



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 577.114

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.038



КУЛЬТИВИРОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ

Анастасия Александровна Зенкова ¹, Надежда Александровна Шавыркина ²

^{1,2} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск, Россия
^{1,2} Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

¹ zenkova_nastasya080401@mail.ru, 0009-0000-0868-5444

² 32nadina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5572-1476>

Аннотация. Древесина является ценным источником целлюлозы, для современных инновационных производств из неё получают нанофибриллированную целлюлозу. В качестве альтернативного источника растительной наноцеллюлозы может рассматриваться бактериальная наноцеллюлоза, которая синтезируется микроорганизмами. Её преимуществом является отсутствие в составе лигнина, пектинов, гемицеллюлоз. Целью данной работы являлась сравнительная оценка удельной эффективности биосинтеза бактериальной и растительной целлюлозы, для чего была произведена наработка объёма гель-плёнок бактериальной наноцеллюлозы в лабораторных условиях, достаточного для дальнейшей функционализации, например, нитрованием. В данной работе для получения бактериальной наноцеллюлозы использовали полусинтетическую питательную среду и симбиотический продуцент *Medusomyces gisevii* Sa-12, культивирование проводили в климатической камере Binder объёмом 400 дм³. В результате установлено, что за один цикл в лаборатории возможно получить от 9,7 до 16,1 г абсолютно сухой бактериальной наноцеллюлозы. Прирост древесины в умеренной полосе России в год составляет 0,60 т/га, тогда теоретически, если принять массовую долю целлюлозы в древесине 50 %, с 1 м² за год можно получить 0,03 кг целлюлозы (если не учитывать производственные потери). Полезная площадь климатической камеры Binder, которую можно использовать для стационарного культивирования бактериальной наноцеллюлозы, составляет 0,79 м², таким образом с 1 м² за год в лабораторных условиях, с учетом продолжительности культивирования 14 суток, возможно получить 0,53 кг сухой бактериальной наноцеллюлозы – это в 17,7 раз эффективнее, чем биосинтез целлюлозы древесины. Установлено, что лиофильно высушенная бактериальная наноцеллюлоза пригодна для получения наноразмерных нитратов.

Ключевые слова: древесная целлюлоза, бактериальная наноцеллюлоза, нанокристаллическая целлюлоза, нанофибриллированная целлюлоза, культивирование, функционализация, биосинтез.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках госзадания ИПХЭТ СО РАН (код научной темы FUFЕ-2024-0008, регистрационный номер 124021200031-4).

Для цитирования: Зенкова А. А., Шавыркина Н. А. Культивирование бактериальной наноцеллюлозы на полусинтетической питательной среде для последующей функционализации // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 244–250. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.038. EDN: <https://elibrary.ru/YKMMNW>.

Original article

CULTIVATION OF BACTERIAL NANOCELLULOSE ON A SEMISYNTHETIC NUTRIENT MEDIUM FOR SUBSEQUENT FUNCTIONALIZATION

Anastasia A. Zenkova ¹, Nadezhda A. Shavyrkina ²

^{1,2} Institute for Problems of Chemical and Energy Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk, Russia

^{1,2} Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

¹ zenkova_nastasya080401@mail.ru, 0009-0000-0868-5444

² 32nadina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5572-1476>

Abstract. Wood is a valuable source of cellulose for the modern innovative production of nanofibrillated cellulose from it. Bacterial nanocellulose being synthesized by microorganisms can be considered an alternative source of plant-

© Зенкова А. А., Шавыркина Н. А., 2025

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ

based nanocellulose. The advantage of plant-based nanocellulose is that its composition contains no lignin, pectins, and hemicelluloses. This work aimed to comparatively assess the specific efficiency of the biosynthesis of bacterial and plant celluloses. For this purpose, some amount of bacterial nanocellulose gel-films was prepared under lab-scale conditions, sufficient for further functionalization, for example, by nitration. In this work, a semisynthetic nutrient medium and the symbiotic producer *Medusomyces gisevii* Sa-12 were used to obtain bacterial nanocellulose whose cultivation was carried out in a 400-dm³ Binder climatic chamber. It was consequently found that 9.7 to 16.1 g of absolutely dry bacterial nanocellulose could be obtained in one cycle at the laboratory. The annual growth of wood in the temperate zone of Russia is 0.60 t/ha; then, theoretically, if the mass content of cellulose in wood is assumed equal to 50 wt.%, 0.03 kg of cellulose can be extracted from 1 m² a year under lab-scale conditions (if production losses are not factored in). The useful area of the Binder climatic chamber that can be used for stationary cultivation of bacterial nanocellulose is 0.79 m²; thus, it is possible to obtain 0.53 kg of dry bacterial nanocellulose from 1 m² a year under lab-scale conditions, given the cultivation time of 14 days, which is 17.7 times more effective than the biosynthesis of wood cellulose. Freeze-dried bacterial nanocellulose was found to be suitable for the synthesis of nanoscale nitrates.

Keywords: wood cellulose, bacterial nanocellulose, nanocrystalline cellulose, nanofibrillated cellulose, cultivation, functionalization, biosynthesis.

Acknowledgements: The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science within the framework of the state assignment of the Institute of Problems of Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (research topic code FUFЕ-2024-0008, registration number 124021200031-4).

For citation: Zenkova, A.A., Shavyrkina, N.A., Cultivation of bacterial nanocellulose on a semi-synthetic nutrient medium for subsequent functionalization *Polzunovskiy vestnik*, (2), 244-250. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.038. EDN: <https://elibrary.ru/YKMMNW>.

ВВЕДЕНИЕ

Мировое ежегодное производство лигноцеллюлозной биомассы составляет около 181,5×10⁹ т [1]. Растения и древесины являются природными биокомпозитами, основу которых составляет микрофибриллярная целлюлоза в количестве 35-50 % от массы растений. Наряду с целлюлозой, в биокомпозит входят пектин, лигнин и гемицеллюлозы. Целлюлоза является самым распространенным полимером на Земле, он нетоксичен, что позволяет использовать его для производства природных полимерных материалов, которые могут заменить полимеры на основе нефти. Целлюлозу также можно использовать для производства химикатов и мономеров посредством каталитических процессов [2], а также для производства бумаги и нетканых материалов [3].

Революционным достижением стало получение из целлюлозы нанокристаллической целлюлозы кислотным гидролизом [4]. Наночифриллированную целлюлозу получают путём дефифриллиции древесины или других растительных источников [5]. Уникальным видом наночифриллированной целлюлозы является бактериальная наночифриллированная целлюлоза, её получают путем биосинтеза готовых наноструктур из отдельных растворимых молекул (например, из глюкозы, содержащейся в питательной среде), при этом биосинтез осуществляют микроорганизмы [6].

Российская лесная промышленность производит практически все известные человечеству виды продукции из древесины хвойных и лиственных пород, и является одним из крупнейших в мире её экспортеров. Однако большая доля экспорта составляет необработанные лесоматериалы (круглый лес) и пиломатериалы. По данным ФТС России, в 2021 году из страны вывезено совокупно 43,8 млн м³ данных видов продукции (коды ТН ВЭД 4403, 4407) на сумму 7,2 млрд \$ при общем экспорте древесины и целлюлозно-бумажных изделий на уровне 17 млрд \$. В пересчете на эквиваленты круглого леса совокупный экспорт пиломатериалов и необработанных лесоматериалов составил 78,9 млн м³, то есть можно считать, что 35,2 % всей заготовленной в России древесины в 2021 году было вывезено за рубеж в минимально переработанном виде [7]. Нанокристаллическая и наночифриллированная целлюлозы, которые можно было бы получить из древесины, в РФ не производят-

ся, поэтому в качестве альтернативы целлюлозе растительного происхождения, которую получают путем переработки древесины, может быть производство бактериальной наночифриллированной целлюлозы. Бактериальная наночифриллированная целлюлоза представляет собой лентовидные сверхтонкие нановолокна, она обладает очень высокой водоудерживающей способностью, улучшенной адгезией, высокой степенью полимеризации, кристалличностью, эластичностью, прочностью, возобновляемостью, а также является биоразлагаемым материалом [8].

Уникальные свойства бактериальной наночифриллированной целлюлозы позволяют использовать данный материал в косметологии, в производстве мембран для очистки воды [9], в гибких электронных устройствах [10], а также в качестве добавки для биоразлагаемых жидких моющих средств, в биомедицине для производства стерильных повязок и материала для укрепления и защиты мягких тканей, пищевых добавок, микропористых гранул, используемых в качестве микроносителя клеточной культуры [11].

Существует производство, в котором пленки бактериальной наночифриллированной целлюлозы являются побочным продуктом, например, при производстве комбучи [12]. В связи с тем, что древесина является ресурсом с длительным сроком возобновления, создание производства бактериальной наночифриллированной целлюлозы является крайне перспективным направлением.

Таблица 1 – Свойства бактериальной наночифриллированной целлюлозы и целлюлозы растительного происхождения

Table 1 – Properties of bacterial nanocellulose and cellulose of plant origin

Свойства	БНЦ*	Целлюлоза
Степень кристалличности	65-79	56-65
Степень полимеризации	2000-60000	13000-14000
Модуль Юнга, МПа	15-30	5,5-12,6
Влагоудерживающая способность, %	98,5	60
Примечание: БНЦ – бактериальная наночифриллированная целлюлоза.		

В данной работе поставлена цель оценить удельную эффективность биосинтеза бактериальной

и растительной целлюлоз, для чего получить достаточное для статистической оценки количество бактериальной наноцеллюлозы, которую впоследствии использовали для дальнейшей функционализации нитрованием. В таблице 1 для сравнения приведены свойства бактериальной наноцеллюлозы и целлюлозы растительного происхождения [13].

Функционализация бактериальной наноцеллюлозы относится к фундаментальным областям исследований и может достигаться несколькими способами:

- химическими,
- биосинтетическими и различными схемами функционализации *in situ* и *ex situ* для получения усовершенствованных функциональных материалов на основе бактериальной наноцеллюлозы [14].

Особо востребованы нитраты бактериальной наноцеллюлозы в связи с сохранением наноразмерной структуры эфира целлюлозы и возможности использования в создании композиционных материалов в специальной химии и биомедицине [15,16]. Многочисленные научные исследования однозначно доказывают аналогичность растительной и бактериальной целлюлоз в плане химической структуры [17], в то же время целлюлоза растительного происхождения уступает бактериальной наноцеллюлозе по таким показателям, как степень кристалличности и степень полимеризации.

МЕТОДЫ

Культивирование бактериальной наноцеллюлозы проводили в лабораторных условиях по методике [18].

Культивирование проводили в климатической камере Binder KBW 400-230 V (Германия) на полусинтетической питательной среде (10 г/л чёрного байхового чая, 20 г/л глюкозы) статически в условиях постоянного воздуха обмена при температуре 27 °С и влажности 80 % в течение 4-14 суток. В качестве продуцента использовали симбиотическую культуру *Medusomyces gisevii* Sa-12, приобретенную во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов. Преимущества симбиотического продуцента были нами подробно обсуждены в работе [19]. После окончания культивирования производили сьем гелевых плёнок с поверхности питательной среды и их промывку 2%-ным раствором NaOH в течение 2 суток, затем пленки промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции. Затем гелевые плёнки промывали 0,25%-ным раствором HCl в течение 2 суток с последующей промывкой дистиллированной водой до pH = 7. В результате были получены гелевые плёнки бактериальной наноцеллюлозы жемчужно-белого цвета. Полученная масса гелевых плёнок подвергалась автоклавированию, часть была передана в Алтайский государственный медицинский университет, часть в Краевую клиническую больницу города Барнаула, а оставшаяся часть использовалась в лаборатории биоконверсии для изучения свойств и функционализации. Образцы гелевых плёнок бактериальной наноцеллюлозы высушили в лиофильной сушилке «HR 7000 M» (США) до постоянной массы для расчёта выхода и анализа основных свойств.

Выход высушенной бактериальной наноцеллюлозы рассчитывали по следующей формуле:

$$W = \frac{m}{C \cdot V_{0,9}} \cdot 100 \% \quad (1),$$

где W – выход бактериальной наноцеллюлозы, %;
m – масса образца бактериальной наноцеллюлозы в пересчете на абсолютно сухое вещество, г;
C – концентрация редуцирующих веществ в

среде в пересчете на глюкозу, г/л;

V – начальный объем среды, л;

0,9 – коэффициент пересчёта, обусловленный отщеплением молекулы воды при полимеризации глюкозы в целлюлозу.

Степень полимеризации образцов бактериальной наноцеллюлозы определялась вискозиметрическим методом [20] с использованием в качестве растворителя кадоксена (ethylenediamine, АО LenReaktiv, CAS No. 107-15-3, Russia; cadmium oxide, АО LenReaktiv, CAS No. 1306-19-0 Russia).

Растровая электронная микроскопия лиофилизированных образцов бактериальной наноцеллюлозы выполнялась с помощью микроскопа JSM-840 (JEOL Ltd., Токио, Япония) с рентгеновским микроанализатором Link-860 серии II.

Структура и химическое строение бактериальной наноцеллюлозы исследовались на инфракрасном спектрофотометре «Инфралюм ФТ-801» (Россия) в таблетках KBr.

Работа выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего в течение года было наработано 16 кг гелевых плёнок бактериальной наноцеллюлозы, экспериментальная выборка представлена более чем 50 образцами. Средняя влажность образцов бактериальной наноцеллюлозы составила 99,2±0,1 %, средний выход бактериальной наноцеллюлозы составил 12±1 % от количества глюкозы в питательной среде. В то время как выход бактериальной наноцеллюлозы в мировой практике на питательной среде *Khestrina-Shrama*, которая является классической для культивирования бактериальной наноцеллюлозы, составил 4 % [21], что в 3 раза ниже полученных экспериментальных данных.

Далее провели измерения характеристик полученных гелевых плёнок бактериальной наноцеллюлозы: степень полимеризации и определение толщины фибрилл бактериальной наноцеллюлозы. Следует отметить трудоемкость культивирования, так как при концентрации глюкозы в среде 20 г/л и разовой загрузке 5 дм³ требуются большие площади. Высота слоя питательной среды составляет обычно 2,0-2,5 см³, в климатической камере возможно разместить четыре яруса полок для культуральных сосудов. Увеличение количества ярусов нецелесообразно, поскольку это может привести к недостаточной аэрации и, как следствие, существенному снижению выхода бактериальной наноцеллюлозы [22]. Схема культивирования бактериальной наноцеллюлозы представлена на рисунке 1. Она состоит из стандартных для биотехнологического процесса операций: приготовления питательной среды, подготовки продуцента, культивирования, отделения продукта от культуральной жидкости (сьем гелевых плёнок бактериальной наноцеллюлозы), промывка гелевых плёнок, стерилизация гелевых плёнок (либо лиофильная сушка). По итогам проведенных за год наработок партий бактериальной наноцеллюлозы рассчитали эффективность ее биосинтеза, по сравнению с эффективностью биосинтеза растительной целлюлозы.

ИК-спектр бактериальной наноцеллюлозы представлен на рисунке 2. Высушенные лиофильно образцы бактериальной наноцеллюлозы были функционализированы нитрованием с использованием серно-азотной кислотной смеси.

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ



Рисунок 1 – Схема процесса получения бактериальной наноцеллюлозы
Figure 1 – Schematic diagram of the process for obtaining bacterial nanocellulose

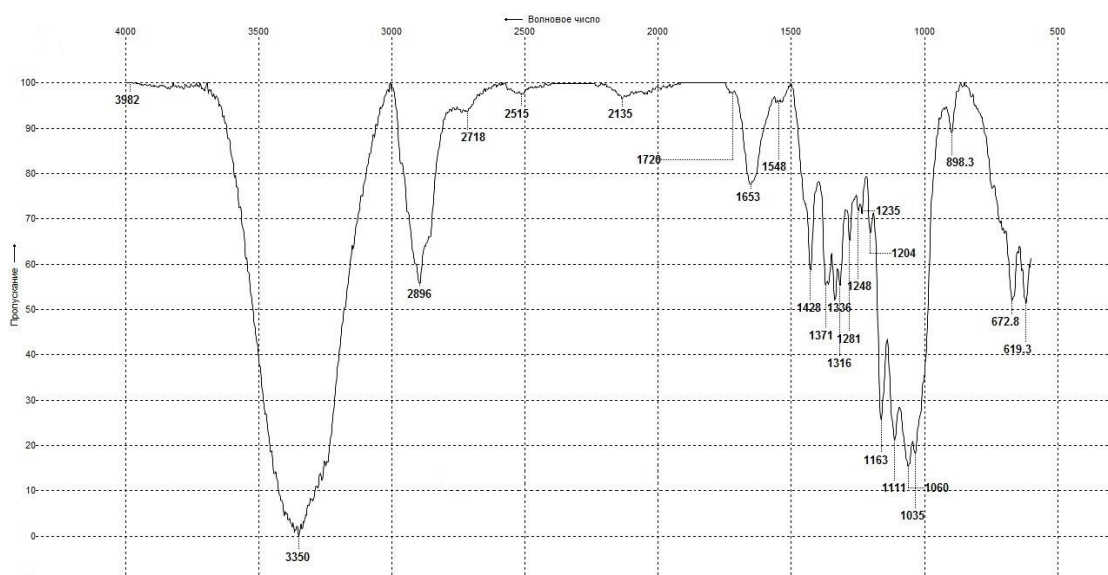


Рисунок 2 – ИК- спектр бактериальной наноцеллюлозы
Figure 2 – IR spectrum of bacterial nanocellulose

ОБСУЖДЕНИЕ

Прирост древесины в умеренной полосе России за год составляет 0,6 т/га согласно [23], тогда, теоретически, если принять массовую долю целлюлозы в древесине 50 %, с 1 м² за 365 суток можно получить 0,03 кг целлюлозы (если не учитывать производственные потери). Полезная площадь климатической камеры (т.е. суммарная площадь поверхности культивирования) составляет 0,79 м², таким образом с 1 м² за один цикл в лаборатории возможно получение от 1,2 до 2,0 кг влажной бактериальной наноцеллюлозы или 9,7-16,1 г абсолютно сухой бактериальной наноцеллюлозы (в зависимости от продолжительности цикла). Это в 17,7 раз эффективнее, чем биосинтез целлюлозы древесины.

Средняя степень полимеризации бактериальной наноцеллюлозы составила 3000±200, что соот-

ветствует данным мировой научной литературы, по результатам растровой электронной микроскопии ширина нанофибрилл составила 60±7 нм.

Анализ ИК-спектра, полученной бактериальной наноцеллюлозы: широкая полоса в области 3350 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям растяжения ОН-групп, что указывает на склонность материалов к гидрофильности. Пик в области 2896 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям растяжения С–Н, СН₂ групп, колебания в области 1653 см⁻¹ обусловлены деформационной вибрацией поглощенной воды, связанной с гидрофильной природой целлюлозных материалов [24]. ИК-спектры образцов целлюлозы характеризуются четко выраженной структурой полос в области 1430-1435 см⁻¹ и 1372-1373 см⁻¹, соответствующих деформационным колебаниям СН₂-группы и СН-группы [25]. Полосы, расположенные в областях

1160-1165 см⁻¹, 1110-1114 см⁻¹, 1058-1059 см⁻¹ связаны с асимметричным растяжением мостика С—О—С β-гликозидной связи, растяжением скелета пиранозного кольца С—О и растяжением связей С—О молекулы целлюлозы. Отсутствуют полосы поглощения, соответствующие ароматическим группам лигнина и характеристическим частотам гемицеллюлоз, что подтверждает чистоту целлюлозы.

Лиофильно высушенная бактериальная наноцеллюлоза была пронитрована. Нитраты бактериальной целлюлозы характеризовались массовой долей азота в диапазоне от 8,68 до 11,56 %, растворимостью в спиртоэфирной смеси 16,5-91,0 %, вязкостью 32-255 мПа·с. Наноразмерный характер волокон нитратов бактериальной целлюлозы сохранился. Таким образом, укрупненный образец бактериальной наноцеллюлозы, обладающей химической чистотой, имеющей степень полимеризации целлюлозы 3000 (аналогично хлопковой целлюлозе в пластах) и наноразмерную толщину фибрилл, пригоден для нитрования с целью получения наноразмерных нитратов целлюлозы [26,27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что за 365 суток в лабораторных условиях при использовании климатической камеры Binder объемом 400 дм³ и культивировании в течение 14 суток возможно получить 0,53 кг сухой бактериальной наноцеллюлозы. Это в 17,7 раз эффективнее, чем биосинтез целлюлозы древесины. Полученные ИК-спектры подтверждают, что продукт бактериального синтеза является химически чистой целлюлозой. Значения степени полимеризации полученных образцов бактериальной наноцеллюлозы составляют порядка 3000 и соответствуют данным мировой научной литературы.

Результаты растровой электронной микроскопии высушенных лиофильно образцов демонстрируют наноразмерность фибрилл бактериальной наноцеллюлозы.

Полученные образцы лиофильно высушенной бактериальной наноцеллюлозы предназначены для успешного синтеза наноразмерных нитратов целлюлозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paul, S. & Dutta A. (2018). Dutta Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion Resources. Conservation and Recycling, 164-174. doi:10.1016/j.resconrec.2017.12.005.
2. Amorim, J.D.P. & et al. (2020) Plant and bacterial nanocellulose: Production, properties and applications in medicine, food, cosmetics, electronics and engineering. A review Environmental Chemistry Letters, (18), 851-869. doi: 10.1007/s10311-020-00989-9.
3. Santhosh, A.S. & Umesh, M. (2024). Valorization of waste chilli stalks (Capsicum annum) as a sustainable substrate for cellulose extraction: insights into its thermomechanical, film forming and biodegradation properties. Biomass Conv. Bioref, 1-14 doi: 10.1007/s13399-024-05370-2
4. Klemm, D., & et al. (2018). Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today's state. Materials Today, (7), 720-748. doi: 10.1016/j.mattod.2018.02.001.
5. Jiao, X. & Jia, K. et al. (2024). Nanocellulose-based functional materials towards water treatment. Car-

bohydrate. Polymers, 122977. doi: 10.1016/j.carbpol.2024.122977.

6. Гмошинский И.В., Шипелин В.А., Хотимченко С.А. Наноцеллюлозы в пищевой промышленности и медицине: структура, получение и применение // Вопросы питания. 2022. № 3. С. 6-20. doi: 10.33029/0042-8833-2022-91-3-6-20.

7. Пыжев А.И., Гордеев Р.В., Цандер Е.В. Углеродное регулирование как инструмент государственной политики по стимулированию глубокой переработки лесного сырья в России // Сиб. фед. Округ. // Гуманитарные науки. 2024. № 6. С. 1183-1191.

8. Samyn, P. & et al. (2023). Opportunities for bacterial nanocellulose in biomedical applications: Review on biosynthesis, modification and challenges. International Journal of Biological Macromolecule, 123316. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123316.

9. Wang, J. & Tavakoli, J., Tang, Y. (2019). Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods—A review. Carbohydrate polymers, 63-76. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.05.008.

10. Yang, H. & et al. (2023). Nanocellulose-graphene composites: Preparation and applications in flexible electronics. International Journal of Biological Macromolecules, 126903. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126903.

11. Martínez, E. & et al. (2023). Nata de fique: A cost-effective alternative for the large-scale production of bacterial nanocellulose. Industrial Crops and Products, 116015. doi: 10.1016/j.indcrop.2022.116015.

12. Coelho, R.M.D. & et al. (2020). Kombucha. International Journal of Gastronomy and Food Science, 100272. doi: 10.1016/j.ijgfs.2020.100272.

13. Spiridon, I. & Popa, V.I. (2008) Hemicelluloses: major sources, properties and applications. Monomers, polymers and composites from renewable resources, Elsevier, pp. 289-304. doi: 10.1016/B978-0-08-045316-3.00013-2.

14. Горбатова П.А., Шавыркина Н.А. Зависимость массовой доли азота в нитратах бактериальной наноцеллюлозы от содержания воды в нитрующей смеси // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 5. С. 75-81. doi: 10.25699/SSSB.2023.51.5.009.

15. Chen, L., & Cao, X., Gao, J., et al. (2021). Nitrated bacterial cellulose-based energetic nanocomposites as propellants and explosives for military applications. ACS Applied Nano Materials, (4), 1906-1915. doi: 10.1021/acsanm.0c03263.

16. Gismatulina, Y.A. (2023). Promising energetic polymers from nanostructured bacterial cellulose. Polymers, (15), 2213. doi: 10.3390/polym15092213.

17. Klemm, D. & Petzold-Welcke, K.E. et al. (2020) Biotech nanocellulose: A review on progress in product design and today's state of technical and medical applications. Carbohydr Polym, (254), 117313. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.117313.

18. Shavyrkina, N.A. (2021). Scale-up of biosynthesis process of bacterial nanocellulose. Polymers, (12), 1920. doi: 10.3390/polym13121920.

19. Skiba, E.A. & Shavyrkina, N.A. et al. (2023) Biosynthesis of Bacterial Nanocellulose from Low-Cost Cellulosic Feedstocks: Effect of Microbial Producer, 24. 14401. doi: 10.3390/ijms241814401.

20. Bogolitsyn, K., & Parshina, A., Aleshina, L. (2020). Structural features of brown algae cellulose. Cellulose, 27(17), 1-14. doi: 10.1007/s10570-020-03485-z.

21. Amorim, L.F.A. & et al. (2023). Sustainable bacterial cellulose production by low cost feedstock: Evalua-

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ

tion of apple and tea by-products as alternative sources of nutrients. *Cellulose*, (9), 5589-5606. doi: 10.1007/s10570-023-05238-0.

22. Shavyrkina, N.A., & et al. (2021). Static culture combined with aeration in biosynthesis of bacterial cellulose. *Polymers*, (23), 4241. doi: 10.3390/polym13234241.

23. Лесной фонд России // Справочник. М.: ВНИИЦ лесресурс. С. 208.

24. Ait, B.A. & et al. (2021). Extraction, characterization and chemical functionalization of phosphorylated cellulose derivatives from Giant Reed Plant. *Cellulose*, (8), 4625–4642. doi: 10.1007/s10570-021-03842-6.

25. Gabriel T., Wondu K., Dilebo J. Valorization of khat (*Catha edulis*) waste for the production of cellulose fibers and nanocrystals // *PLoS One*. 2021. Т. 16. – №. 2. С. e0246794. doi: 10.1371/journal.pone.0246794.

26. Горбатова П.А., Шавыркина Н.А. Влияние температуры нитрования на свойства нитратов бактериальной целлюлозы // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (22-24 мая 2024 года, г. Бийск) / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2024. С. 251-252.

27. Свойства нитратов целлюлозы, полученных нитрованием бактериальной целлюлозы с использованием смеси азотной и серной кислот / Горбатова П.А., Корчагина А.А. и др. // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 2024. Т. 14. №. 2. С. 236–244. doi: 10.21285/achb.915. EDN: OKCVTR.

Информация об авторах

А. А. Зенкова, инженер лаборатории биоконверсии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук; студент магистратуры, Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ.

Н. А. Шавыркина, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории биоконверсии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН); доцент кафедры биотехнологии, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ.

REFERENCES

1. Paul, S. & Dutta A, (2018). Dutta Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion Resources. *Conservation and Recycling*, 164-174. doi:10.1016/j.resconrec.2017.12.0 05.

2. Amorim, J.D.P. & et al. (2020) Plant and bacterial nanocellulose: Production, properties and applications in medicine, food, cosmetics, electronics and engineering. *A review Environmental Chemistry Letters*, (18), 851-869. doi: 10.1007/s10311-020-00989-9.

3. Santhosh, A.S. & Umesh, M. (2024). Valorization of waste chilli stalks (*Capsicum annuum*) as a sustainable substrate for cellulose extraction: insights into its

thermomechanical, film forming and biodegradation properties. *Biomass Conv. Bioref*, 1-14. doi: 10.1007/s13399-024-05370-2.

4. Klemm, D., & et al. (2018). Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today's state. *Materials Today*, (7), 720-748. doi: 10.1016/j.mattod.2018.02.001.

5. Jiao, X. & Jia, K. et al. (2024). Nanocellulose-based functional materials towards water treatment. *Carbohydrate. Polymers*, 122977. doi: 10.1016/j.carbpol.2024.122977.

6. Gmshinsky I.V., Shipelin V.A., Khotimchenko S.A. Nanocelluloses in the food industry and medicine: structure, preparation and application // *Nutrition issues*. 2022. No. 3. pp. 6-20. doi: 10.33029/0042-8833-2022-91-3-6-20. (In Russ.).

7. Pyzhev A.I., Gordeev R.V., Tsander E.V. Carbon regulation as a tool of state policy to stimulate deep processing of forest raw materials in Russia // *Sib. fed. District. // Humanities*. 2024. No. 6. pp. 1183-1191. (In Russ.).

8. Samyn, P. & et al. (2023). Opportunities for bacterial nanocellulose in biomedical applications: Review on biosynthesis, modification and challenges. *International Journal of Biological Macromolecule*, 123316. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123316.

9. Wang, J. & Tavakoli, J., Tang, Y. (2019). Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods—A review. *Carbohydrate polymers*, 63-76. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.05.008.

10. Yang, H. & et al. (2023). Nanocellulose-graphene composites: Preparation and applications in flexible electronics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126903. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126903.

11. Martínez, E. & et al. (2023). Nata de fique: A cost-effective alternative for the large-scale production of bacterial nanocellulose. *Industrial Crops and Products*, 116015. doi: 10.1016/j.indcrop.2022.116015.

12. Coelho, R.M.D. & et al. (2020). Kombucha. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 100272. doi: 10.1016/j.ijgfs.2020.100272.

13. Spiridon, I. & Popa, V.I. (2008) Hemicelluloses: major sources, properties and applications. *Monomers, polymers and composites from renewable resources*, Elsevier, pp. 289-304. doi: 10.1016/B978-0-08-045316-3.00013-2.

14. Gorbatova P.A., Shavyrkina N.A. Dependence of the mass fraction of nitrogen in nitrates of bacterial nanocellulose on the water content in the nitrating mixture // *South Siberian Scientific Bulletin*. 2023. No. 5. pp. 75-81. doi: 10.25699/SSSB.2023.51.5.009. (In Russ.).

15. Chen, L., & Cao, X., Gao, J., et al. (2021). Nitrated bacterial cellulose-based energetic nanocomposites as propellants and explosives for military applications. *ACS Applied Nano Materials*, (4), 1906-1915. doi: 10.1021/acsanm.0c03263.

16. Gismatulina, Y.A. (2023). Promising energetic polymers from nanostructured bacterial cellulose. *Polymers*, (15), 2213. doi: 10.3390/polym15092213.

17. Klemm, D. & Petzold-Welcke, K.B. et al. (2020) Biotech nanocellulose: A review on progress in product design and today's state of technical and medical applications. *Carbohydr Polym*, (254), 117313. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.117313.

18. Shavyrkina, N.A. (2021). Scale-up of biosynthesis process of bacterial nanocellulose. *Polymers*, (12), 1920. doi: 10.3390/polym13121920.

19. Skiba, E.A. & Shavyrkina, N.A. et al. (2023) Biosynthesis of Bacterial Nanocellulose from Low-Cost Cellulosic Feedstocks: Effect of Microbial Producer, 24. 14401. doi: 10.3390/ijms241814401.
20. Bogolitsyn, K., & Parshina, A., Aleshina, L. (2020). Structural features of brown algae cellulose. Cellulose, 27(17), 1-14. doi: 10.1007/s10570-020-03485-z.
21. Amorim, L.F.A. & et al. (2023). Sustainable bacterial cellulose production by low cost feedstock: Evaluation of apple and tea by-products as alternative sources of nutrients. Cellulose, (9), 5589-5606. doi: 10.1007/s10570-023-05238-0.
22. Shavyrkina, N.A., & et al. (2021). Static culture combined with aeration in biosynthesis of bacterial cellulose. Polymers, (23), 4241. doi: 10.3390/polym13234241.
23. Forest Fund of Russia // Handbook. M.: VNIITS lesresurs. C. 208. (In Russ.).
24. Ait, B.A. & et al. (2021). Extraction, characterization and chemical functionalization of phosphorylated cellulose derivatives from Giant Reed Plant. Cellulose, (8), 4625–4642. doi: 10.1007/s10570-021-03842-6.
25. Gabriel, T., Wondu, K. & Dilebo, J. (2021). Valorization of khat (Catha edulis) waste for the production of cellulose fibers and nanocrystals. PLoS One. 16(2). e0246794. doi: 10.1371/journal.pone.0246794.
26. Gorbatova P.A., Shavyrkina N.A. The effect of nitration temperature on the properties of bacterial cellulose nitrates // Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries: materials of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and young scientists with international participation (May 22-24, 2024, Biysk) / Alt. State Technical University. un-t, BTL. Biysk: Publishing House

of Alt. state Technical University. Unita, 2024. C. 251-252. (In Russ.).

27. Properties of cellulose nitrates obtained by nitration of bacterial cellulose using a mixture of nitric and sulfuric acids / Gorbatova P.A., Korchagina A.A. et al. // Izvestiya vuzov. Applied Chemistry and Biotechnology, 2024. vol. 14. No. 2. pp. 236-244. doi: 10.21285/achb.915. EDN: OKCVTR. (In Russ.).

Information about the authors

A. A. Zenkova, *Engineer of the Bioconversion Laboratory, Institute for Problems of Chemical and Energy Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk, Russia; Master's degree student, Biysk Institute of Technology (philial) of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Institute of Chemical and Energy Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.*

N. A. Shavyrkina, *Ph.D., Senior Researcher at the Bioconversion Laboratory, Institute for Problems of Chemical and Energy Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk, Russia; Associate Professor of the Department of Biotechnology, Biysk Institute of Technology (branch) of the Federal State Budgetary Institution of Science.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 18 Dec 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.