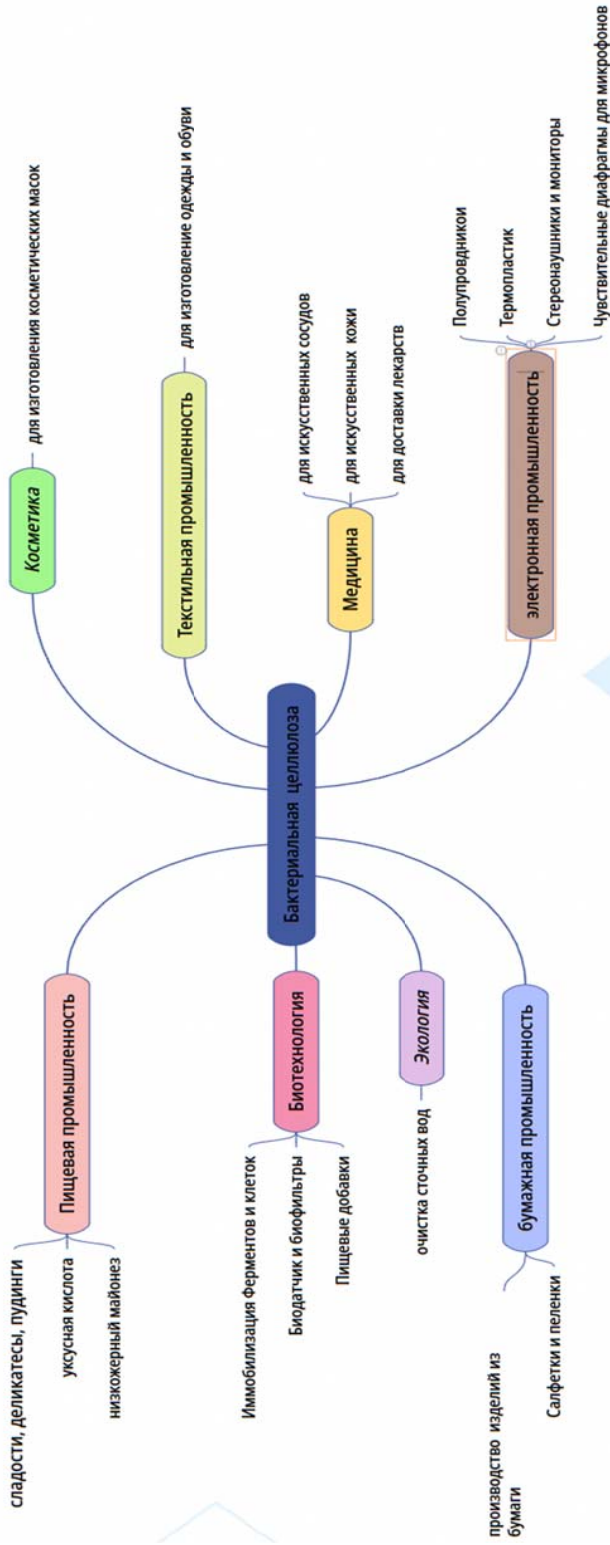


Рис. 3. Применение БЦ



БЦ применяется в пищевой промышленности в качестве загустителя, стабилизатора и желирующего агента, улучшающих качество продуктов. Благодаря своей влагоудерживающей способности она используется для приготовления крема (рис. 4).



ОСНОВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ПИЦЕ

Рис. 4. Основное применение БЦ на пищевых производствах [7]

БЦ употребляется в качестве заменителя жира в различных пищевых продуктах, снижая при этом калорийность и/или способствуя избеганию проблем со здоровьем, связанных с жирами. Замена жира была проведена при помощи гидроколлоидов в различных продуктах, таких как фрикадельки, жмыхи [24], эмульгированные мясные продукты и сыры [6].

Смесь БЦ и изолята соевого белка (далее – ИСБ) применяется в качестве заменителя насыщенных жирных кислот в сливках для снижения риска ожирения и сердечно-сосудистых заболеваний. По сравнению с чистым ИСБ смесь БЦ и ИСБ в мороженом обладает высокими текстурными, реологическими и эмульгирующими свойствами и термической стабильностью.

БЦ с экстрактом монаскуса в качестве пищевых волокон образует аналог мяса, снижающие уровень холестерина. Исследования показали, что благодаря высокой плотности гидроксильных групп на поверхности БЦ обладает лучшей способностью к стабилизации эмульсий Пикеринга (масло в воде) по сравнению с производными целлюлозы. В другом исследовании получены эмульсии «масло в воде», содержащие 5 % оливкового масла, с использованием изолята сывороточного белка в качестве



сурфактанта (2–5 % масс.) и БЦ в качестве стабилизатора (0–1 % масс.). Эмульсия была нестабильной при более низких концентрациях БЦ (0,5–0,7 % масс.), но добавление 1 % БЦ приводило к стабильным эмульсиям, предотвращая коалесценцию.

БЦ используется в иммобилизации пробиотических штаммов для защиты пробиотика от воздействия желудочных соков и сохранения полезных свойств для обеспечения здоровья потребителей. Ученые разработали композит на основе пектина (20 %) и БЦ (80 %), способного защищать *Vacillus coagulans* от высушивания и желудочно-кишечного сока. Бионанокompозит может быть использован для длительного хранения пробиотиков при различных температурах.

Было проведено множество исследований по иммобилизации ферментов, которые могут быть полезны в пищевой промышленности, в том числе лактаз, лизоцима, бета-галактазы, пероксидазы хрена.

Иммобилизация антоцианов из цветков *Echium amoenum* в БЦ применяется для контроля свежести креветок путем колориметрической индикации pH.

Важным аспектом для создания антимикробного упаковочного материала являются благоприятные условия высвобождения активного ингредиента, чтобы он мог взаимодействовать с пищевым продуктом, минимизируя или препятствуя размножению микроорганизмов. Ученые разработали состав из БЦ и поли(3-гидроксibuтирата) с эфирным маслом как перспективную антимикробную упаковку. Эта смесь также обладает благоприятными механическими и термическими характеристиками для использования в пищевой упаковке.

БЦ, пропитанная лиофилизированными бактериями *Lactobacillus plantarum*, служит антибактериальной упаковкой для мясного фарша и предотвращает рост *Listeria monocytogenes*.

Упаковка пищевых продуктов пленкой из БЦ и картофельной кожуры, содержащей фенольные соединения куркумина, показала улучшение прочности на разрыв и заметное снижение проницаемости водяного пара и кислорода. Куркумин используется в качестве индикатора pH и борной кислоты, которые могут влиять на качество пищевых продуктов [30].

Пленки из БЦ могут применяться в качестве закусок или оберток для суши и нетрадиционных сэндвичей при добавлении в них вкусовых фруктовых шпоре.

Медицина. БЦ обладает большим потенциалом в различных областях биомедицины, включая перевязку ран, искусственную кожу, зубные имплантаты, доставку лекарств, кровоостанавливающие материалы, сосудистые трансплантаты, каркасы для тканевой инженерии, биосенсоры и диагностику (рис. 5).

Высокая механическая прочность во влажном состоянии, значительная проницаемость для жидкостей и газов и низкое раздражение кожи указывают на то, что желатиновую мембрану из БЦ, например **Biofilm**[®] и **Gengiflex**[®] может использоваться как искусственная кожа в хирургии и зубной имплантации, в случае ожогов второй и третьей степени, язв и других заболеваний.



Рис. 5. Основное применение БЦ в медицине

БЦ изначально использовалась в качестве раневой повязки благодаря высокой механической прочности во влажном состоянии, проницаемости, гибкости, полупрозрачности и отличной биосовместимости.

После практического применения было обнаружено, что БЦ обладает рядом дополнительных преимуществ, включая устранение экссудата, способствование потоотделению и газообмену, уменьшение боли и потери электролитов и белка, предотвращение инфекции и ускорение заживления ран.

Целлюлоза, вырабатываемая бактериями, может быть использована для изготовления искусственных кровеносных сосудов, поскольку она несет меньший риск образования тромбов, чем синтетические материалы, используемые в настоящее время для операций шунтирования.

Включение БЦ в функциональные биомедицинские приложения, такие как биоанализ, биосенсоры, терапия стволовыми клетками, ферментативная обработка и иммобилизация клеток, требует значительного контроля его структуры и свойств.

В последнее время натуральные полимеры, такие как целлюлоза и хитозан имеют широкое применение в качестве фармацевтических носителей. Они обладают такими преимуществами, как низкая стоимость, биосовместимость, биоразлагаемость, нетоксичность и поверхностная функциональность, которые важны в механизме адсорбции лекарств под действием электростатической силы.

БЦ является высокопористым наноматериалом, способными переносить молекулы, такие как функциональные агенты (антибактериальные, антиоксидантные, противовоспалительные и т. д.) или полезные микроорганизмы (например, пробиотики, постбиотики), и затем доставлять их к определенной цели (например, пище, ране, сосудам и т. д.).



Широко распространенным примером выступает загрузка антибиотиков на поверхность БЦ путем погружения, например, как в случае с тетрациклином — ингибитором роста бактерий путем ингибирования трансляции.

Недавно ученые оплодотворили мезенхиманские стволовые клетки в матрице БЦ для интеграции в ткань хозяина и содействия регенерации поврежденной ткани.

Косметика. Стремление к эстетике привело к росту рынка косметики и появлению широкого ассортимента продуктов. Косметические активные вещества — это вещества, помогающие поддерживать красоту. Они входят в состав транспортных средств, доставляющих их к коже и способствующих проникновению в нее. Натуральные полимеры, такие как целлюлоза, гидрогели и целлюлозные нановолокна, были использованы в качестве основных материалов для производства этих косметических средств.

Благодаря эффективности БЦ для быстрого высвобождения гидрофобных и гидрофильных лекарств, а также высокой степени влагоудержания, она хорошо подходит для использования в качестве увлажняющей и противовоспалительной листовой маски для кожи, склонной к акне и воспалениям [5].

Ученые доказали, что применение БЦ, соединенной с 1,3-дигидрокси-2-пропаном в концентрации 50 г/л в течение 30 мин гарантированно изменяет цвет кожи на тот, который считается наиболее близким к эффекту естественного загара, не вызывая аллергии на коже.

Текстильная промышленность. БЦ была исследована в качестве связующего в бумаге. Она состоит из чрезвычайно маленьких скоплений целлюлозных микрофибрилл, и при встраивании в бумагу это свойство значительно повышает прочность и долговечность целлюлозы. Исследователи смогли доказать, что добавление 5 % БЦ к древесной массе при формировании бумажного листа значительно улучшает удержание каловины, прочность и огнестойкость по сравнению с бумажными листами, полученными из БЦ.

БЦ также используется вместо химических волокон на основе нефти, таких как нейлона, акрилона, терилена и полипропилена, для улучшения качества тканей, например, для большей мягкости и удобства при ношении одежды. БЦ также легко очищается, что снижает воздействие на окружающую среду

Защита экосистемы. Загрязнение воды, почвы и воздуха является огромной проблемой для многих стран мира. Тяжелые металлы, полициклические ароматические углеводороды, остатки антибиотиков, твердые частицы, взвешенные в воздухе, могут способствовать не только многочисленным проблемам со здоровьем у людей, но и прежде всего нарушать экосистему и приводить к прогрессирующим и заметным изменениям климата. В связи с этим была предпринята попытка использовать БЦ в качестве мембраны в технологии очистки сточных вод.

Исследователи показали, что биокомпозит на основе целлюлозы и хитозана характеризуется высокой эффективностью в удалении ионов меди из воды. При оценке возможности многократного использования



мембрана получила хорошие результаты, свидетельствующие о незначительных изменениях эффективности удаления меди во втором цикле фильтрации.

Электронная промышленность. БЦ и получаемые на ее основе композиты также могут найти потенциальное применение в электронной промышленности.

Ученые разработали сепаратор для литий-ионных аккумуляторов, мембрана которых изготовлена из БЦ, характеризующейся термостойкостью до 200 °С и высокой ионной проводимостью.

Другой композит целлюлозы (галлуазитцеллюлоза) входит в состав мембраны сепаратора, обладает высокой прочностью на разрыв (84,4 МПа), более высокой ионной проводимостью и хорошими циклическими свойствами [14].

Новый гелевый электролит, полученный с использованием БЦ, покрытой слоями хитозана и альгината, содержащей 1-этил-3-метилимидазолий тетрафуроборат, был оптимизирован для использования в двухслойных электрических конденсаторах без растворителей.

Модификация БЦ для получения функциональных биополимеров. Хотя полимер БЦ обладает уникальными физико-химическими характеристиками, наличие единственной функциональной группы приводит к его плохой растворимости и технологичности, что ограничивает области ее применения.

БЦ обладает большим количеством гидроксильных групп на поверхности, которые легко поддаются изменениям. Ее можно модифицировать для получения альтернативных функциональных групп и схем функционирования, используя методы модификации *in situ* и *ex situ* [26] (рис. 6).

В ряде исследований модификация *in situ* рассматривается как простой подход к изменению функциональных свойств БЦ путем добавления армирующего материала (хитозана, желатина, поли-3-гидроксibuтирата, наноматериалов, глины, кремнезема) в питательную среду. Большим преимуществом такого процесса является инкапсуляция материалов, которые становятся частью фибрилл, тем самым улучшая БЦ за счет изменения главным образом ее физико-механических свойств. Кроме того, в БЦ можно привнести новые функциональные свойства [26].

Композит хитозан / БЦ обладает превосходной механической прочностью на разрыв и деформацию благодаря новым сильным водородным связям между полимерами, делающими его более термостабильным, устойчивым к воде и воздухопроницаемым.

Модификации *ex situ* бывают либо химическими (например, окисление или реакции сшивания), либо физическими (физическое поглощение из растворов или суспензий частиц, гомогенизация или растворение БЦ при смешивании с добавками).

Путем пропитки пленки БЦ в растворе AgNO_3 образуется композит БЦ-Ag, проявляющий чрезвычайно мощную антибактериальную активность против грамположительных и грамотрицательных бактерий [27]. Таким образом, исследование показало, что включение металлов и оксидов металлов (ZnO , CaCl_2 , TiO_2) в композиты БЦ придает электропроводность и антимикробные свойства [15].

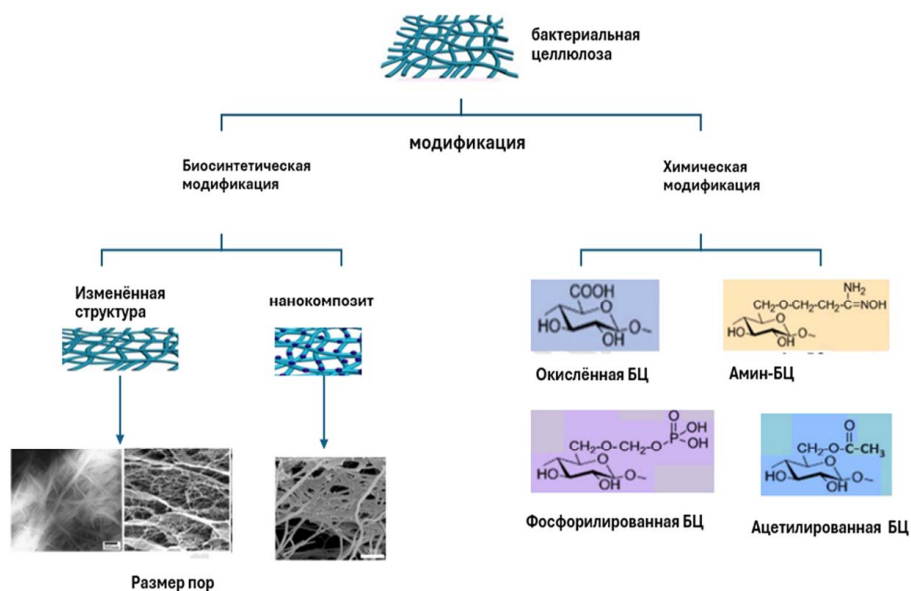


Рис. 6. Способы получения модифицированных БЦ наноматериалов

Пропитка агарного полимера бактериальной целлюлозой улучшает его свойства за счет повышения термостабильности и механических свойств, необходимых для применения в пищевой упаковке.

Другие исследования показали, что сочетание БЦ с альгинатом [13], желатином, арабиногалактаном, ксиланом, трипептидом, пектином, графеном, обеспечивают устойчивость к деформации и разрыву, уменьшению пористости.

Вывод

Благодаря своим физическим и механическим свойствам БЦ является материалом, становящимся потенциальной альтернативой пластиковым полимерам для применения в разных областях, например в качестве упаковки пищевых продуктов, а также находит все большее применение для создания искусственных тканей на основе БЦ путем модификаций *in situ* и *ex-situ*. БЦ может быть синтезирована многими бактериями, но процесс ее получения для промышленности и научных исследований затруднен из-за высокой себестоимости питательной среды. Необходимы дальнейшие интенсивные исследования, направленные на создание новых штаммов, генетически модифицированных на разработку питательной среды на основе сельскохозяйственных и промышленных отходов и на оптимизацию условий культивирования продуцентов БЦ.



Список литературы

1. Гадыева Е. К. Влияние условий культивирования на биосинтез бактериальной целлюлозы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8, №3. С. 33–40. doi: 10.21285/2227-2925-2018-8-3-33-40.
2. Коньшин В. В., Крахмалев В. А., Коршунов Л. А. и др. Способ очистки бактериальной целлюлозы : патент на изобретение №2754368 от 01.09.2021 г.
3. Милютин М. А. Питательные среды для биосинтеза бактериальной целлюлозы // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы XV Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием. Бийск, 2022. С. 321–324.
4. Ревин В. В., Лияськина Е. В. Штамм *Gluconacetobacter sucrofermentans* – продуцент бактериальной целлюлозы : патент на изобретение №2523606 от 20.07.2014 г.
5. Amorim J. D. P., Galdino C. J. S., Costa A. F. S. et al. BioMask, a polymer blend for treatment and healing of skin prone to acne // Chemical Engineering Transactions. 2020. Vol. 79. P. 1–6. doi: 10.3303/CET2079035.
6. Aydınol P., Özcan T. Production of reduced fat Labneh cheese with inulin and β -glucan fibre based fat replacer // International Journal of Dairy Technology. 2018. Vol. 71, №2. P. 362–371. doi: 10.1111/1471-0307.12456.
7. Azredo H. M. C., Barud H., Farinas C. S., Vasconcellos V. M. Bacterial Cellulose as a Raw Material for Food and Food Packaging Applications // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2019. Vol. 3. P. 45–57. doi: 10.3389/fsufs.2019.00007.
8. Calderón S., Horue M., Alvarez V. A. et al. Isolation and partial characterization of *Komagataeibacter* sp. SU12 and optimization of bacterial cellulose production using *Mangifera indica* extracts // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 2021. Vol. 97, №6. P. 1–12. doi: 10.1002/jctb.6839.
9. Cao Y., Lu S., Yang Y. Production of bacterial cellulose from byproduct of citrus juice processing (citrus pulp) by *Gluconacetobacter hansenii* // Cellulose. 2018. Vol. 25. P. 6977–6988. doi: 10.1007/s10570-018-2056-0.
10. Chen L., Hong F., Yang X., Han S. Biotransformation of wheat straw to bacterial cellulose and its mechanism // Bioresource Technology. 2013. Vol. 135. P. 464–468. doi: 10.1016/j.biortech.2012.10.029.
11. Dubey S., Singh J., Singh R. Biotransformation of sweet lime pulp waste into high-quality nanocellulose with an excellent productivity using *Komagataeibacter europaeus* SGP37 under static intermittent fed-batch cultivation // Bioresource Technology. 2018. Vol. 247. P. 73–80. doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.089.
12. Fontana J. D., Fontana J. D., Koop H. S., Tiboni M. New insights on bacterial cellulose // Food Biosynthesis. 2017. Vol. 7. P. 213–249. doi: 10.1038/ijo.2015.179.
13. Gutierrez E., Burdiles P. A., Quero F. et al. 3D printing of antimicrobial alginate/bacterial-cellulose composite hydrogels by incorporating copper nanostructures // ACS Biomaterials Science & Engineering. 2019. Vol. 5, №11. P. 6290–6299. doi: 10.1021/acsbomaterials.9b01048.
14. Huang Ch., Ji H., Guo B. et al. Composite nanofiber membranes of bacterial cellulose / halloysite nanotubes as lithium-ion battery separators // Cellulose. 2019. Vol. 26, №11. P. 6669–6681. doi: 10.1007/s10570-019-02558-y.
15. Jebel F. S., Almasi H. Morphological, physical, antimicrobial and release properties of ZnO nanoparticles-loaded bacterial cellulose films // Carbohydrate Polymers. 2016. Vol. 149. P. 8–19. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.04.089.



16. Keshk S.M. Bacterial Cellulose Production and its Industrial Applications // Journal of Bioprocessing & Biotechniques. 2014. Vol. 4, №2. P. 10. doi: 10.4172/2155-9821.1000150.

17. Kim S.S., Lee S.Y., Park K.J., Park S.M. Gluconacetobacter sp. gel_SEA623-2, bacterial cellulose producing bacterium isolated from citrus fruit juice // Saudi Journal of Biological Sciences. 2017. Vol. 24, №2. P. 314–319. doi: 10.1016/j.sjbs.2015.09.031.

18. Lee K.Y., Buldum G., Mantalaris A., Bismarck A. More than meets the eye in bacterial cellulose: Biosynthesis, bioprocessing, and applications in advanced fiber composites // Macromolecular Bioscience. 2014. Vol. 14, №1. P. 10–32. doi: 10.1002/mabi.201300298.

19. Li W., Zhang S., Zhang T., Shen Y. et al. Bacterial cellulose production from ethylenediamine pretreated *Caragana korshinskii* Kom // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 164. P. 113340.

20. Ma X., Yuan H., Wang H., Yu H. Coproduction of bacterial cellulose and pear vinegar by fermentation of pear peel and pomace // Bioprocess and Biosystems Engineering. 2021. Vol. 44. P. 1–14. doi: 10.1007/s00449-021-02599-3.

21. Nagmetova G., Kurmanbayev A. Isolation and identification of bacterial cellulose producers with potential for medicine and biotechnology // Eurasian Journal of Applied Biotechnology. 2019. Vol. 2. P. 114–120. doi: 10.11134/btp.2.2019.11.

22. Pang M., Huang Y., Meng F. et al. Application of Bacterial Cellulose in Skin and Bone Tissue Engineering // European Polymer Journal. 2019. Vol. 122. P. 9. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2019.109365.

23. Ramon D.F., Gámez-Meza N., Medina-Juárez L.Á. et al. Bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter entanii* using pecan nutshell as carbon source and its chemical functionalization // Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 1, №207. P. 91–99. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.11.067.

24. Revin V.V., Dolganov A.V., Liyaskina E.V. et al. Characterizing bacterial cellulose produced by *Komagataeibacter sucrofermentans* H-110 on molasses medium and obtaining a biocomposite based on it for the adsorption of fluoride // Polymers. 2021. Vol. 13. P. 1422. doi: 10.3390/polym13091422.

25. Saavedra-Sanabria O.L., Durán D., Cabezas J. et al. Cellulose biosynthesis using simple sugars available in residual cacao mucilage exudate // Carbohydrate Polymers. 2021. Vol. 274. P. 118645. doi: 10.1016/j.carbpol.2021.118645.

26. Selestina G., Janja T. Bacterial Cellulose: Production, Modification and Perspectives in Biomedical Applications // Nanomaterials. 2019. Vol. 9, №10. P. 20. 1352. doi: 10.3390/nano9101352.

27. Sutthiphatkul T.S., Amornrat O.D. Optimization of bacterial cellulose production from wastewater of noodle processing by *Komagataeibacter* sp. PAP1 and bio-cellulose paper production // Walailak Journal of Science and Technology. 2020. Vol. 17, №11. P. 1241–1251. doi: 10.48048/wjst.2021.6508.

28. Wang Q., Nnanna P.C., Shen F. et al. Full utilization of sweet sorghum for bacterial cellulose production: a concept of material crop // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 162. P. 113256. doi: 10.1016/J.INDCROP.2021.113256.

29. Wang S.-S., Han Y.-H., Chen J.-L. et al. Insights into Bacterial Cellulose Biosynthesis from Different Carbon Sources and the Associated Biochemical Transformation Pathways in *Komagataeibacter* sp. W1 // Polymers. 2018. Vol. 10, №9. P. 20. 963. doi: 10.3390/polym10090963.



30. Xie Y., Niu X., Yang J. et al. Active biodegradable films based on the whole potato peel incorporated with bacterial cellulose and curcumin // International Journal of Biological Macromolecules. 2020. Vol. 150. P. 480–491. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.01.29.

31. Ye J., Zheng S., Zhang Z. et al. Bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* ATCC 23767 using tobacco waste extract as culture medium // Bioresource Technology. 2019. Vol. 274. P. 518–524. doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.028.

32. Zahan K. A.; Hedzir M. S. A.; Mustapha M. The potential use of papaya juice as fermentation medium for bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* 0416 // Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science. 2017. Vol. 40, №3. P. 343–350.

33. Żywicka A., Junka A. F., Szymczyk P. et al. Bacterial cellulose yield increased over 500 % by supplementation of medium with vegetable oil // Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 199. P. 294–303. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.06.126.

101

Об авторах

Абдул-Галил Ахмед Али — асп., Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия.

E-mail: abdoulgalil49@gmail.com

ORCID: 0009-0007-3982-2131

Ольга Владимировна Кригер — доц., д-р. техн. наук, проф., Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия.

E-mail: ovkriger@itmo.ru

ORCID: 0000-0002-1489-0716

SPIN-код: 4981-1381

Abdoul-Galil Ahmed Ali, O. V. Krieger

PRODUCTION AND APPLICATION OF BACTERIAL CELLULOSE

ITMO National Research University, St. Petersburg, Russia

Received 24 July 2024

Accepted 22 November 2024

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-6

To cite this article: Abdoul-Galil Ahmed Ali, Krieger O. V., 2025, Production and application of bacterial cellulose, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 82–102. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-6.

Bacterial cellulose (BC) is a biomaterial produced by certain bacteria that possesses unique properties, distinguishing it from plant-derived cellulose by its purity, high crystallinity, excellent biocompatibility, and superior water-holding capacity. Due to these advantages, BC is increasingly used in various industrial applications. However, large-scale production of BC is limited, particularly by the high cost of the culture medium. This review presents an analysis of scientific data and official reports on the properties of BC and methods to enhance its productivity for applications in the food industry, specifically as a food additive and packaging material. A literature search was conducted in both English and Russian using the Scopus,



ScienceDirect, PubMed, and eLIBRARY.RU databases. The analysis of scientific and official data demonstrated that physical factors of the culture medium, such as temperature, pH, carbon source, and cultivation conditions, influence the yield and properties of BC. The utilization of agricultural and food waste as a culture medium has been shown to enhance the productivity of *Komagataeibacter xylinus* strains. The combination of BC with other components, including biologically active substances, metals, probiotics, polymers, and antibiotics, can improve its functional properties and expand its applications in the food industry – for instance, as a fat replacer, in the production of artificial meat, enzyme immobilization, and the development of biodegradable packaging materials.

102

Keywords: bacterial cellulose, BC biosynthesis, substrates for cultivation, BC applications

The authors

Abdoul-Galil Ahmed Ali, graduate student, ITMO National Research University, Russia.

E-mail: abdoulgalil49@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3982-2131>

Prof. Olga Vladimirovna Kriger, National Research University ITMO, Russia.

E-mail: ovkriger@itmo.ru

ORCID: 0000-0002-1489-0716

S SPIN-code: 4981-1381

С. А. Кулакова¹, Л. И. Торопов¹, А. Я. Баянкин²

**ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД
БИОЛОГИЧЕСКИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЗЕЛЕННОГО СТРОИТЕЛЬСТВА
И БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ**

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, Россия

² ООО «Современные пиролизные технологии», Пермь, Россия

Поступила в редакцию 18.09.2024 г.

Принята к публикации 14.11.2024 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-7

Для цитирования: Кулакова С. А., Торопов Л. И., Баянкин А. Я. Возможность использования осадка сточных вод биологических очистных сооружений для целей зеленого строительства и биологической рекультивации // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 103–113. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-7.

На городских биологических очистных сооружениях активно внедряются различные подходы по обезвреживанию осадка сточных вод, в том числе с применением технологии термической утилизации – пиролиза. Получаемый в таком случае биоуголь в настоящее время практически не используется, но этот продукт имеет уникальное свойство поглощать и на практике секвестрировать CO₂ на многие столетия, находясь в почве, при этом улучшая ее качества и способствуя устойчивому использованию и развитию. Связь между биомассой и биоуглем представляет собой один из наиболее эффективных подходов для решения климатических задач. Этот тройной положительный эффект делает биоуголь и технологии его производства весьма перспективными в контексте климатической повестки. В настоящее время в связи с этим уже формируется отдельное направление, известное как пирогенное улавливание и хранение углерода.

Ключевые слова: биоуголь, осадки сточных вод, пиролизтоксичные элементы, секвестрирование CO₂, предельно допустимые концентрации, растительный грунт, биологическая рекультивация, зеленое строительство

Введение

В городах ежегодно возрастает потребность в искусственно создаваемых грунтах для озеленения новых объектов и реконструкции старых. В настоящее время для этих целей используется естественный торф, который не является оптимальным для выращивания растений и требует доработки. Кроме этого, добыча торфа связана с нарушением (уничтожением) осушенных болотных экосистем. В связи с климатической по-



весткой важно сохранять и/или восстанавливать болотные экосистемы, так как они имеют высокую эффективность с точки зрения связывания углерода.

В городах, где сосредоточена большая часть населения Земли, канализация давно перестала считаться одним из великих достижений человечества. Тем не менее технологии продолжают развиваться, а городской образ жизни стремительно проникает и в сельские районы, создавая новые вызовы нового тысячелетия. В частности, биологические очистные сооружения (далее – БОС) стали важной частью канализационной системы населенных пунктов и источником специфического ила, или осадка сточных вод (далее – ОСВ), который накапливается в значительных объемах в этих сооружениях.

Цель настоящей работы – проанализировать возможности и ограничения использования ОСВ БОС для производства грунтов.

Задачи:

1. Определить статус ОСВ: отход или промежуточный продукт.
2. Охарактеризовать технологию пиролиза, используемую для получения биоугля из ОСВ.
3. Определить содержание токсичных элементов в биоугле.

Под ОСВ следует понимать смесь минеральных и органических веществ, выделяемых из сточных вод в процессе их механической, биологической, физико-химической и реагентной очистки, в том числе избыточный активный ил, выведенный из технологического процесса биологической очистки [3].

Ежегодно в России образуется порядка 1,5 млн м³ иловых осадков, еще около 20 млн м³ уже накоплено на иловых картах. Переработка данного вида отходов затруднена из-за негативного влияния на окружающую среду, биологической опасности, содержания тяжелых металлов, высоких затрат на утилизацию и транспортировку [10].

В связи с высокой скоростью образования ОСВ на БОС возникает вопрос дальнейшего его использования и/или захоронения, то есть выбора наилучшей доступной технологии обращения с ОСВ, а для этого необходимо определить статус ОСВ как отхода или промежуточного продукта.

Согласно письму Минприроды России №05-12-44/21713 от 06.11.2013 г. ОСВ следует считать промежуточным продуктом, а не отходом [8]. Иловые площадки не могут классифицироваться как объекты размещения отходов и относятся к инженерным сооружениям для обработки и обезвоживания ОСВ [7]. При несоответствии качества ОСВ требованиям стандартов или отсутствию возможности их использования по назначению и вынужденного захоронения, прошедшие обработку осадки сточных вод классифицируются как отходы [3].

Таким образом, остро стоит вопрос альтернативного использования ОСВ с мест их накопления. В зависимости от химического состава, методов обработки и показателей качества конечной продукции ОСВ могут использоваться в качестве органических удобрений, органоминеральных удобрений, органо-известковых удобрений, почвогрунтов (растительных грунтов) для биологической рекультивации, рекультивантов (инертного материала) для технической рекультивации, изолирующих



материалов на объектах размещения отходов, сырья для производства фосфорных удобрений, сырья для получения биогаза с целью последующего производства тепловой и электрической энергии, сырья для производства цемента [3].

После БОС ОСВ подвергаются обработке, техническими принципами которой согласно ГОСТу 59748-2021 [3] являются:

- сокращение объемов и массы образующихся ОСВ;
- стабилизация органических веществ осадка;
- обеззараживание;
- изменение физико-механических свойств;
- получение товарной продукции и максимальное использование полезных свойств, в том числе энергетического потенциала;
- экологическая и санитарная безопасность при использовании обработанных осадков.

Биоуголь — это материал с большой долей содержания углерода, получаемый из древесины либо из органических отходов путем пиролиза при температуре в диапазоне от 300 до 700 °С в условиях ограниченного доступа кислорода [5].

Анализ публикаций отечественных и зарубежных авторов показал, что достаточно хорошо изучено и доказано положительное влияние внесения в почву биоугля, полученного из растительных остатков (древесных опилок, шелухи подсолнечника, риса и пр.). Оно приводит к улучшению почвенной структуры, иммобилизации тяжелых металлов, снижению миграции азота и т.д. В основном публикации демонстрируют успешные эксперименты по использованию биоугля из растительных остатков для сельскохозяйственных нужд [2; 4–6]. Также встречаются работы, посвященные исследованию биоугля, получаемого из ОСВ, и возможности его применения. На данную тему написано значительно меньше работ, однако в этих исследованиях обнаружено, что рН и удельная поверхность биоугля увеличивается с повышением температуры пиролиза [1; 10; 11; 16–21].

Результаты измерений показали, что рН и удельная поверхность биоугля увеличивались с повышением температуры пиролиза, элементы Zn, Cu, Cr и Ni обогащались и удерживались в биоугле ОСВ с повышением температуры пиролиза с 300 до 700 °С, однако остаточные содержания Pb и Cd в биоугле ОСВ значительно снижались при повышении температуры с 600 °С до 700 °С [19].

Материал и методика

В настоящей статье рассматривается альтернативный вариант использования ОСВ для производства почвогрунтов, предназначенных для биологической рекультивации и зеленого строительства.

Рассматриваемые ОСВ образуются на БОС в пос. Гляденово (Пермский городской округ), который является ключевым объектом централизованной системы канализации (водоотведения) г. Перми, включает более 1 тыс. км сетей водоотведения и 63 насосных станции. Все поступающие на БОС сточные воды проходят несколько этапов очистки. На механической стадии от стоков отделяется крупный мусор, песок, взвесь.

Затем стоки поступают в аэротенки на этап биологической очистки, которая происходит с помощью активного ила — микроорганизмов, жизнедеятельность которых обеспечивает кислород. Далее сточные воды направляются в отстойники. На завершающем этапе очищенная и обеззараженная вода поступает в канал с чистой водой для сброса в Каму, а остаточный ил, образующийся в ходе очистки, обезвоживается на декантере. Пропускная способность БОС в пос. Гляденово по данным на 2019 г. составляет 440 тыс. м³/сут. [12]. В результате механического обезвоживания ила на декантере образуется кек — осадок сточных вод влажностью 72–75 % — и вода. Вода возвращается для дальнейшей обработки на очистные сооружения, ОСВ вывозится для дальнейшего хранения, складирования и/или обезвреживания.

Одним из перспективных способов переработки ОСВ, является его термическая утилизация с получением биоугля. Общее краткое описание технологии приводится ниже [13]*, технологическая схема показана на рисунке.

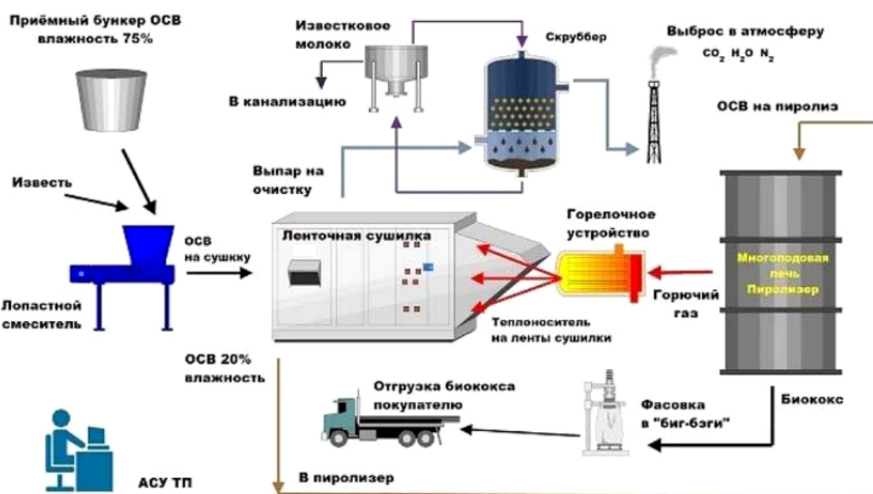


Рис. Технология термоутилизации [12]

*Настоящее описание дано для опытно-промышленного комплекса по термической переработке ОСВ влажностью до 75 % производительностью около 1 т/ч, построенного и введенного в коммерческую эксплуатацию на БОС Гляденово в 2024 г. с непосредственным участием компании — разработчика технологии «СинЭкоГаз Технологии».

Процесс термической утилизации с получением биоугля из ОСВ разделен на следующие технологические стадии:

- сушка ОСВ с понижением влажности осадка с 75 до 10 %;
- проведение пиролиза / газификации ОСВ с получением биоугля;
- сжигание пиролизного газа в горелочном устройстве с получением тепловой энергии;
- очистка охлажденных дымовых газов в орошаемом скруббере перед выбросом в атмосферу.



Влажность кека ОСВ, поступающего на утилизацию, не должна превышать 75 % — это одно из основных требований к обеспечению автормического процесса. Осадок влажностью выше 75 % к термоутилизации не принимается.

Из приемного бункера ОСВ подается в двухвальный лопастной смеситель-миксер, где происходит смешивание ОСВ с влажностью 75 % и осадка с влажностью 10 %, прошедшим сушку и отсев на предыдущей стадии. На выходе из смесителя общая влажность осадка понижается до 55 %, при этом осадок теряет адгезию (прилипание), становится рассыпчатым, имеет развитую площадь поверхности, что способствует его эффективной сушке. Также в смесителе осуществляется добавление гашеной извести для нейтрализации соединений серы, содержащейся в ОСВ, на начальной стадии термообработки. Далее ОСВ подается в барабанную (как вариант — ленточную) сушилку одновременно с теплоносителем, состоящим из смеси горячих дымовых газов из высокотемпературного дожигателя и части охлажденных дымовых газов с выпаром из сушилки. Часть выпара отбирается дымососом на газоочистку в скруббер и выводится в атмосферу через дымовую трубу.

Высушенный до влажности 10 % ОСВ из сушилки направляется в барабанное сито. Там происходит его разделение на две фракции: крупная направляется в пиролизер-газификатор на следующий этап — пиролиз / газификацию. Мелкая подается в смеситель-миксер.

Пиролизер-газификатор сконструирован на основе многоподовой печи непрерывного действия, работающей в пиролизном режиме, и предназначен для газификации твердого топлива с получением горючего пиролизного газа.

Сухой крупный ОСВ является топливом для газификатора. Он непрерывно шнеком загружается на верхний под пиролизера-газификатора. Газификатор предварительно разогревается, в нем инициируется горение и обеспечивается непрерывное перемещение топлива с вышележащих подов на нижележащие вращением вала с лопатками. На верхних подах газификатора при ограниченной подаче воздуха последовательно происходит досушка и высокотемпературный пиролиз (700–800 °С органической массы ОСВ, а на нижних подах — газификация / дожигание углерода и охлаждение углеродно-зольного остатка.

На выходе из газификатора углеродно-зольный остаток — биоуголь — охлаждается и направляется в бункер для временного хранения и вывоза.

Температурный режим в газификаторе поддерживается таким, чтобы тяжелые металлы не плавилась, улетучиваясь с пиролизным газом, а концентрировались в подавляющей своей части в углеродно-зольном остатке ОСВ.

Пиролизные газы выводятся из пиролизера-газификатора и направляются для сжигания в специальное высокотемпературное горелочное устройство (далее — ГУ). Температура в ГУ поддерживается на уровне 1100–1200 °С. Высокотемпературное горение пиролизного газа обеспечивает низкие уровни образования окиси углерода, углеводородов, диоксинов и иных загрязнителей в дымовых газах.



Дымовые газы из ГУ направляются в вихревой смеситель, где происходит их закалка смешением с частью выпара из сушилки с резким понижением температуры до 300–350 °С. Далее дымовые газы поступают в сушилку и используются как теплоноситель для сушки. Тепловой энергии дымовых газов достаточно для осуществления эффективной сушки ОСВ и реализации автотермического процесса его утилизации. Использование дополнительных источников тепловой энергии не требуется. Сокращение объема ОСВ в результате термоутилизации происходит в 8–10 раз (табл. 1), при этом в углеродно-зольном остатке – биоугле – после высокотемпературной обработки отсутствуют биологические и органические загрязнители.

Таблица 1

Эффективность использования метода термоутилизации

Производительность ОСВ с БОС, кг/ч	Биоуголь, кг/ч	Производительность, т/сут.
1000	130	3

Элементы-примеси в образцах ОСВ определяли спектральным методом. Спектры регистрировали с использованием автоматизированного атомно-эмиссионного спектрометра ДФС-458С (генератор УГЭ-4). В качестве приемника излучения служила фотоэлектронная приставка ФЭП-454 с ПЗС-линейками Toshiba. Нижние электроды – графитовые, ос. ч. 7-4. Верхние противоэлектроды из спектрально-чистого угля «SV-104» (Словакия).

Качественное определение элементов-примесей в образцах ОСВ проведено в мае 2024 г. Контролировали наличие 28 элементов: As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, V, Zn, Ti, Ca, Mg, Al, Ga, Si, Fe, K, Na, P, Mo, Bi, Ba, Sn, Sr, In. По качественному содержанию элементы разделили на четыре группы:

- 1) не обнаружено;
- 2) «следы» (элемент присутствует в незначительном количестве);
- 3) наличие в пробах (содержание может достигать 1 %);
- 4) значительное содержание (больше 1 %).

Количественный анализ проводился для элементов-примесей 3 и 4 группы, а также для тех элементов, контроль которых осуществляется при сертификации почв и грунтов [9].

Результаты и обсуждение

Иловый осадок от очистки городских стоков содержит в себе патогенную микрофлору, паразитные агенты, болезнетворные вирусы, кишечные палочки и палочки Коха, а также дурнопахнущие вещества. Все это создает угрозу проникновения в почву, грунтовые и поверхностные воды токсичных органических соединений и соединений тяжелых металлов, патогенной микрофлоры и яиц гельминтов [1]. При пиролизе происходит термическая стерилизация и патогенная флора гибнет, но тяжелые металлы сохраняются.



Результаты анализов показали, что значительное содержание до и после термообработки (больше 1 %) приходится на кальций, марганец, натрий, кремний. Обнаружены следы следующих элементов: молибден, олово, стронций. Линии остальных элементов в оптимальных условиях съемки отсутствуют (табл. 2).

Таблица 2

**Качественное определение элементов-примесей
в образцах ОСВ спектральным методом**

Наличие	Содержание	Элементы
Не обнаружено	—	Ванадий, висмут, галлий, калий, кобальт, мышьяк, сурьма
Следы	Незначительное	Молибден, олово, стронций
Присутствует	До 1 %	Алюминий, барий, бор, железо, индий, кадмий, магний, медь, никель, свинец, титан, фосфор, хром, цинк
Значительное содержание	Больше 1 %	Кальций, марганец, кремний, натрий

109

С целью дальнейшего использования получаемого продукта (биоугля) для производства почвогрунта необходимо количественное определение содержания в биоугле токсичных элементов (медь, никель, цинк, кобальт, хром, марганец, свинец, ртуть, мышьяк), контроль которых осуществляется при сертификации почв и грунтов [9].

Исходя из полученных данных качественного анализа, целесообразно провести количественное исследование на содержание **меди, никеля, свинца, хрома, цинка, марганца, кадмия**. Результаты определения приведены в таблице 3.

Таблица 3

**Валовое содержание токсичных элементов в ОСВ до
и после термической обработки**

Наименование	Содержание элементов, мг/кг						
	Cu	Pb	Mn ¹	Cr	Ni	Zn	Cd
ОСВ до термической обработки	245	34	600	300	140	1300	32
Допустимое содержание в ОСВ [3]	1500	500	—	1000	400	3500	30
Биоуголь (ОСВ после термической обработки)	480	44	1450	600	230	2850	25
Допустимое содержание в биоугле (продукте переработки ОСВ) для целей биологической рекультивации [3]	750	500	—	1000	400	3500	30

¹ В ГОСТе Р 59748-2021 [3] не нормируется содержание марганца. Согласно ГН 2.1.7.2041-06 [11] ПДК валового содержания марганца в почве составляет 1500 мг/кг.



Данные таблицы 3 свидетельствуют, что получаемый биоуголь из ОСВ соответствует требованиям ГОСТ Р 59748-2021 [3], следовательно может быть использован в производстве почвогрунтов для биологической рекультивации, в зеленом строительстве при устройстве газонов, посадке деревьев и кустарников; при благоустройстве промышленных и селитебных территорий.

Выводы

Согласно природоохранному законодательству РФ ОСВ БОС следует считать промежуточным продуктом, а не отходом. Следовательно, актуальным является поиск его дальнейшего использования. Описанная в данной работе технология пиролиза позволяет получать из ОСВ перспективный продукт – биоуголь.

Содержание элементов (Cu, Pb, Mn, Cr, Ni, Zn) после термической обработки увеличилось, а содержание Cd снизилось на 8%. Выполненный анализ качественного определения элементов-примесей в биоугле показал соответствие ГОСТу Р 59748-2021, что обуславливает возможность его использования для целей зеленого строительства и биологической рекультивации.

С целью успешного применения, получаемого в результате термоутилизации ОСВ продукта (биоугля) для производства почвогрунта, его необходимо дополнительно наделить плодородными свойствами, обогатить удобрительными макро- и микроэлементами, необходимыми для полноценного роста и развития растений.

Список литературы

1. Буренков С. В., Грачев А. Н., Забелкин С. А. Термическая утилизация иловых осадков сточных вод методом быстрого пиролиза в сеточном реакторе // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19, №22. С. 40–43. EDN: XCNBGT.
2. Галиева Г. Ш., Курныцева П. А., Галицкая П. Ю. и др. Влияние биочара из куриного помета на микроорганизмы и растения // Ученые записки Казанского университета. Сер.: Естественные науки. 2021. Т. 163, №2. С. 221–237. doi: 10.26907/2542-064X.2021.2.221-237. EDN: MDQGQM.
3. ГОСТ Р 59748-2021. Национальный стандарт Российской Федерации технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования. Введ. 01.11.2021 г. 2021.
4. Ефремова Д. А., Белик Е. С. Биоуголь как способ депонирования углерода // Химия. Экология. Урбанистика. 2022. Т. 1. С. 29–32. EDN: QOKRZX.
5. Ивлиева М. С. Использование биоугля для восстановления территории, нарушенной открытыми горными работами // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В. Г. Шухова, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Белгород, 2023. С. 124–127. EDN: KKLCKF.
6. *Материалы* международного научного семинара «Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и окружающую среду». СПб., 2020. EDN: TRNEVO.



7. О направлении разъяснений : письмо Росприроднадзора № АС-03-02-36/21630 от 07.12.2015 г.

8. По вопросу разъяснения применения природоохранного законодательства Российской Федерации при отнесении иловых осадков к отходам производства МПР РФ : письмо Министерства природных ресурсов и экологии РФ №05-12-44/21713 от 06.11.2013 г.

9. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М., 2006.

10. Грачев А. Н., Пушкин С. А., Буренков С. В. и др. Термохимическая переработка иловых осадков сточных вод и применение биоугля // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2024. №52. С. 25–29. EDN: TEMXRX.

11. Шварцбург Я. Д., Калинина Е. В. Биоуголь – свойства и области применения // Химия. Экология. Урбанистика. 2022. Т. 1. С. 155–159. EDN: NZOGTS.

12. Годовой отчет о социальной и экологической ответственности. URL: <https://novogor.perm.ru/userfiles/files/Соотчеты%20и%20эколог.проекты/СОЮТЧЕТ%202019.pdf> (дата обращения: 13.08.2024).

13. Технология утилизации осадков сточных вод. URL: <https://synecogas.ru/utilizaciya-osadkov-stochnyh-vod-s-polucheniem-biouglya> (дата обращения: 13.08.2024).

14. Taoze L., Bangyu L., Wei Z. Nutrients and Heavy Metals in Biochar Produced by Sewage Sludge Pyrolysis: Its Application in Soil Amendment // Pol. J. Environ. Stud. 2014. Vol. 23, №1. P. 271–275.

15. Wang Z., Tian Q., Guo J. et al. Co-pyrolysis of sewage sludge/cotton stalks with K₂CO₃ for biochar production: Improved biochar porosity and reduced heavy metal leaching // Waste Manag. 2021. Vol. 135. P. 199–207. doi: 10.1016/j.wasman.2021.08.042 PMID: 34520992.

16. Wang X., Li C., Li Z. et al. Effect of pyrolysis temperature on characteristics, chemical speciation and risk evaluation of heavy metals in biochar derived from textile dyeing sludge // Ecotoxicol Environ Saf. 2019. Vol. 168. P. 45–52. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.10.022. PMID: 30384166.

17. Khanmohammadi Z., Afyuni M., Mosaddeghi M. R. Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar // Waste Manag Res. 2015. Vol. 33 (3). P. 275–283. doi: 10.1177/0734242X14565210. PMID: 25595292.

18. Xia Y., Tang Y., Shih K., Li B. J. Enhanced phosphorus availability and heavy metal removal by chlorination during sewage sludge pyrolysis // Hazard Mater. 2020. Vol. 382. P. 121110. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121110. PMID: 31518771.

19. Li B., Ding S., Fan H., Ren Y. Experimental Investigation into the Effect of Pyrolysis on Chemical Forms of Heavy Metals in Sewage Sludge Biochar (SSB), with Brief Ecological Risk Assessment // Materials (Basel). 2021. Vol. 14 (2). P. 447. doi: 10.3390/ma14020447. PMID: 33477642.

20. Marcińczyk M., Ok Y. S., Oleszczuk P. From waste to fertilizer: Nutrient recovery from wastewater by pristine and engineered biochars // Chemosphere. 2022. Vol. 306. P. 135310. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135310. PMID: 35714962.

21. Yang L., Zhao J., Huang Q. et al. Release behavior of fertilizers and heavy metals from iron-loaded sludge biochar in the aqueous environment // Environ Pollut. 2023. Vol. 334. P. 122163. doi: 10.1016/j.envpol.2023.122163. PMID: 37429492.



Об авторах

Светлана Александровна Кулакова — канд. геогр. наук, доц., Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия.

E-mail: kulakovasa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2854-6414

SPIN-код: 2861-4630

Леонид Иванович Торопов — канд. хим. наук, доц., Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия.

E-mail: leontor2@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7967-5884

SPIN-код: 2584-8230

Андрей Яковлевич Баянкин — генеральный директор ООО «СИНЭКОГАЗ ТЕХНОЛОГИИ», Пермь, Россия.

E-mail: synecogas@gmail.com

112

S. A. Kulakova¹, L. I. Toropov¹, A. Ya. Bayankin²

THE POSSIBILITY OF USING THE REMAINING WASTEWATER FROM BIOLOGICAL TREATMENT PLANTS FOR THE PURPOSES OF GREEN CONSTRUCTION AND BIOLOGICAL RECLAMATION

¹ Perm State National Research University, Perm, Russia

² «Modern Pyrolysis Technologies», Perm, Russia

Received 18 September 2024

Accepted 14 November 2024

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-7

To cite this article: Kulakova S. A., Toropov L. I., Bayankin A. Ya., 2025, The possibility of using the remaining wastewater from biological treatment plants for the purposes of green construction and biological reclamation, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 103–113. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-7.

Various approaches to sewage sludge treatment are actively being implemented at municipal biological wastewater treatment facilities, including thermal utilization technologies such as pyrolysis. The biochar produced through this process is currently underutilized; however, it possesses the unique ability to absorb and effectively sequester CO₂ for centuries when incorporated into soil, simultaneously enhancing soil quality and promoting sustainable land use and development. The link between biomass and biochar represents one of the most effective strategies for addressing climate challenges. This triple positive effect makes biochar and its production technologies highly promising in the context of climate policy. As a result, a distinct field known as pyrogenic carbon capture and storage is now emerging.

Keywords: biochar, sewage sludge, pyrolysis toxic elements, sequestration of CO₂, maximum permissible concentrations, plant soil, biological reclamation, green construction



The authors

Dr Svetlana A. Kulakova, Associate Professor, Perm National Research University, Russia.

E-mail: kulakovasa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2854-6414

SPIN-code: 2861-4630

Dr Leonid I. Toropov, Associate Professor, Perm National Research University, Russia.

E-mail: leontor2@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7967-5884

SPIN-code: 2584-8230

Andrey Ya. Bayankin, general director «SYNECOGAS Technologies», Perm, Russia.

E-mail: synecogas@gmail.com

В. В. Матыцина, К. А. Рухляда, О. В. Кригер

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА
И СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА
НА РОСТ БИОМАССЫ ЦИАНОБАКТЕРИИ
CYANOBACTERIUM SP. B-1200**

114

Национальный исследовательский университет ИТМО,
Санкт-Петербург, Россия
Поступила в редакцию 13.06.2024 г.
Принята к публикации 20.11.2024 г.
doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-8

Для цитирования: Матыцина В. В., Рухляда К. А., Кригер О. В. Влияние температурного режима и спектрального состава света на рост биомассы цианобактерии *Cyanobacterium* sp. B-1200 // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 114 – 126. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-8.

Цианобактерии являются перспективным источником биологически активных соединений различной природы и представляют большой интерес для использования их в биотехнологических процессах получения комплексов или индивидуальных биологически активных веществ различной направленности. Подбор оптимальных условий культивирования цианобактерий будет способствовать накоплению биомассы бактерий с высокой скоростью и максимальному выходу биологически активных веществ. В данном исследовании проанализировано влияние температурного режима и спектрального состава света на рост биомассы цианобактерии *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 в стационарных условиях. В ходе эксперимента штамм культивировали при различных температурах и различном освещении с регулярным измерением оптической плотности для контроля прироста биомассы.

Детальный анализ динамики роста позволил охарактеризовать различные фазы развития цианобактерий, включая лаг-фазу, экспоненциальную, фазу замедления и стационарную. Полученные результаты свидетельствуют о том, что продолжительность этих фаз варьировалась в зависимости от условий культивирования.

Данные, представленные в работе, могут быть использованы для оптимизации процесса культивирования и повышения продуктивности биомассы *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 в дальнейших исследованиях и промышленном производстве. Особую ценность могут иметь результаты, касающиеся влияния спектрального состава света, поскольку этот параметр часто недостаточно изучен при культивировании микроводорослей.

Ключевые слова: сине-зеленые водоросли, биомасса, цианобактерия, культивирование, фазы роста



Введение

Цианобактерии составляют одну из крупнейших групп прокариотов. Имея большое разнообразие морфологии, физиологии, паттернов клеточного деления, клеточной дифференциации и среды обитания, цианобактерии объединены способностью осуществлять кислородный фотосинтез, подобный растительному, используя воду в качестве донора электронов. Они также обладают хлорофиллом и фикобилипротеинами в качестве фотосинтетических пигментов [1; 2].

Цианобактерии были идентифицированы как богатый источник биологически активных соединений. Выделенные соединения относятся к группам поликетидов, амидов, алкалоидов, жирных кислот, индолов и липопептидов [3]. Диапазон биологической активности вторичных метаболитов, выделенных из цианобактерий, включает антибактериальную, противогрибковую, противоводорослевую, антипротозойную, противоопухолевую и противовирусную активность [4]. Понимание влияния условий культивирования на метаболические пути и накопление целевых метаболитов в клетках цианобактерий может способствовать разработке эффективных биотехнологических процессов.

В условиях избытка необходимых питательных веществ многие цианобактерии обычно усваивают и запасают их для дальнейшего потребления. В число таких веществ входят гликоген, сера, полиаминокислоты, полифосфаты, полигидроксиалканоаты (далее — ПГА) и липиды. ПГА представляют собой липоидный материал, накопленный широким спектром микроорганизмов в присутствии обильных источников углерода.

Эффективное производство ПГА с использованием цианобактерий — технологически сложная задача, решение которой тем не менее остается частью привлекательного подхода, учитывая тот факт, что источником углерода является непосредственно атмосферный CO_2 . Напротив, более эффективное производство ПГА бактериями основано на использовании ценных источников углерода, таких как сахара из крахмала и жирные кислоты из растительных масел. Из-за растущего давления, связанного с сокращением выбросов CO_2 , повышается спрос на растительные продукты, такие как крахмал и растительные масла, для использования в качестве исходных материалов для производства биотоплива и материалов на биологической основе. Поэтому можно ожидать увеличение спроса на растительную продукцию, что неизбежно потребует задействование более плодородных земель для сельскохозяйственной деятельности. При таком сценарии использование цианобактерий для производства ПГА может стать более перспективным, поскольку крупномасштабное выращивание цианобактерий не требует плодородных земель [5].

Кроме того, они являются мощными источниками биологически активных соединений, биоудобрений, биопластика, энергии, продуктов питания и в настоящее время используются в разработке лекарств, медицинской диагностике и биоремедиации.



В то время как биотехнологический потенциал цианобактерий привлекает все большее внимание, подавляющая часть коммерческих соединений была выделена из пресноводных цианобактерий. Морская среда с ее различными условиями, начиная от мелководной эвфонической зоны и заканчивая глубоководными гидротермальными источниками, вероятно, является хорошим ресурсом для выделения различных видов цианобактерий, которые могут иметь большое биотехнологическое значение.

Изучение адаптивных механизмов данных микроорганизмов к изменяющимся условиям окружающей среды, в том числе температуре и свету, может прояснить фундаментальные закономерности функционирования фотосинтезирующих прокариотов [6; 7].

В настоящее время цианобактерии нашли применение в решении фундаментальных биовопросов и достижении прикладных биотехнологических целей, поэтому актуальной задачей является подбор и оптимизация параметров культивирования цианобактерий для наращивания биомассы с дальнейшим извлечением из нее биологически активных веществ.

Изучение влияния абиотических факторов, таких как температура и освещение, на рост и развитие *Cyanobacterium* sp. В-1200 представляет собой важную задачу для оптимизации процесса культивирования и увеличения выхода биомассы [8; 9].

Температура является одним из ключевых факторов, определяющих интенсивность физиолого-биохимических процессов в клетках микроводорослей [10; 11]. Ее изменение при культивировании может приводить к нарушению клеточного гомеостаза и, как следствие, замедлению или ингибированию роста [12; 13].

Спектральный состав света также оказывает значительное влияние на фотосинтетическую активность и рост микроводорослей, поскольку различные пигменты поглощают свет в определенных областях видимого диапазона [14; 15].

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных влиянию температуры и света на микроводоросли, информация о воздействии этих факторов на рост и развитие цианобактерии *Cyanobacterium* sp. В-1200 ограничена [16; 17]. Поэтому целью настоящей работы является исследование влияния температурного режима и спектрального состава света на динамику роста биомассы данного штамма.

Материалы, методы и этапы исследования

Для проведения опыта был выбран штамм цианобактерии *Cyanobacterium* sp. В-1200 (рис. 1) из коллекции IPPAS ИФР РАН микроводорослей и цианобактерий. Он был предоставлен Государственным научно-исследовательским институтом генетики (ГНИИГ), Москва. Штамм охарактеризован как алкалофил, мезофил, светолубивый и автотроф; выделен в 2023 г. из среды Балтийского моря, Россия.

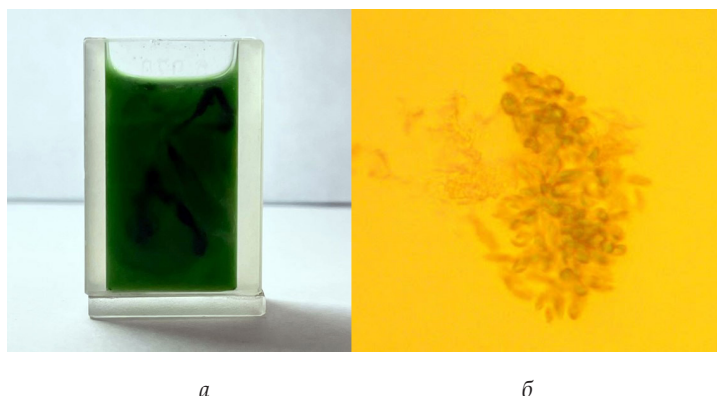


Рис. 1. Морфология штамма *Cyanobacterium* sp. B-1200: а – макровид, б – клетки при 40-кратном увеличении

I этап: приготовление питательной среды для культивирования *Cyanobacterium* sp. B-1200.

Штамм *Cyanobacterium* sp. B-1200 культивировали в питательной среде Заррука. Ее химический состав представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав питательной среды Заррука

Компонент	Масса, г/л
NaHCO ₃	16,8
K ₂ HPO ₄ × 3H ₂ O	1,0
NaNO ₃	2,5
K ₂ SO ₄	1,0
NaCl	1,0
MgSO ₄ × 7H ₂ O	0,2
CaCl ₂ × 2H ₂ O	0,04
Fe + ЭДТА	1,0
Комплексное удобрение	1,0
Вода дистиллированная	до 1 л

Раствор FeSO₄ и ЭДТА готовили путем растворения в 134 мл 1N KOH сухой ЭДТА массой 30,2 г. Раствор разбавляли водой, вносили в него 24,9 г FeSO₄ × 7H₂O и перемешивали при помощи лабораторной магнитной мешалки. После этого в раствор доливали воду до 1 л.

В состав комплексного удобрения для аквариумных растений («Все в одном», ИП Пархоменко С. С., Россия) входят (г/л): К – 42; Mg – 2,8; Fe – 1,4; N – 1,2; Mn – 0,4; B – 0,25; Zn – 0,08; Mo – 0,01.

В конической колбе объемом 1 л при помощи лабораторной магнитной мешалки производилось растворение всех указанных в таблице 1 компонентов в дистиллированной воде, объем которой составил 500 мл. После перемешивания в раствор доливали воду до 1 л.

II этап: культивирование *Cyanobacterium* sp. B-1200.

В коническую колбу объемом 500 мл помещалось 200 мл питательной среды Заррука и 2 мл суспензии со штаммом *Cyanobacterium* sp. B-1200.

Штамм *Cyanobacterium* sp. B-1200 выращивали методом периодического культивирования в питательной среде Заррука в конических колбах объемом 500 мл при разных освещении и температуре параллельно в двух повторностях (рис. 2).



Рис. 2. Культивирование *Cyanobacterium* sp. B-1200 при: А – $T=28^{\circ}\text{C}$, $E=220$ лк, $\lambda=380-780$ нм; Б – $T=23^{\circ}\text{C}$, $E=1440$ лк

Для этого был поставлен двухфакторный эксперимент (табл. 2), факторами которого являлись:

1) температура (x_1): образцы культивировались при комнатной температуре 23°C (-1) и в термостате при 28°C (+1).

2) освещение (x_2): образцы культивировались при постоянном белом свете 1440 лк (-1) и при постоянном фиолетовом свете 220 лк с длиной волны 380–780 нм (+1).

Таблица 2

Схема двухфакторного эксперимента

x_1	x_2
-1	-1
-1	+1
+1	-1
+1	+1

Раз в 7 дней в колбы с культивируемым штаммом добавлялось по 1 мл комплексного удобрения для аквариумных растений.

Каждые 2 дня из колб отбирались пробы и определялся прирост биомассы путем измерения оптической плотности образцов на спектрофотометре (UNICO) при длине волны 600 нм в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 5,070 мм. Начальная оптическая плотность всех образцов составляла 0,02 ОЕ. Общая продолжительность культивирования составила 81 сут.



III этап: математическая обработка данных.

Получение математической модели производилось с помощью методов статистического анализа по следующим формулам

Среднее значение в каждой точке плана:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^m \tilde{y}_i}{m}, \quad (1)$$

где m — число параллельных опыта.

Оценка погрешности в виде дисперсии:

$$S^2\{\tilde{y}_i\} = \frac{\sum_{j=1}^m (\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2}{m-1}. \quad (2)$$

Проверка гипотезы об однородности дисперсии (при помощи критерия Кохрена):

$$G = \frac{\max(S^2\{\tilde{y}_i\})}{\sum_{i=1}^N S^2\{\tilde{y}_i\}}. \quad (3)$$

Если $G_p < G_m$, то гипотеза об однородности дисперсии принимается.

Дисперсия воспроизводимости:

$$S_B^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S^2\{\tilde{y}_i\}}{N}, \quad (4)$$

где N — количество опытов.

Определение коэффициентов математической модели (регрессионной зависимости) $\hat{y} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2$:

$$a_0 = \frac{\sum \tilde{y}}{N}, \quad (5)$$

$$a_i = \frac{\sum \tilde{y}x_i}{N}, \quad (6)$$

$$a_{12} = \frac{\sum \tilde{y}x_1x_2}{N}. \quad (7)$$

Определение среднеквадратичного отклонения коэффициентов:

$$S\{a_k\} = \sqrt{\frac{S_B^2}{Nm}}. \quad (8)$$

Проверка гипотезы о статистической значимости коэффициента (критерий Стьюдента):

$$t = \frac{|a|}{S\{a\}}. \quad (9)$$

Если $t_k < t_m$, то гипотеза о статистической значимости коэффициента отвергается и данный коэффициент исключается из математической модели.

Нахождение \hat{y}_1 по математической модели:

$$\hat{y} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2. \quad (10)$$

Расчет дисперсии адекватности:

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{N-l} \sum (\tilde{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (11)$$

где l — число значимых коэффициентов в математической модели.

Расчетное значение критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_B^2}. \quad (12)$$

Если $F_p < F_{m'}$, то гипотеза об адекватности математической модели принимается.

Результаты и обсуждение

После обработки экспериментальных данных были получены 4 кривые роста штамма *Cyanobacterium* sp. В-1200 (средние значения двух параллельных экспериментов) при разных условиях культивирования (рис. 3). Кривая роста микроорганизмов представляет собой графическое изображение, иллюстрирующее различные фазы роста во времени.

120

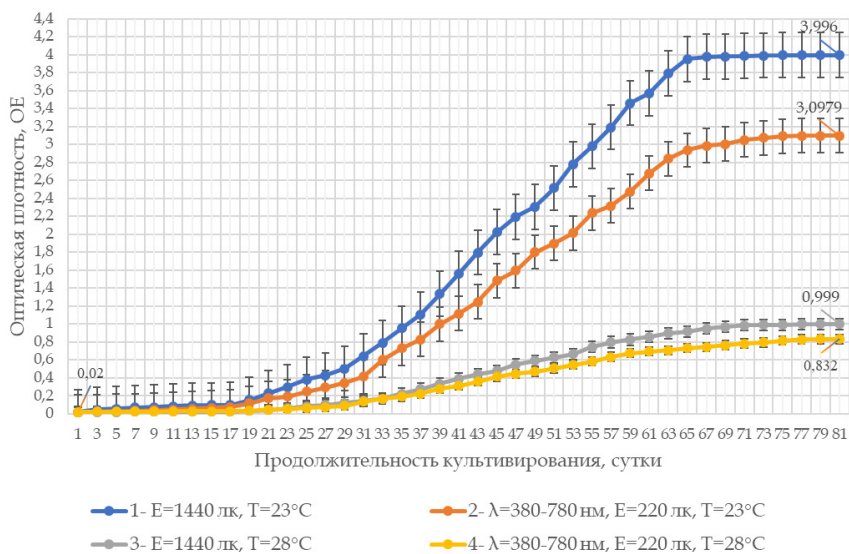


Рис. 3. Динамика роста биомассы *Cyanobacterium* sp. В-1200 при разных условиях культивирования

Исходя из рисунка 3 следует, что штамм продуцировал максимальное количество биомассы при освещении белым светом 1440 лк и при температуре 23 °С, значение спектрофотометра равнялось 3,996 оптических единиц (табл. 3).

Рост биомассы штамма *Cyanobacterium* sp. В-1200 при освещении фиолетовым светом 220 лк с длиной волны 380–780 нм и при температуре 23 °С был меньше в 1,29 раз по сравнению с первым образцом: 3,0979 оптических единиц.

Образец с условиями культивирования при температуре 28 °С и с освещением белым светом 1440 лк показал рост биомассы в 4 раза меньше, чем первый образец: 0,999 оптических единиц.

Штамм продуцировал минимальное количество биомассы при освещении фиолетовым светом 220 лк с длиной волны 380–780 нм и при температуре 28 °С. Прирост биомассы оказался в 4,8 раз меньше по сравнению с первым образцом: 0,832 оптических единиц.



**Прирост биомассы *Cyanobacterium* sp. В-1200
при разных условиях культивирования**

Образец	Начальная оптическая плотность, ОЕ	Конечная оптическая плотность, ОЕ	Прирост биомассы, ОЕ
1	0,02	3,996	3,976
2	0,02	3,0979	3,0779
3	0,02	0,999	0,979
4	0,02	0,832	0,812

На рисунках 4–7 представлены те же кривые роста штамма *Cyanobacterium* sp. В-1200 с обозначением фаз роста.

121

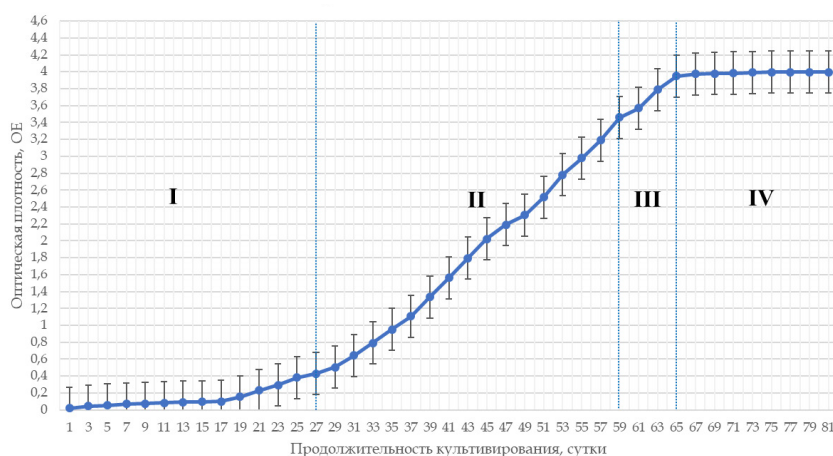


Рис. 4. Динамика роста биомассы *Cyanobacterium* sp. В-1200 при $E=1440$ лк, $T=23^\circ\text{C}$ (1 образец)

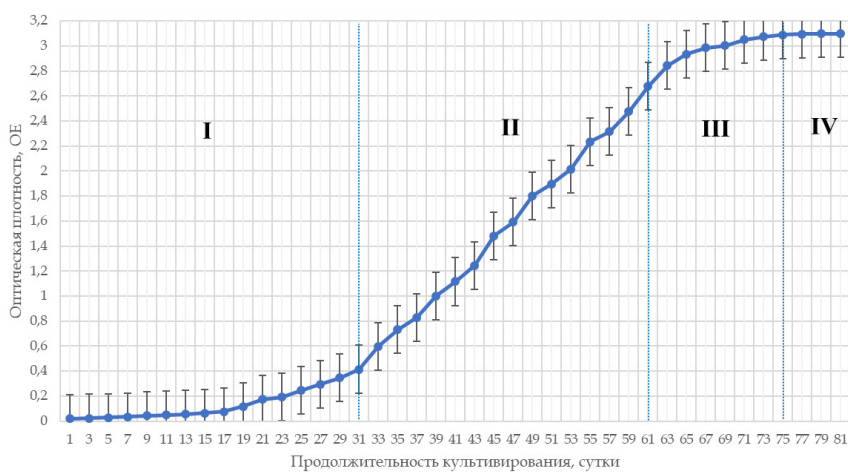


Рис. 5. Динамика роста биомассы *Cyanobacterium* sp. В-1200 при $\lambda=380-780$ нм, $E=220$ лк, $T=23^\circ\text{C}$ (2 образец)

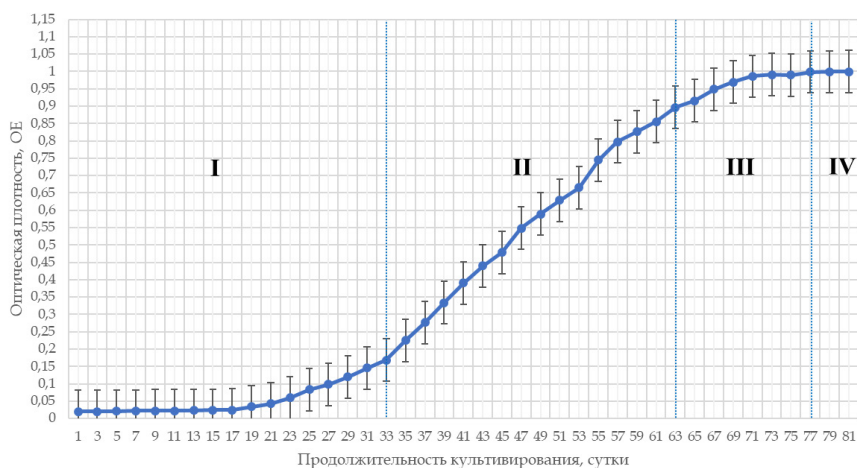


Рис. 6. Динамика роста биомассы *Cyanobacterium* sp. B-1200 при $E = 1440$ лк, $T = 28^\circ\text{C}$ (3 образца)

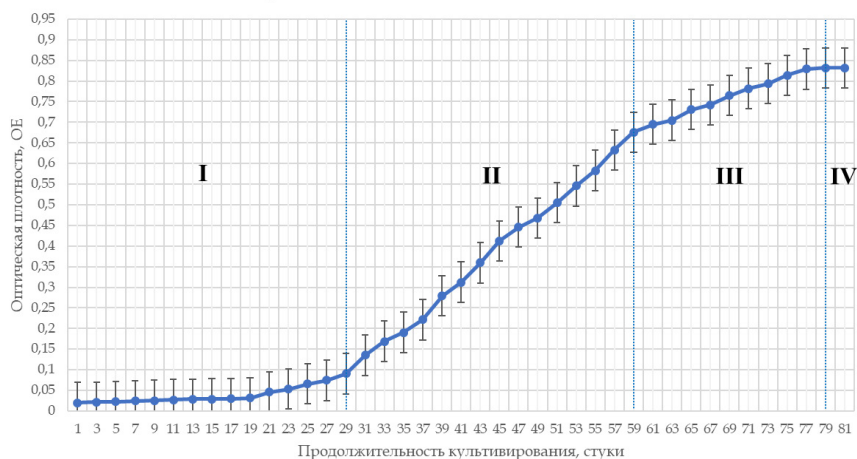


Рис. 7. Динамика роста биомассы *Cyanobacterium* sp. B-1200 при $\lambda = 380 - 780$ нм, $E = 220$ лк, $T = 28^\circ\text{C}$ (4 образца)

Фаза I, лаг-фаза, начинается с момента посева бактерий в свежую питательную среду. В этот период клетки адаптируются к условиям культивирования, растут без деления и достигают максимальной скорости роста. Лаг-фаза у образцов длилась 25, 31, 33 и 29 дней соответственно.

Фаза II, логарифмическая, или экспоненциальная, характеризуется максимальной скоростью деления бактерий. Она многостадийна: вначале бактерии растут в среде с избытком субстрата, затем его концентрация снижается, меняется активность ферментов и увеличивается содержание клеточных метаболитов. Самая продолжительная экспоненциальная фаза наблюдалась у первого образца — 32 дня, у остальных она длилась по 30 дней.



Фаза III, фаза замедления роста, наступает, когда скорость роста культуры снижается из-за истощения питательных веществ в среде или накопления продуктов обмена. Самая короткая фаза замедления роста была замечена также у первого образца — 6 дней, самая продолжительная — у четвертого — 20 дней. У остальных образцов эта фаза длилась 14 дней.

Фаза IV, стационарная фаза, характеризуется равновесием между отмирающими и новообразующимися клетками. Факторы, ограничивающие рост бактерий в предыдущей фазе, приводят к наступлению стационарной фазы. Прироста биомассы нет. В этот период наблюдается максимальное значение биомассы и общее количество клеток. Стационарная фаза раньше всего наступила у первого образца — на 65 день, позже всего — у четвертого — на 79 день, у второго образца — на 75, а у третьего — на 77 день.

Исходя из этих данных, мы можем видеть, что первый образец, культивированный при освещении белым светом 1440 лк и при температуре 23 °С, показал самый большой и быстрый прирост биомассы с самой продолжительной экспоненциальной фазой и с самой короткой фазой замедления роста. Вероятно, это связано с естественными условиями обитания данного штамма цианобактерий: в период их цветения в июле температура Балтийского моря составляет от +19 до +23 °С.

На основании статистического анализа с использованием формул 1–12 получено уравнение регрессионной зависимости прироста биомассы от температуры и степени освещенности:

$$\hat{y} = 2,23 - 1,32x_1 - 0,27x_2 + 0,18x_1x_2.$$

Согласно полученной зависимости, с увеличением значения x_1 (температуры) на единицу ожидаемое значение зависимой переменной уменьшается на 1,32. В то время как с увеличением значения x_2 (освещения) на единицу, ожидаемое значение зависимой переменной уменьшается на 0,27. То есть изменение температуры влияет на прирост биомассы в 5 раз больше, чем изменение освещения.

Заключение

Исследование влияния температурного режима и спектрального состава света на рост биомассы микроводорослей *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 позволило выявить оптимальные условия культивирования данного штамма. Результаты экспериментов показали, что наивысший прирост биомассы достигается при определенных уровнях освещенности и температуры. Особенно эффективным оказалось использование белого света интенсивностью 1440 лк и температуры 23 °С. Статистический анализ показал, что изменение температуры культивирования влияет на прирост биомассы в 5 раз больше, чем изменение освещения.

Анализ фаз роста микроводорослей показал, что каждая фаза характеризуется определенными особенностями, такими как адаптация к условиям культивирования, максимальная скорость деления и замедление роста из-за истощения питательных веществ. Эти результаты могут быть полезны для оптимизации процесса культивирования и увели-



чения производительности биомассы микроводорослей *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 в дальнейших исследованиях и промышленном производстве.

Работа выполнена при поддержке научного проекта НИРМА Университета ИТМО № 623096 «Научно-практические аспекты переработки возобновляемых источников сырья для получения биотоплива и продуктов с высокой добавленной стоимостью».

Список литературы

1. Ершова Э. С., Голубев И. В. Цианобактерии: биологические особенности и биотехнологические перспективы // Микробиология. 2018. Т. 87, №3. С. 259–270.
2. Грибина Л. М., Пащенко А. В. Развитие и применение цианобактерий в биотехнологии // Химия растительного сырья. 2016. №1. С. 5–16.
3. Eriksen N. T. Production of phycocyanin – a pigment with applications in biology, biotechnology, foods and medicine // Applied Microbiology and Biotechnology. 2008. Vol. 80, №1. P. 1–14.
4. Угаров Б. Н., Соколова А. Г. Влияние состава среды на накопление биомассы и продуктивность цианобактерий // Прикладная биохимия и микробиология. 2016. Т. 52, №2. С. 163–170.
5. Sarsekeyeva F., Zayadan B. K., Ussebaeva A. et al. Cyanofuels: biofuels from cyanobacteria. Reality and perspectives // Photosynthesis research. 2015. Vol. 125. P. 329–340.
6. Barsanti L., Gualtieri P. Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology. 2nd ed. Boca Raton, 2014.
7. Richmond A. Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Oxford, 2004.
8. Ларина Г. В., Смирнов А. А. Оптимизация условий культивирования микроводорослей // Химия и технология топлив и масел. 2019. №6. С. 12–19.
9. Лукашов Д. В., Петров А. М. Влияние температуры и освещения на рост и развитие микроводорослей // Биотехнология. 2017. Т. 33, №4. С. 23–31.
10. Мухина И. В., Маркова Ю. А. Температурный режим как фактор, определяющий продуктивность микроводорослей // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8, №2. С. 65–75.
11. Калинин А. А., Чернова Е. Н. Влияние температуры на физиологические процессы в клетках микроводорослей // Альгология. 2020. Т. 30, №1. С. 3–16.
12. Бурцев С. П., Ильина С. А. Адаптация микроводорослей к температурному стрессу // Прикладная биохимия и микробиология. 2019. Т. 55, №4. С. 321–331.
13. Shu C. H., Tsai C. C. Effects of light intensity and temperature on cell growth and lipid accumulation of microalgae *Chlorella vulgaris* // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2015. Vol. 50. P. 169–175.
14. Виноградова Г. А., Кузнецова Д. В. Влияние спектрального состава света на рост и развитие микроводорослей // Микробиология. 2017. Т. 86, №2. С. 185–193.
15. Иванов А. В., Соколова А. Г. Роль различных диапазонов света в фотосинтетической активности микроводорослей // Биофизика. 2018. Т. 63, №3. С. 457–465.
16. Самохина Е. П., Колесников А. В. Особенности культивирования цианобактерии *Cyanobacterium* sp. B-1200 при различных условиях // Микробиология. 2022. Т. 91, №4. С. 512–520.



17. Петрова Н. Е., Лисовская Д. А. Изучение влияния температуры и света на рост цианобактерий рода *Cyanobacterium* // Известия РАН. Серия биологическая. 2021. №3. С. 281–290.

18. Maeda H., Yoshimura T. Lipid production by microalgae and cyanobacteria under different CO₂ conditions // Bioresource Technology. 2018. Vol. 247. P. 524–532.

Об авторах

Виктория Владимировна Матыцина — асп., Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: vikaamtcn@mail.ru

Ксения Анатольевна Рухляда — асп., Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: ksn.ruh@gmail.com

Ольга Владимировна Кригер — д-р техн. наук, проф., Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: ovkriger@itmo.ru

ORCID: 0000-0002-1489-0716

S SPIN-код: 4981-1381

V. V. Matytsina, K. A. Rukhlyada, O. V. Kriger

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE REGIME AND SPECTRAL COMPOSITION OF LIGHT ON THE GROWTH OF BIOMASS OF THE CYANOBACTERIUM *CYANOBACTERIUM* SP. B-1200

National Research University ITMO, Saint Petersburg, Russia

Received 13 June 2024

Accepted 20 November 2024

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-8

To cite this article: Matytsina V. V., Rukhlyada K. A., Kriger O. V., 2024, The influence of temperature regime and spectral composition of light on the growth of biomass of the cyanobacterium *Cyanobacterium* sp. B-1200, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 114–126. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-8.

*Cyanobacteria are a promising source of biologically active compounds of various types and are of great interest for their use in biotechnological processes to obtain complexes or individual bioactive substances with different orientations. Selecting optimal cultivation conditions for cyanobacteria will contribute to the rapid accumulation of bacterial biomass and maximize the yield of biologically active substances. This study analyzes the influence of temperature and light spectral composition on the growth of the cyanobacterium *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 under stationary conditions. The strain was cultivated under different temperatures and light conditions, with regular optical density measurements to monitor biomass growth.*



A detailed analysis of the growth dynamics allowed the characterization of various phases of cyanobacteria development, including lag phase, exponential phase, slowing phase, and stationary phase. The results indicate that the duration of these phases varied depending on the cultivation conditions.

The data presented in this study can be used to optimize the cultivation process and enhance the biomass productivity of Cyanobacterium sp. IPPAS B-1200 in further research and industrial production. The findings related to the influence of light spectral composition are particularly valuable, as this parameter is often insufficiently studied when cultivating microalgae.

Keywords: blue-green algae, biomass, cyanobacteria, cultivation, growth phases

126

The authors

Victoria V. Matytsina, PhD student, National Research University ITMO, Russia.
E-mail: vikaamtcn@mail.ru

Ksenia A. Rukhdyada, PhD student, National Research University ITMO, Russia.
E-mail: ksn.ruh@gmail.com

Prof. Olga Vladimirovna Kriger, National Research University ITMO, Russia.
E-mail: ovkriger@itmo.ru
ORCID: 0000-0002-1489-0716
S SPIN-code: 4981-1381

С. Е. Пшеничников¹, А. В. Моторжина¹, А. А. Аникин¹,
Л. В. Панина^{1,2}, Е. В. Левада¹

ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ НАНО- И МИКРОМАТЕРИАЛОВ В КАЧЕСТВЕ АГЕНТА ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

² Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

Поступила в редакцию 01.10.2024 г.

Принята к публикации 15.01.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-9

127

Для цитирования: Пшеничников С. Е., Моторжина А. В., Аникин А. А., Панина Л. В., Левада Е. В. Потенциал использования композитных нано- и микро-материалов в качестве агента для биомедицинских применений // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 127–139. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-9.

*Развитие способов получения новых видов материалов создает предпосылки для разработки и совершенствования передовых методов биомедицины, бионанотехнологии и наномедицины. В связи с этим существует необходимость проведения оценки токсических характеристик материалов, а также разработки способов использования материалов в терапевтических целях. Проведено исследование цитотоксичности композитных наночастиц (нанозвезд) и микроматериалов (микродисков) по отношению к клеточным культурам Jurkat, Huh7 и мононуклеарным клеткам человека в условиях *in vitro*. Обнаружен концентрационно-зависимый цитотоксический эффект наночастиц. В тоже время микродиски не проявили токсический эффект на исследуемые клетки. Рассмотрен потенциал использования нано- и микроматериалов в качестве потенциальных инструментов для терапии опухолевых заболеваний, в частности, в виде инструмента для фототермической терапии.*

Ключевые слова: наночастицы, микродиски, фототермическая терапия, цитотоксичность, интернализация

Введение

Развитие современных методов синтеза нано- и микроматериалов создает возможности для получения композитных материалов, сочетающих в себе различные физические и структурные свойства, перспективные для решения специфических биомедицинских, биотехнологических и



технологических задач [1; 2]. Они обладают большим потенциалом для применения в сферах биоремедиации, строительства, химического катализа, энергетики и сельского хозяйства [3; 4].

Особое внимание заслуживает возможность применения композитных нано- и микроматериалов в биомедицине. Глобальные задачи, стоящие перед исследователями, такие как разработка противораковых инструментов, агентов, обладающих противомикробной активностью для замены антибиотиков, а также инструментов для наномедицины, требуют применения мультифункциональных и современных материалов. В тоже время токсичность материалов является основным лимитирующим фактором, снижающим возможности их применения.

Одним из самых перспективных типов наноматериалов являются наночастицы. Благодаря размерному эффекту, наночастицы обладают значительно большим соотношением поверхности к объему по сравнению с микро- и макроматериалами. Эта уникальная характеристика придает им выдающиеся каталитические, магнитные, механические, электрические, структурные и оптические свойства [5]. Увеличенное отношение площади поверхности к объему наночастиц позволяет присоединять к ним больше активных покрытий для адресной терапии при меньшей концентрации наночастиц. Покрытия, например полиэтиленгликоль или оксид кремния, могут увеличивать времена циркуляции наночастиц в кровотоке до того, как они будут захвачены иммунной системой [6]. Эти покрытия также уменьшают токсический и цитокиновый эффекты от введения наночастиц. С другой стороны, наночастицы могут быть покрыты иммуноцитными мембранами, способными связываться с мембранами выбранных клеток и вызывать на них усиленную иммунную реакцию [7; 8]. Помимо этого, микроматериалы также обладают меньшими токсическими характеристиками по сравнению с наноматериалами и большим потенциалом применения ввиду дешевизны производства.

Актуальным вызовом, с которым в настоящее время сталкиваются исследователи, является разработка методов и инструментов лечения опухолевых заболеваний человека, а также избирательной элиминации раковых клеток. Существующие методы имеют ряд ограничений, связанных с устойчивостью опухолевых клеток к действию лекарственных препаратов, ограниченной фармакокинетикой и неизбирательностью действия противораковых агентов, а также побочные эффекты инвазивного вмешательства во время лечения [9].

В связи с этим возрастает необходимость разработки новых противораковых инструментов и методов борьбы с опухолями, что требует применения передовых технологий и более глубокого понимания биологических процессов, раскрывающих потенциальные механизмы противоракового действия. Данный подход способствовал развитию таких направлений, как иммунотерапия, гормональная и генная терапия рака и создание новых нанопрепаратов.

Перспективным подходом к элиминации раковых клеток является фототермическая терапия (далее — ФТТ) с использованием нано- и/или микроматериалов. ФТТ основывается на способности материалов преобразовывать ближнее инфракрасное излучение в тепловое. Это



позволяет добиваться локального повышения температуры в целевых тканях, микроокружении опухоли или отдельных клетках, что может привести к гибели клеток-мишеней или разрушению опухоли [9; 10]. При этом локализация термического воздействия позволяет минимизировать потенциальные побочные эффекты на окружающие ткани. ФТТ также может повысить терапевтическую эффективность и фармакокинетические свойства препаратов, дополняя действие других методов лечения рака.

В тоже время эффективность ФТТ строго связана с фототермическими характеристиками нано- и микроматериалов, используемых в терапии. Успешность применения ФТТ зависит от оптического поглощения и эффективности фототермического преобразования используемых материалов на длинах волн, близких к окну оптической прозрачности биологических тканей [11]. Возможно усиление фототермической эффективности наночастиц за счет нанесения на них покрытий, например полидофамина, увеличивающих их оптическое поглощение [12]. Прочие ограничения связаны с потенциальной цитотоксичностью материалов и их химической стабильностью [10; 11].

В данной работе были использованы композитные наночастицы двух типов. Первый представляет собой золотые ядра диаметром около 20 нм, покрытые магнетитовой (Fe_3O_4) оболочкой, имеющей угольчатые выступы (далее — нанозвезды). Общий диаметр нанозвезд около 40–50 нм. Вторым типом частиц являются микродиски диаметром около 900–1000 нм, состоящие из слоя железа толщиной от 80 до 150 нм, покрытого с обеих сторон тонкими слоями золота толщиной около 10 нм каждый. Оба типа наночастиц представляют интерес для ФТТ за счет содержания золота, которое показывает хорошее поглощение в видимой и ИК области спектра. За счет наличия магнитных материалов в составе композитов, они также выступают перспективными кандидатами на роль наноагента в магнитомеханической терапии (далее — ММТ). В ММТ используется низкочастотное переменное магнитное поле для механического уничтожения мембран раковых клеток [13]. Кроме этого, наночастицы могут быть использованы и для магнитной доставки лекарственных средств.

Основная цель работы заключалась в исследовании возможности использования нано- и микроматериалов в качестве инструментов биомедицины, в частности, для применения в ФТТ и ММТ. Для этого были изучены цитотоксические свойства наночастиц, не имеющих специфических органических покрытий, и их влияние на морфологию раковых клеток. Осуществлен анализ результатов исследования на предмет проведения дальнейших модификаций наночастиц с помощью различных покрытий.

Материалы и методики исследования

В ходе экспериментов было использовано два вида материалов: композитные наночастицы, содержащие магнетит и золото, и микродиски. Характеристика физических и структурных свойств данных материалов была проведена ранее [14].



В опытах использовались клеточные линии Т-лимфобластного лейкоза (далее – Jurkat) и гепатокарциномы человека (далее – Huh7), а также мононуклеарные клетки (далее – МНК) периферической крови. Клетки Jurkat были получены из Российской коллекции клеточных культур (Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург, Россия). Клетки Huh7 были приобретены у CLS Cell Lines Service (GmbH, Германия). МНК были выделены из гепаринизированных образцов крови условно здоровых доноров методом градиентного центрифугирования на фиколле (разрешение №5 от 16 мая 2016 г.; Локальный этический комитет Инновационного парка Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта). Свежевыделенные клетки МНК впоследствии использовались в экспериментах наряду с клетками Jurkat и Huh7 четвертого и пятого клеточных пассажей соответственно.

Культивирование МНК и клеток Jurkat проводилось с использованием питательной среды RPMI-1640 (Gibco, США), содержащей 10 % фетальной бычьей сыворотки (Gibco, США) и 1 % раствора антибиотиков (пенициллин / стрептомицин, Life Technologies, США). Для культивирования клеток Huh7 использовалась питательная среда DMEM/F12 (Gibco, США), содержащая 10 % фетальной бычьей сыворотки (Gibco, США) и 1 % раствора антибиотиков (пенициллин / стрептомицин, Life Technologies, США). Культивирование осуществлялось в инкубаторе (Galaxy 170 S, New Brunswick, Германия) в постоянных условиях при 37 °С и во влажной атмосфере, содержащей 5 % CO₂. Для контроля клеточной жизнеспособности использовался автоматический счетчик клеток (Countess II FL Automated Cell Counter, Invitrogen, Сингапур) с применением трипанового синего красителя (Trypan blue 0,4 %, Invitrogen, США).

Для оценки цитотоксичности нанозвезд и микродисков использовался спектрофотометрический метод оценки клеточной жизнеспособности с применением красителя WST-1 (Thermo Scientific, США). Для этого суспензионные клетки (МНК и Jurkat) культивировались в количестве 50000 клеток на лунку, а адгезивные клетки (Huh7) в количестве 10000 на лунку. Объем питательной среды составлял 100 мкл на лунку. Культивирование проводилось в 96-луночных культуральных планшетах для суспензионных и адгезивных клеток (Thermo Scientific, США). В экспериментальных лунках питательная среда содержала нанозвезды или микродиски в различных концентрациях. Для адгезивных клеток проводили предварительное культивирование в течение 24 ч перед началом эксперимента, после чего старую питательную среду удаляли из лунок и добавляли свежую с тестовыми концентрациями нанозвезд и микродисков. После культивирования на протяжении 24 ч в каждую лунку добавляли 10 мкл раствора WST-1 и инкубировали в течение 45 мин. На следующем этапе измеряли оптическое поглощение растворов с помощью микропланшетного фотометра (Multiskan FC, Thermo Scientific, Китай). Полученные значения оптического поглощения контрольных и экспериментальных лунок пересчитывали на основе поглощения калибровочных лунок. Калибровочные лунки содержали питательную среду с различной концентрацией нанозвезд / микродисков (1, 5, 10, 50 или 100 мкг/мл) или без них. Статистический анализ проводили с примене-



нием однофакторного дисперсионного анализа (one-way ANOVA) с последующим тестом Ньюмена-Кейлса с поправкой Бонферрони, используя программное обеспечение GraphPad Prism 7.04 (Graph Pad Software Inc., США).

Для изучения воздействия нанозвезд на морфологию клеток использовалась интегрированная платформа прижизненной визуализации клеток Cell-IQ-v2 MLF (CM Technologies, Финляндия). Для этого клетки предварительно культивировали в 24-луночных планшетах в количестве 50 000 клеток на лунку на протяжении 24 ч, после чего осуществлялось удаление старой и внесение свежей питательной среды, содержащей нанозвезды. Питательная среда в контрольных лунках не содержала нанозвезд. После этого к экспериментальному планшету крепилась крышка для подключения к газовой системе прибора Cell-IQ. Затем планшет герметизировался в условиях стерильности и монтировался на предметный столик прибора. Через систему фильтров планшет подключался к системе подачи газа. По трубкам внутрь планшета подавалась газоздушная смесь, содержащая 95 % очищенного воздуха и 5 % CO₂. После чего осуществлялось культивирование в инкубационной камере системы прижизненной визуализации Cell-IQ в течение 24 ч. На протяжении всего этапа культивирования проводилась автоматическая съемка планшета системой Cell-IQ с периодичностью 22–45 мин в трех областях съемки для каждой лунки в режиме фазово-контрастной микроскопии. Для визуализации морфологических изменений клеток гепатокарциномы в каждой лунке выбирали три области съемки для фазово-контрастной микроскопии. Для каждой группы исследования визуализация осуществлялась в двух повторностях.

Исследование локализации и интернализации наночастиц в клетках Huh7 было проведено с использованием комплекса лазерной сканирующей микроскопии (LSM 700 Carl Zeiss, США). Для этого клетки культивировали в 96-луночных планшетах согласно методике, описанной выше. Окрашивание производили с помощью клеточных красителей DAPI (ядра клеток, Invitrogen, США) и Lysotracker Red DND-99 (лизосомы, Invitrogen, США). Полученные микроскопические изображения обрабатывались с применением программного обеспечения ImageJ 2.6 (НИН, США).

Результаты исследования и обсуждение

На первом этапе исследования был проведен анализ цитотоксичности нанозвезд с использованием клеточных линий Т-лимфобластного лейкоза Jurkat, гепатоцеллюлярной карциномы Huh7, а также мононуклеарных клеток периферической крови (рис. 1). Результаты показали, что нанозвезды оказали концентрационно-зависимое снижение жизнеспособности всех трех видов клеток. При этом, наибольшую чувствительность к токсическому воздействию продемонстрировали клетки Huh7: при концентрации 50 и 100 мкг/мл количество выживших клеток составило менее 3 %. Клетки Jurkat проявили наибольшую устойчивость — их жизнеспособность не была снижена при концентрации 10 мкг/мл, в отличие от двух других видов клеток. Интересно, что

жизнеспособность МНК при концентрации 10 мкг/мл была снижена сильнее, чем клеток Huh7 в таких же условиях. В тоже время при концентрации 100 мкг/мл МНК, наоборот, проявили более высокую жизнеспособность чем клетки Huh7. Различие в полученных результатах связано с особенностями культивирования адгезивных (Huh7) и суспензионных клеток (МНК и Jurkat). Внесение наночастиц в питательную среду может привести к их неравномерному распределению по объему экспериментальной лунки планшета, что сопровождается образованием градиента концентраций.

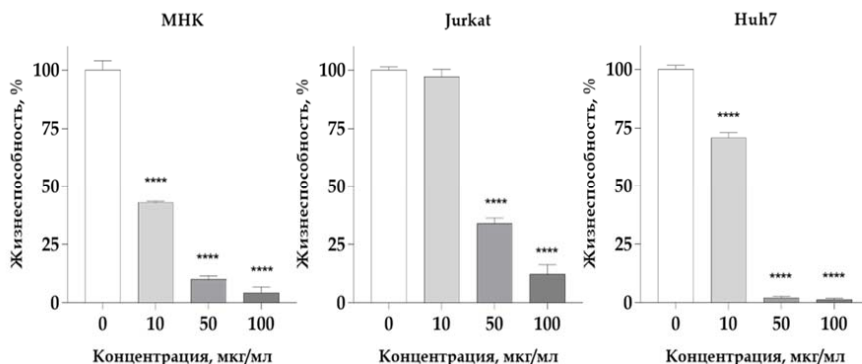


Рис. 1. Критическое снижение жизнеспособности клеток Jurkat, Huh7 и МНК после культивирования с нанозвездами в течение 24 ч: клетки культивировались с нанозвездами в концентрации 10 мкг/мл (10), 50 мкг/мл (50) или 100 мкг/мл (100); контрольные клетки культивировались без добавления наночастиц в питательную среду (0)

На следующем этапе исследования была проведена оценка воздействия нанозвезд на морфологию клеточной культуры Huh7. Согласно полученным изображениям (рис. 2), внесенные наночастицы были локализованы на поверхности клеток и поверхности лунок планшета, использованного для культивирования, а также образовывали отдельные внеклеточные агрегаты. Морфологические изменения были ярко выражены по прошествии 2 ч культивирования — происходило ошаривание клеток, служащее индикатором клеточного стресса и последующей гибели. По прошествии 8 ч культивирования последующих изменений клеточной морфологии не было обнаружено. Таким образом, основные изменения были индуцированы процессами острой цитотоксичности в первые 2–4 ч.

На данном этапе оставался открытым вопрос внутриклеточной локализации наночастиц. Для этого клетки Huh7 были культивированы в течение 24 ч с нанозвездами в концентрации 10 мкг/мл. Результаты показывают (рис. 3), что интернализованные наночастицы колокализуются с клеточными лизосомами. Согласно имеющимся литературным данным, подобные процессы способны привести к повреждению и пермеабиллизации лизосомальных мембран, утечке лизосомального содержимого и индукции процессов клеточной смерти [15].

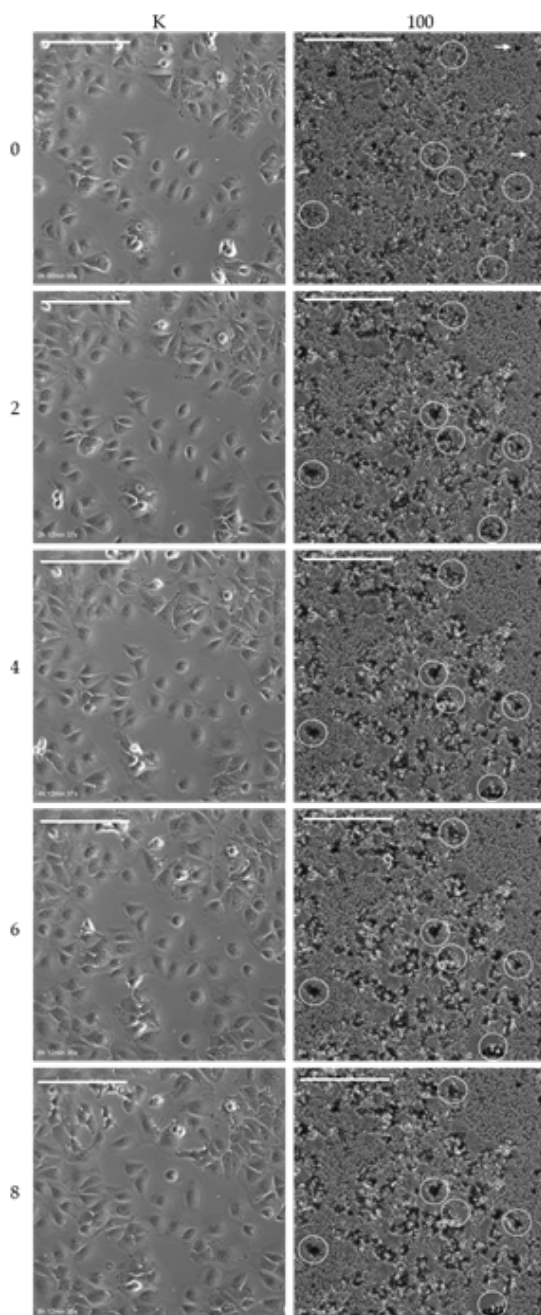


Рис. 2. Изменение морфологии клеточной культуры Huh7 после культивирования в присутствии нанозвезд при концентрации 100 мкг/мл: К – контроль; 100 – экспериментальные клетки; 0, 2, 4, 6, 8 – микроизображения после 0, 2, 4, 6, 8 ч культивирования соответственно. Кругами выделены отдельные клетки. Стрелками показаны отдельные агрегаты нанозвезд. Размер шкалы составляет 200 мкм

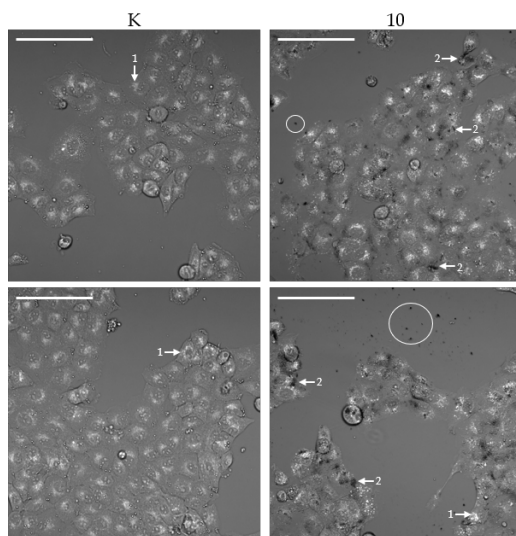


Рис. 3. Колокализация нанозвезд и лизосом в клетках Huh7 после культивирования в течение 24 ч: К – контроль; 10 – клетки, культивированные с нанозвездами при концентрации 10 мкг/мл; 1 – лизосомы; 2 – интернализированные нанозвезды в клетках.

Кругами обозначены внеклеточные агломераты нанозвезд.

Размер шкалы составляет 100 мкм

На следующем этапе исследования было выявлено, что микродиски не демонстрируют цитотоксический эффект (рис. 4). Подобные результаты связаны предположительно с отсутствием процессов интернализации микродисков в клетки, что одновременно может снижать потенциальное терапевтическое действие.

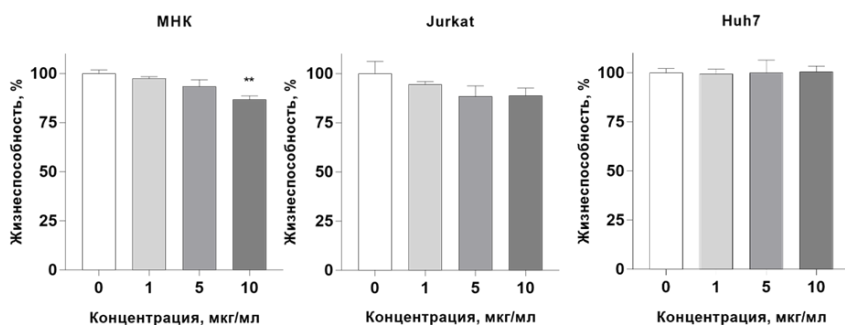


Рис. 4. Жизнеспособность клеток Jurkat, Huh7 и MNK после культивирования течение 24 ч с добавлением микродисков в питательную среду. Клетки подвергались воздействию трех концентраций микродисков: 1 мкг/мл (1), 5 мкг/мл (5) и 10 мкг/мл (10).

Данные нормализованы к значению жизнеспособности контрольных клеток (0)



Цитотоксический эффект наночастиц и микродисков может быть усилен в рамках ФТТ либо ММТ. Известно, что наночастицы после введения в кровотоки способны накапливаться преимущественно в опухолевых клетках посредством эффекта повышенной проницаемости и удержания (EPR-эффект) [16]. Использование инфракрасного излучения (в ходе ФТТ) или переменных магнитных полей (в ходе ММТ) [13] является перспективным подходом для направленной индукции клеточной смерти у опухолевых клеток.

После оценки цитотоксических характеристик нано- и микроматериалов было проведено исследование применимости материалов для ФТТ. В ходе экспериментов была использована установка для ФТТ, описанная ранее [17]. Раковые клетки Huh7 в растворах клеточной среды с наночастицами объемом 0,1 мл подвергались воздействию лазера с длиной волны 808 нм и мощностью 600 мВт на протяжении 20 мин. Для нанозвезд в концентрации 10 мкг/мл был обнаружен нагрев клеток до 45 °С, что соответствует значению, при котором начинает происходить клеточный апоптоз. Предварительные результаты показали снижение жизнеспособности клеток Huh7 до 20 %, что является хорошим показателем для малых концентраций наночастиц.

Есть несколько сценариев дальнейшей модификации нанозвезд с учетом их высокой фототермической производительности и высокой токсичности при концентрациях выше 10 мкг/мл. Поверхность нанозвезд может быть модифицирована полиэтиленгликолем для уменьшения их цитотоксичности, что позволит увеличить их концентрацию и увеличить локальный фототермический нагрев [6]. Другим вариантом является покрытие нанозвезд биомаркерами, такими как антитела, полидофамин или аптамеры, афинными к поверхности избранных раковых клеток. В таком случае накопление наночастиц будет вести к их повышенной токсичности для клетки, а дополнительное фототермическое или магнитомеханическое воздействие увеличит эффективность терапии. Однако в таком случае необходимо учитывать, что высокие терапевтические дозы приведут к повышенной вероятности некроза, который может вызывать сильную воспалительную реакцию [18; 19].

Микродиски показали низкую цитотоксичность вплоть до высоких концентраций, что должно быть обусловлено наличием золотого биоинертного наружного слоя. Однако к недостаткам микродисков можно отнести их коэрцитивность вследствие их большего размера [20]. Значительная остаточная намагниченность магнитных микрочастиц приводит к их быстрой агломерации в растворе. В таком случае во избежание закупоривания малых сосудов при введении микрочастиц в ткани необходимо увеличение внешней немагнитной фазы микрочастиц. Это возможно достичь с помощью увеличения толщины внешнего золотого слоя. Однако в таком случае значительно повышается их общая масса при сохранении примерно той же магнитной восприимчивости, что оказывает негативный эффект для проведения ММТ, так как увеличивается минимально необходимая напряженность магнитного поля для достижения магнитомеханического эффекта на наночастицы. Другим вариантом является покрытие микродисков высокомолекулярным полиэтиленгликолем.



Для увеличения воспроизводимого и выраженного терапевтического (противоракового) эффекта также может потребоваться сочетание нескольких методик при использовании одного типа наночастиц. При проведении ФТТ и/или ММТ на живых организмах необходимо учитывать ограничения интенсивности взаимодействия, лазерного или магнитного, связанные с требованиями безопасности и охраны здоровья. Дополнительно накладывается ограничение на предельные концентрации вводимых магнитных наночастиц, которые связаны и с их цитотоксическим воздействием, и с эффектами агломерации. Для получения желаемого терапевтического эффекта лучше всего использовать наночастицы в низкой концентрации (до 100 мкг/мл) и с высокой производительностью, которая может быть получена за счет как фототермического, так и магнитного воздействия. Золотые наночастицы в силу их крайне низкой магнитной восприимчивости не могут применяться в терапиях, использующих только магнитные поля. А магнитные наночастицы, как правило, имеют низкую фототермическую производительность в силу их низкого оптического поглощения в области ИК излучения. Таким образом, при использовании композитов, включающих в себя как золотую, так и магнитную части может быть достигнут необходимый терапевтический эффект при меньших концентрациях вводимых наночастиц.

Заключение

В данной работе исследована применимость наночастиц на примере нанозвезд и микроматериалов, на примере микродисков как потенциальных инструментов для биомедицины. Нанозвезды, состоящие из золотого ядра и магнетитового покрытия, показывают повышенный цитотоксический эффект при концентрациях более 10 мкг/мл. Однако в то же время они способны демонстрировать достаточную для вызова клеточной смерти фототермическую эффективность уже при 10 мкг/мл. Микродиски не показывают значимую цитотоксичность вплоть до концентрации 100 мкг/мл, однако для использования в противораковых терапиях их поверхность должна быть дополнительно модифицирована для предотвращения агломерации под воздействием остаточной намагниченности. Полученные данные о цитотоксичности расширяют представления о наночастицах и микродисках, как о потенциальных инструментах для фототермической и магнитомеханической терапий, а также их комбинации, создавая предпосылки для развития будущих исследований в области терапии рака.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-20158.

Список литературы

1. Khan S., Mansoor S., Rafi Z. et al. A review on nanotechnology: Properties, applications, and mechanistic insights of cellular uptake mechanisms // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 348, №9. P. 118008.



2. Akgöl S., Ulucan-Karnak F., Kuru C.İ. et al. The usage of composite nanomaterials in biomedical engineering applications // *Biotechnology and Bioengineering*. 2021. Vol. 118, №8. P. 2906–2922.
3. Ajith M.P., Aswathi M., Priyadarshini E. et al. Recent innovations of nanotechnology in water treatment: A comprehensive review // *Bioresource Technology*. 2021. Vol. 342, №September. P. 126000.
4. Kuda A., Yadav M. Opportunities and challenges of using nanomaterials and nanotechnology in architecture: An overview // *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd., 2022. Vol. 65. P. 2102–2111.
5. Selmani A., Kovačević D., Bohinc K. Nanoparticles: From synthesis to applications and beyond // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 303, №December 2021.
6. Gloria S.S., Kang G.J., Ewing-Nelson S.R. et al. PEGylation as a strategy for improving nanoparticle-based drug and gene delivery // *Physiology & behavior*. 2018. Vol. 176, №1. P. 139–148.
7. Gong P., Wang Y., Zhang P. et al. Immunocyte membrane-coated nanoparticles for cancer immunotherapy // *Cancers*. 2021. Vol. 13, №1. P. 1–17.
8. Liu H., Miao Z., Zha Z. Cell membrane-coated nanoparticles for immunotherapy // *Chinese Chemical Letters*. 2022. Vol. 33, №4. P. 1673–1680.
9. Giri P.M., Banerjee A., Layek B. A Recent Review on Cancer Nanomedicine // *Cancers*. 2023. Vol. 15, №8.
10. Duan S., Hu Y., Zhao Y. et al. Nanomaterials for photothermal cancer therapy // *RSC Advances*. Royal Society of Chemistry. 2023. Vol. 13, №21. P. 14443–14460.
11. Hemmer E., Benayas A., Légaré F. et al. Exploiting the biological windows: Current perspectives on fluorescent bioprobes emitting above 1000 nm // *Nanoscale Horizons*. 2016. Vol. 1, №3. P. 168–184.
12. Khlebtsov B.N., Burov A.M., Khlebtsov N.G. Polydopamine coating decreases longitudinal plasmon of Au nanorods: Experiment and simulations // *Applied Materials Today*. 2019. Vol. 15. P. 67–76.
13. Naud C., Thébaud C., Carrière M. et al. Cancer treatment by magneto-mechanical effect of particles, a review // *Nanoscale Advances*. 2020. Vol. 2, №9. P. 3632–3655.
14. Muzzi B., Albino M., Gabbani A. et al. Star-Shaped Magnetic-Plasmonic Au@Fe₃O₄Nano-Heterostructures for Photothermal Therapy // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2022. Vol. 14, №25. P. 29087–29098.
15. Uzhytchak M., Smolková B., Lunova M. et al. Lysosomal nanotoxicity: Impact of nanomedicines on lysosomal function // *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2023. Vol. 197. P. 114828.
16. Golombek S.K., May J.N., Theek B. et al. Tumor targeting via EPR: Strategies to enhance patient responses // *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2018. Vol. 130. P. 17–38.
17. Motorzhina A.V., Pshenichnikov S.E., Anikin A.A. et al. Gold/cobalt ferrite nanocomposite as a potential agent for photothermal therapy // *Journal of Biophotonics*. 2024. Vol. 17, №7. P. 1–17.
18. Davidovich P., Kearney C.J., Martin S.J. Inflammatory outcomes of apoptosis, necrosis and necroptosis // *Biological Chemistry*. 2014. Vol. 395, №10. P. 1163–1171.
19. Mohammadinejad R., Moosavi M.A., Tavakol S. et al. Necrotic, apoptotic and autophagic cell fates triggered by nanoparticles // *Autophagy*. 2019. Vol. 15, №1. P. 4–33.
20. Sung Lee J., Myung Cha J. et al. Magnetic multi-granule nanoclusters: A model system that exhibits universal size effect of magnetic coercivity // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5, №1. P. 12135.



Об авторах

Станислав Евгеньевич Пшеничников — мл. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SPshenichnikov1@kantiana.ru

ORCID: 0000-0002-6843-154X

SPIN-код: 8991-3685

Анна Владимировна Моторжина — асп., мл. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AMotorzhina1@kantiana.ru

ORCID: 0000-0001-7419-3392

SPIN-код: 3956-0949

Антон Андреевич Аникин — PhD, науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AAAnikin@kantiana.ru

ORCID: 0000-0002-8739-7260

SPIN-код: 1247-8117

Лариса Владимировна Панина — д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия; Университет науки и технологий МИСИС, Россия.

E-mail: LPanina@kantiana.ru

ORCID: 0000-0003-1252-8606

SPIN-код: 9150-0240

Екатерина Викторовна Левада — PhD, заведующий лабораторией биомедицинских приложений, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: ELevada@kantiana.ru

ORCID: 0000-0002-6369-2118

SPIN-код: 1268-0361

*S. E. Pshenichnikov¹, A. V. Motorzhina¹, A. A. Anikin¹,
L. V. Panina^{1,2}, K. V. Levada¹*

**PERSPECTIVES OF USING OF COMPOSITE NANO-
AND MICROMATERIALS AS AGENTS
FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS**

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

² MISiS University of Science and Technology, Moscow, Russia

Received 01 October 2024

Accepted 15 January 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-9



To cite this article: Pshenichnikov S.E., Motorzhina A.V., Anikin A.A., Panina L.V., Levada K.V., 2025, Perspectives of using of composite nano- and micromaterials as agents for biomedical applications, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 127–139. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-9.

The development of methods for obtaining new types of materials creates the groundwork for the development and improvement of advanced techniques in biomedicine, bionanotechnology, and nanomedicine. In this context, there is a need to assess the toxicological characteristics of materials as well as develop methods for their therapeutic use. A study was conducted to evaluate the cytotoxicity of composite nanoparticles (nanostars) and micromaterials (microdisks) against Jurkat, Huh7 cell cultures, and human mononuclear cells in in vitro conditions. A concentration-dependent cytotoxic effect of nanoparticles was observed. At the same time, microdisks did not exhibit any toxic effects on the studied cells. The potential of using nano- and micromaterials as prospective tools for cancer therapy, specifically for photothermal therapy, was also discussed.

139

Keywords: nanoparticles, microdiscs, photothermal therapy, cytotoxicity, internalization

The authors

Stanislav E. Pshenichnikov, Junior Research Associate, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SPshenichnikov1@kantiana.ru

ORCID: 0000-0002-6843-154X

SPIN-код: 8991-3685

Anna V. Motorzhina, PhD student, Junior Research Associate, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AMotorzhina1@kantiana.ru

ORCID: 0000-0001-7419-3392

SPIN-код: 3956-0949

Anton A. Anikin, PhD, Research Associate, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AAAAnikin@kantiana.ru

ORCID: 0000-0002-8739-7260

SPIN-код: 1247-8117

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.

E-mail: LPanina@kantiana.ru

ORCID: 0000-0003-1252-8606

SPIN-код: 9150-0240

Kateryna V. Levada, PhD, Head of the Laboratory of Biomedical Applications, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia

E-mail: ELevada@kantiana.ru

ORCID: 0000-0002-6369-2118

SPIN-код: 1268-0361

Н. Д. Шамаев, П. А. Курынцева, С. Ю. Селивановская

ФОРМИРОВАНИЕ ГРУПП РОСТА У МИКРОВОДОРОСЛЕЙ РОДА *CHLORELLA* В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЪЕМА ВНОСИМОЙ БАЗОВОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Поступила в редакцию 05.07.2024 г.

Принята к публикации 20.10.2024 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-10

140

Для цитирования: Шамаев Н. Д., Курынцева П. А., Селивановская С. Ю. Формирование групп роста у микроводорослей рода *Chlorella* в зависимости от объема вносимой базовой питательной среды и температуры // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 140–146. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-9.

Технология производства микроводорослей в инкубаторах включает в себя оптимизацию условий культивирования под определенный идентифицированный штамм. Однако при работе с образцами, выделенными из объектов окружающей среды, приходится иметь дело с неидентифицированными штаммами и соблюдение условий культивирования затруднено. В данном исследовании было использовано 10 изолятов микроводорослей рода *Chlorella*, которые в последующем были разделены на 3 группы роста в зависимости от объема вносимой базовой питательной среды и температуры. Согласно литературным данным, неидентифицированные изоляты могут принадлежать новому виду *Chlorella* sp. или новому лектотипу *C. vulgaris*.

Ключевые слова: изоляты микроводорослей, *Chlorella* sp., группы роста, базовая питательная среда

Введение

Одной из микроводорослей, выращиваемых для использования в аквакультуре, является род *Chlorella*, которая представляет собой ценный корм для беспозвоночных и рыб. Пресноводная хлорелла производится в больших количествах для пищевых продуктов. Обычная технология получения микроводорослей в инкубаторах представляет собой многоступенчатую резервную систему, при которой культуры выращиваются и используются как инокуляты при культивировании в промышленных масштабах. При этом условия культивирования настраиваются производителем под определенный идентифицированный штамм. Однако при работе с местными изолятами, которые не прошли генетическую идентификацию, на этапе перед началом наращивания в больших масштабах исследователи прибегают к менее сложной, но эффективной вертикальной полунепрерывной системе периодического культивирования, которая экономит пространство инкубатора. Рост и продукция



клеточной массы обычно увеличиваются при оптимальных параметрах скорости аэрации, концентрации CO_2 в среде и освещенности площади поверхности культуры [1]. Ранее исследование микроводорослей на аквакультуре *Chlorella vulgaris* (с соблюдением условий роста и продукции клеточной массы) выявило улучшение качества и эффективности использования ресурсов, которое привело к увеличению продуктивности биомассы [2]. Целью настоящего исследования является изучение групп роста у микроводорослей рода *Chlorella* в зависимости от объема вносимой базовой питательной среды и температуры.

Материалы и методы

В настоящем исследовании было использовано 9 генетически неидентифицированных изолятов (*Chlorella* sp. B1, *Chlorella* sp. B2, *Chlorella* sp. B3, *Chlorella* sp. B4, *Chlorella* sp. B5, *Chlorella* sp. B6, *Chlorella* sp. B7, *Chlorella* sp. B8, *Chlorella* sp. B9) выделенных из водоемов Казани (Республика Татарстан, Россия) и один идентифицированный изолят (*C. vulgaris* Ch-010-09). Перед изучением групп роста микроводоросли были наращены до концентрации микроводоросли в инокуляте 0,1–0,2 ОЕ с использованием ранее апробированных условий [2]. Штаммы *Chlorella* были идентифицированы авторами только классическим методом с описанием морфологических характеристик и использованием световой микроскопии [3]. Выращивание изолятов микроводорослей рода *Chlorella* происходило в лабораторных фотобиореакторах с применением коммерческого удобрения «Фертика универсал» (гумат – 18 %, N – 8 %, P_2O_5 – 8 %, K_2O – 8 %, комплекс микроэлементов) путем растворения 5 г удобрения на 1 л дистиллята, при начальной концентрации микроводоросли в инокуляте 0,1–0,2 ОЕ, освещенностью 52 Вт, при 24 °С, 28 °С и 32 °С, в 2 л БПС, с подачей углекислого газа 0,3 г/л/день и постоянным перемешиванием 6 rpm. Культуру микроводорослей выращивали в течение четырех дней. На четвертый день измерили оптическую плотность при длине волны 680 нм на спектрофотометре Ultrospec 3300 pro UV/Visible UV (Amersham Biosciences, Кембридж, Великобритания). Измерение значения pH проводили с использованием стационарного pH-метра Starter 2100 pH Bench pH Meter ST2100-F RU (Ohaus, Шанхай, Китай). Измерение температуры осуществлялось с использованием термометра для аквариумов. Выращивание культур микроводорослей проводили в двух повторностях. Каждое измерение выполнялось трижды, а среднее значение экспериментальных полученных результатов рассчитывались с помощью MS-Excel. Минимальный объем вносимого удобрения (далее – $V_{\text{уд}}$) был определен исходя из роста отдельных изолятов рода *Chlorella* [4]. Увеличение $V_{\text{уд}}$ на объем жидкости проводилось до максимального значения pH в растворе (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики базовой питательной среды

pH	5,0	5,1	5,5	5,6	6,0	6,1	6,5	6,6	7,0	7,1	7,5	7,6	8,0	8,1	8,5	8,6	9,0
$V_{\text{уд}}$ (гр)	5,5	5,6	6,1	6,2	6,6	6,7	7,2	7,3	7,7	7,8	8,3	8,4	8,8	9,0	9,4	9,5	10,0

Результаты и обсуждение

Все клетки изолятов микроводорослей рода *Chlorella* имели сферическую или субсферическую формы (рис. 1). Визуально у всех изолятов отсутствовали зооспоры.

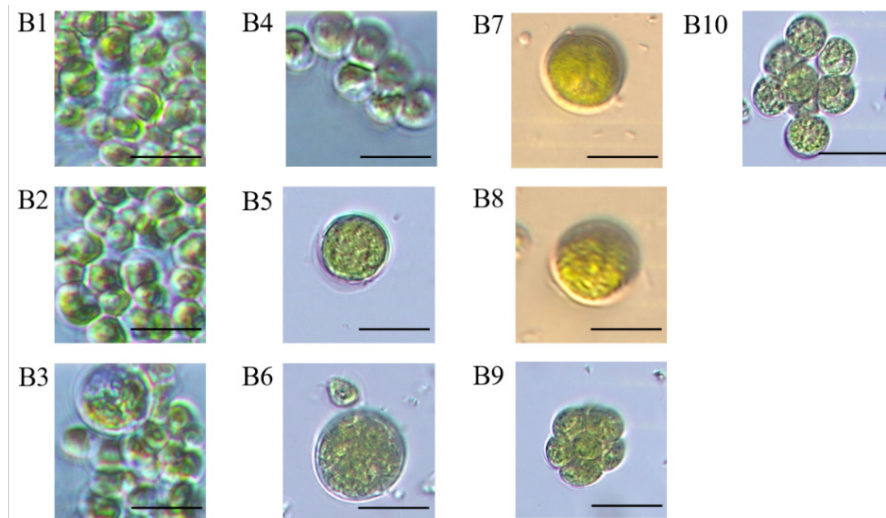


Рис. 1. Морфология изолятов микроводорослей рода *Chlorella*

Было выявлено различие в скорости роста изолятов *Chlorella* на 4-й день в зависимости от $V_{уд}$ (рис. 2). Кривая роста имеет тенденцию к увеличению в диапазонах pH 5,6–7,0 (*Chlorella* sp. B1, B4, B5, B6, B7, B8 и B9), 6,6–8,0 (*Chlorella* sp. B2, B3) и 7,1–8,5 (*C. vulgaris* Ch-010-09). При повторном культивировании была отмечена разница в скорости роста изолятов *Chlorella* в зависимости от температуры: 24 °C (*Chlorella* sp. B1, B3, B4) и 24–28 °C (*Chlorella* sp. B2, B5, B6, B7, B8 и B9) (рис. 3).

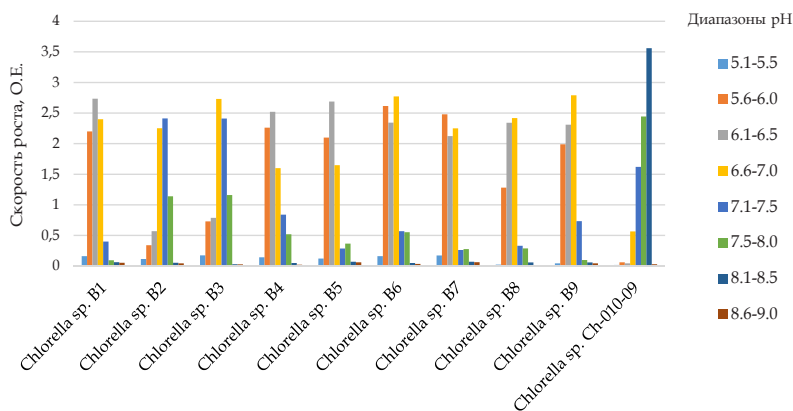


Рис. 2. Средние значения оптической плотности при культивировании изолятов микроводорослей рода *Chlorella* в зависимости от объема вносимого удобрения

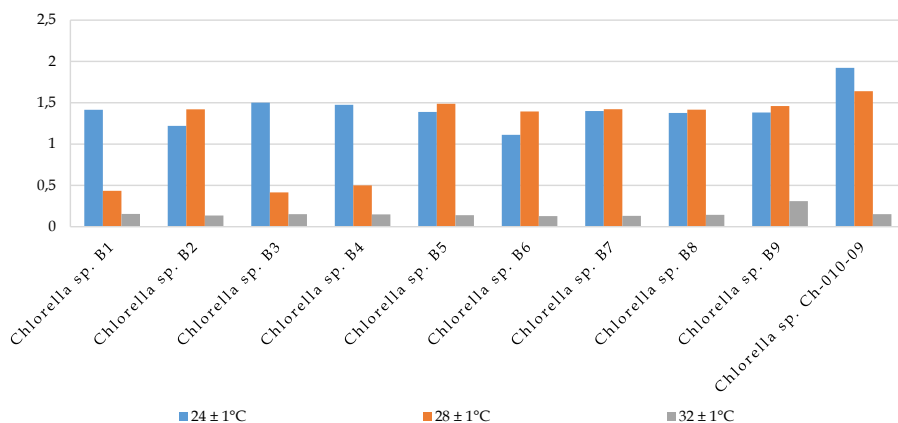


Рис. 3. Средние значения оптической плотности при культивировании изолятов микроводорослей рода *Chlorella* в зависимости от температуры

Был проведен поиск данных по рН интервалам, благоприятным для различных видов *Chlorella* sp., с целью предположения принадлежности изолятов, использованных в настоящем исследовании. В списке указаны виды, встречающиеся на территории Европейских стран, со схожим диапазоном размеров (2–10 мкм), адаптированные к жизни в пресноводной воде или широкому спектру солености воды (табл. 2).

Таблица 2

Данные о распространении, форме и чувствительности к солености воды различных видов *Chlorella* sp. из литературных источников

Распространение	Адаптация вида к спектру солености воды	Вид	Диапазон рН	Источник
Повсеместно	Пресноводный	<i>C. vulgaris</i>	7,5–8,5	[5]
Повсеместно	Эвригалинный	<i>C. autotrophica</i>	6,1–8,0	[6]
Повсеместно	Эвригалинный	<i>C. coloniales</i>	7,1–8,0	[7]
Европа	Пресноводный	<i>C. pituita</i>	7,1–7,5	[8]
Европа	Пресноводный	<i>C. pyrenoidosa</i>	5,1–5,5	[9]
Повсеместно	Пресноводный	<i>C. sorokiniana</i>	6,1–7,5	[10]
Европа	Пресноводный	<i>C. minutissima</i>	7,5–8,0	[11]
Европа	Пресноводный	<i>C. elongata</i>	7,1–7,5	[8]
Европа	Пресноводный	<i>C. protothecoides</i>	6,1–8,0	[12]
Европа	Пресноводный	<i>C. luteoviridis</i>	6,1–7,5	[13]

Согласно сформированным группам роста у микроводорослей рода *Chlorella* в зависимости от объема вносимой базовой питательной среды и температуры роста можно выделить 3 группы: 1) растущие при 24°C в объеме вносимого удобрения в интервале от 6,1 до 7,7 г (*Chlorella* sp. B1 и B4); 2) растущие при 24°C в объеме вносимого удобрения в интервале от 7,3 до 8,8 г (*Chlorella* sp. B2 и B3); 3) растущие при 24 и 28°C в объеме вносимого удобрения в интервале от 6,1 до 7,7 г (*Chlorella* sp. B5, B6, B7, B8 и B9).



Согласно данным из таблицы 2, изоляты микроводорослей *Chlorella* sp. с B1 по B9 относятся к *C. autotrophica*, *C. luteoviridis* или *C. protothecoides*, но не *C. sorokiniana*, так как характерные свойства *C. sorokiniana* – это рост с получением высоких показателей биомассы при высоких температурах [13]. Если учесть, что температура 32 °С не выявила роста изолятов, то они не могут принадлежать *C. sorokiniana*. Контрольный образец *C. vulgaris* Ch-010-09 соответствует своему диапазону pH 7,1–8,5 г. В связи с тем, что, согласно литературным данным, *C. lewinii*, *C. rotunda*, *C. volutis*, *C. heliozoae* и *C. variabilis* не распространены в зоне настоящего исследования и не адаптированы к жизни в пресноводной воде или широкому спектру солености воды, то изоляты с B1 по B9 могут принадлежать новому виду *Chlorella* sp. и новому лектотипу *C. vulgaris*. Дальнейшая генетическая идентификация позволит подтвердить или опровергнуть полученные данные.

Заключение

В исследовании было использовано 10 изолятов микроводорослей рода *Chlorella*, в том числе 9 неидентифицированных изолятов и 1 идентифицированный контрольный образец *C. vulgaris* Ch-010-09. Было выявлено 3 группы роста в зависимости от объема вносимой базовой питательной среды и температуры: группа с ростом при 24 °С в объеме вносимого удобрения в интервале от 6,1 до 7,7 г (*Chlorella* sp. B1 и B4); группа с ростом при 24 °С в объеме вносимого удобрения в интервале от 7,3 до 8,8 г (*Chlorella* sp. B2 и B3) и группа с ростом при 24 и 28 °С в объеме вносимого удобрения в интервале от 6,1 до 7,7 г (*Chlorella* sp. B5, B6, B7, B8 и B9). Неидентифицированные изоляты могут принадлежать новому виду *Chlorella* sp. или новому лектотипу *C. vulgaris*.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Шамаев Н.Д., Курынцева П.А., Селивановская С.Ю. Культивирование изолятов микроводорослей *Chlorella* sp. с оценкой продуктивности биомассы // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2024. №4. С. 135–145. EDN: DYXJBA.
2. Azov Y. Effect of pH on Inorganic Carbon Uptake in Algal Cultures // Appl Environ Microbiol. 1982. Vol. 43 (6). P. 1300–1306. doi: 10.1128/aem.43.6.1300-1306.1982.
3. Komarek J., Fott B. Chlorophyceae (Grünalgen), Ordnung Chlorococcales // Nordic journal of botany. 1983. Vol. 5 (1). doi: 10.1111/j.1756-1051.1985.tb02080.x.
4. Makwin D. M., Obiora A. O., Ike K. E. et al. Biodiesel production by microalgal species isolated from water samples in Keffi, Nasarawa state, Nigeria // International Journal of Science and Technology Research Archive. 2023. Vol. 4 (1). P. 73–82. doi: 10.53771/ijstra.2023.4.1.0165.



5. Yadav N., Singh D.P. Photosynthetic efficiency and compositional alterations in microalgae *Chlorella vulgaris* in response to changes in the pH condition // *Vegetos*. 2021. Vol. 34. P. 119–126. doi: 10.1007/s42535-021-00186-1.
6. Su D. Biological toxicity of five metal ions on marine algae // *Applied Mechanics and Materials* 2013. Vol. 295–298. P. 17–20. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.295-298.17.
7. Kamyar Y., Jalil J. Optimization of heavy metal biosorption onto freshwater algae (*Chlorella coloniales*) algae cells using response surface methodology (RSM) // *Chemosphere*. 2018. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.205.
8. Krivina E. S., Temraleeva A. D. Identification Problems and Cryptic Diversity of *Chlorella*-Clade Microalgae (Chlorophyta) // *Microbiology*. 2020. Vol. 89. P. 720–732. doi: 10.1134/S0026261720060107.
9. Samejima H., Myers J. On the heterotrophic growth of *Chlorella pyrenoidosa* // *Journal of General Microbiology*. 1958. Vol. 18 (1). P. 107–117. doi: 10.1099/00221287-18-1-107.
10. Kumar K., Dasgupta C.N., Das D. Cell growth kinetics of *Chlorella sorokiniana* and nutritional values of its biomass // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 167. P. 358–366. doi: 10.1016/j.biortech.2014.05.118.
11. Tang H., Chen M., Garcia M. E. D. et al. Culture of microalgae *Chlorella minutissima* for biodiesel feedstock production // *Biotechnology and Bioengineering*. 2011. Vol. 108 (10). P. 2280–2287. doi: 10.1002/bit.23160.
12. Day A. G., Brinkmann D., Franklin S. et al. Safety evaluation of a high-lipid algal biomass from *Chlorella protothecoides* // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2009. Vol. 55 (2). P. 166–180. doi: 10.1016/j.yrtph.2009.06.014.
13. Conrad W., Kufferath H. Additions à la flore algologique de Belgique // *Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique*. 1913. Vol. 49. P. 293–335.
14. Kessler E., Huss V. A. R. Comparative physiology and biochemistry and taxonomic assignment of the *Chlorella* (Chlorophyceae) strains of the culture collection of the university of Texas at Austin // *Journal of Phycology*. 1992. Vol. 28 (4). P. 550–553. doi: 10.1111/j.0022-3646.1992.00550.x.

Об авторах

Николай Дмитриевич Шамаев — канд. биол. наук, доц., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия.

E-mail: nikolai.shamaev94@mail.ru

ORCID: 0000-0002-0575-3760

SPIN-код: 2602-2764

Полина Александровна Курынцева — канд. биол. наук, доц., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия.

E-mail: polinazwerewa@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9274-7077

SPIN-код: 7028-8557

Светлана Юрьевна Селивановская — д-р биол. наук, проф. Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия.

E-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

ORCID: 0000-0001-6379-7166

SPIN-код: 4867-6900



N. D. Shamaev, P. A. Kuryntseva, S. Yu. Selivanovskaya

**CULTIVATION OF LOCAL MICRALGAE ISOLATES
WITH ASSESSMENT OF BIOMASS PRODUCTIVITY**

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Received 05 July 2024

Accepted 20 October 2024

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-10

146

To cite this article: Shamaev N. D., Kuryntseva P. A., Selivanovskaya S. Yu., 2025, Cultivation of local micralgae isolates with assessment of biomass productivity, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 140–146. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-10.

*The technology for microalgae production in incubators involves optimizing cultivation conditions for a specific identified strain. However, when working with samples isolated from environmental objects, it is often necessary to deal with unidentified strains, making it challenging to maintain optimal cultivation conditions. In this study, 10 isolates of *Chlorella* species were used, which were subsequently divided into 3 growth groups based on the volume of the basic culture medium and temperature. According to the literature, these unidentified isolates may belong to a new *Chlorella* species or a new lectotype of *C. vulgaris*.*

Keywords: microalgae isolate, *Chlorella* sp., growth groups, basic nutrient medium

The authors

Dr Nikolai D. Shamaev, Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.

E-mail: nikolai.shamaev94@mail.ru

ORCID: 0000-0002-0575-3760

SPIN-code: 2602-2764

Dr Polina A. Kuryntseva, Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.

E-mail: polinazwerewa@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9274-7077

SPIN-code: 7028-8557

Prof. Svetlana Yu. Selivanovskaya, Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.

E-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

ORCID: 0000-0001-6379-7166

SPIN-code: 4867-6900

ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В ВЕСТНИКЕ БФУ им. И. КАНТА

Серия: Естественные и медицинские 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

148

1. Редакционная коллегия журнала «Вестник БФУ им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские 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 информация;
- 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 и медицинские 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 и медицинские науки

2025

№ 1

Редактор *О. И. Бессчастнова*
Компьютерная верстка *Е. В. Денисенко*

Подписано в печать 19.03.2025 г.
Формат 70 × 108 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 13,0
Тираж 40 экз. Цена свободная. Заказ 36

Издательство Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта
236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, 14