

DOI: 10.7868/S3034574X26030055
УДК 577.15

Оригинальная статья

ФЕРМЕНТАТИВНОЕ ПОЛУЧЕНИЕ И ОЦЕНКА БИОДОСТУПНОСТИ ДРЕВЕСНЫХ ОЛИГОСАХАРИДОВ ДЛЯ ПРОБИОТИЧЕСКИХ МИКРООРГАНИЗМОВ

К.А. Майорова^{1,*}, А.Р. Каюмов², И.Н. Зоров^{3,4}, А.Р. Шевченко¹,
И.А. Латипова², Д.Р. Яруллина², А.С. Аксёнов¹

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Российская Федерация

³Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологий» РАН,
Москва, Российская Федерация

⁴Химический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация

*E-mail: ksu100103@yandex.ru

Аннотация. В работе ферментативным способом были получены и охарактеризованы олигосахариды из промышленных образцов лиственной и хвойной сульфатных целлюлоз в сравнении с образцами олигосахаридов из ксилана овса и сахарного тростника. Наибольший выход олигосахаридов от массы субстрата (до 7,5 %) был достигнут при гидролизе целлюлозы из смеси березы и осины с помощью отечественных препаратов ксиланаз, целлюлаз и маннаназ грибов родов *Penicillium* и *Myceliophthora* в течение 1,5 ч при 50 °С и рН 5,0. Снижение расхода вносимых целлюбиогидролаз и β-глюкозидаз позволило получить препарат олигосахаридов (более 70 %) с меньшим содержанием моносахаридных примесей. Показано, что низкий выход ксилоолигосахаридов при гидролизе переосажденного ксилана сульфатных целлюлоз ксиланазой может быть увеличен за счет внесения в реакционную смесь эндоглюканаза и других целлюлаз. Древесные олигосахариды могут быть использованы в качестве компонентов питательной среды для выращивания лактобактерий *Lactiplantibacillus plantarum* (штаммы FCa3L, S10 и 8PA3) и *Pediococcus acidilactici* LR-1, а также для разработки новых синбиотических препаратов и могут стать одним из ключевых векторов развития лесной биоэкономики.

Ключевые слова: древесные олигосахариды, пребиотики, *Lactiplantibacillus plantarum*, синбиотик, ферментативный гидролиз, ксиланаза

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-24-20063).

Соблюдение этических стандартов. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи.

© К. А. Майорова, А. Р. Каюмов, И. Н. Зоров, А. Р. Шевченко, И. А. Латипова, Д. Р. Яруллина,
А. С. Аксёнов, 2026

Сокращения: ЖКТ — желудочно-кишечный тракт, ФОС — фруктоолигосахариды, ЦОС — целлюлозоолигосахариды, МОС — манноолигосахариды, КОС — ксилоолигосахариды, ГалОС — галактоолигосахариды, ЦБП — целлюлозно-бумажная промышленность, КМЦ — карбоксиметилцеллюлоза, ЭГ — эндоглюканаза, МКЦ — микрокристаллическая целлюлоза, ЦБГ — целлюбиогидролаза, КСИЛ — ксиланаза, МАН — маннаназа, пНФГ — *п*-нитрофенил-β-глокопиранозид, БГЛ — β-глюкозидаза, ФП — ферментный препарат, ВС — восстанавливающие сахара, СП — степень полимеризации, ОП — оптическая плотность, ОС — олигосахариды.

Благодарность. Авторы выражают благодарность проф. А.П. Сеницыну и его коллегам (Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова) за предоставление ферментных препаратов и проведение хроматографического анализа образцов на оборудовании Центра.

Ссылка для цитирования: Майорова К.А., Каюмов А.Р., Зоров И.Н., Шевченко А.Р., Латипова И.А., Яруллина Д.Р., Аксёнов А.С. Ферментативное получение и оценка биодоступности древесных олигосахаридов для пробиотических микроорганизмов. *Прикладная биохимия и микробиология / Applied biochemistry and microbiology*. 2026. Т. 62. № 3. С. 403–414. <https://doi.org/10.7868/S3034574X26030055>

DOI: 10.7868/S3034574X26030055

Original Article

ENZYMATIC PRODUCTION AND ASSESSMENT OF BIOAVAILABILITY OF WOOD OLIGOSACCHARIDES FOR PROBIOTIC MICROORGANISMS

K.A. Mayorova^{1,*}, A.R. Kayumov², I.N. Zorov^{3,4}, A.R. Shevchenko¹,
I.A. Latipova², D.R. Yarullina², A.S. Aksenov¹

¹*Northern (Arctic) federal university named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation*

²*Kazan (Volga Region) federal university, Kazan, Russian Federation*

³*Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology”, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

⁴*Department of Chemistry, Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

*E-mail: ksu100103@yandex.ru

Abstract. In this work, oligosaccharides from industrial hardwood and softwood kraft pulps were obtained via enzymatic method and characterized in comparison with samples of oligosaccharides from xylan of oats and sugar cane. The highest yield of oligosaccharides by weight of the substrate (up to 7.5 %) was achieved by hydrolysis of pulp from a mixture of birch and aspen, catalyzed by domestic preparations of xylanases, cellulases and mannanases of fungi of the genera *Penicillium* and *Myceliophthora* for 1.5 hours at 50 ° C and pH 5.0. Reducing the consumption of introduced cellobiohydrolases and β -glucosidases made it possible to obtain an oligosaccharide preparation (more than 70 %) with a lower content of monosaccharide impurities. It was found that the low yield of xylooligosaccharides during the depolymerization of redeposited xylan with kraft pulps by monoenzyme xylanase can be increased by introducing endoglucanases and other cellulases into the reaction mixture. Wood oligosaccharides can be used as components of a nutrient medium for the cultivation of lactobacilli *Lactiplantibacillus plantarum* (strains FCA3L, S10 and 8PA3) and *Pediococcus acidilactici* LR-1 and are promising for the development of new synbiotic drugs and can become one of the key vectors for the development of forest bioeconomy.²

Keywords: wood oligosaccharides, prebiotics, *Lactiplantibacillus plantarum*, synbiotics, enzymatic hydrolysis, xylanases

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-24-20063).

Ethics declarations. This article does not contain any studies involving humans or animals as subjects.

© K. A. Mayorova, A. R. Kayumov, I. N. Zorov, A. R. Shevchenko, I. A. Latipova, D. R. Yarullina,
A. S. Aksenov, 2026

² Abbreviations: FOS — fructooligosaccharides, COS — cellooligosaccharides, MOS — mannooligosaccharides, XOS — xylooligosaccharides, GalOS — galactooligosaccharides, PPI — pulp and paper industry, CMC — carboxymethylcellulose, EG — endoglucanase, MCC — microcrystalline cellulose, CBH — cellobiohydrolase, XYL — xylanase, MAN — mannanase, pNFG — *p*-nitrophenyl- β -glucopyranoside, BGL — β -glucosidase, EP — enzyme preparation, RS — reducing sugars, DP — degree of polymerization, OD — optical density, OS — oligosaccharides.

Conflict of interests. The authors of this work declare that they have no conflict of interest.

Authors contributions. All authors contributed significantly to the development of the concept, the conduct of the research, and the preparation of the article.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to prof. A.P. Sinitsyn and his colleagues (Department of Chemistry, Moscow State University) for providing enzyme preparations and conducting chromatographic analysis of the samples using the Center's equipment.

For Citation: Mayorova K.A., Kayumov A.R., Zorov I.N., Shevchenko A.R., Latipova I.A., Yarullina D.R., Aksenov A.S. Enzymatic production and evaluation of bioavailability of wood oligosaccharides to probiotic microorganisms. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya / Applied biochemistry and microbiology*. 2026;62(3): 403–414. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034574X26030055>

ВВЕДЕНИЕ

Видовой состав и физиологическое состояние микробиома кишечника имеет ключевое значение для поддержания гомеостаза желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и формирования иммунного ответа на патогенные микроорганизмы [31]. Стремительно развивающимся направлением в терапии заболеваний ЖКТ является коррекция разнообразия и активности симбионтных сообществ с применением пробиотиков, пребиотиков, синбиотиков и постбиотиков [32]. Колонизация дистальных отделов ЖКТ пробиотическими бактериями *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Lactococcus* и *Streptococcus* sp. и др. может быть осуществлена с помощью технологии трансплантации донорской фекальной микробиоты или введения пробиотика ректально, однако наименее инвазивной является доставка пробиотика перорально. Ключевой проблемой пероральной доставки пробиотиков в дистальные отделы ЖКТ является инактивация пробиотических бактерий под воздействием пищеварительных ферментов и высокой кислотности желудка [10]. Стандартная инкапсуляция улучшает выживаемость бактерий, однако ограничивается стабильностью капсул: пепсин желудка катализирует гидролиз желатина, в среде желудка набухают и деформируются гидрогели из альгината, что приводит к преждевременному высвобождению из полимерных матриц клеток бактерий и их гибели [13, 34]. Одним из решений данной проблемы является введение в капсулы веществ со стабилизирующим эффектом, являющихся питательным субстратом для бактерий. Примером таких веществ являются пребиотики — неперевариваемые организмом хозяина соединения, способные оказывать ростостимулирующее действие в отношении симбиотических бактерий [15–16]. Пребиотики могут естественным образом вырабатываться в дистальных отделах ЖКТ из клетчатки и других полисахаридов пищи под воздействием гидролитических ферментов микробиоты при переводе субстратов в доступную для усвоения форму [27]. Получение сходных соединений возможно с применением технологии ферментативной деполимеризации полисахаридов. В соответствии с направлениями на использование возобновляемых ресурсов пре-

биотики углеводного происхождения пользуются большим спросом. Олигосахариды (ОС) — цепи из 2–10 моносахаридных звеньев, соединенных гликозидными связями. Наряду с широко распространенными фруктоолигосахаридами (ФОС), инулином и инулоолигосахаридами все чаще объектами передовых исследований становятся ОС из мономерных остатков глюкозы — глюкоолигосахариды, в том числе целлоолигосахариды (ЦОС), из маннозы — манноолигосахариды (МОС), ксилозы — ксилоолигосахариды (КОС), галактозы — галактоолигосахариды (ГалОС). ФОС, КОС, ГалОС и другие ОС, обладающие устойчивостью к перевариванию под действием пищеварительных ферментов млекопитающих. [14].

Деполимеризация полисахаридов до олигомеров может проводиться несколькими принципиально различными методами: автогидролизом при 160–250 °С [12, 19, 21, 23], кислотным гидролизом при 80–180 °С [26] и ферментативным гидролизом с применением гликозил-гидролаз эндо-действия (преимущественно эндоксилаз) при 40–70 °С [7, 17, 20, 29, 30]. При этом выход олигосахаридов бывает различным [4]. Получение ОС из растительной биомассы путем биокаталитической переработки растительного сырья с предобработкой представляет собой экологически безопасный и наиболее универсальный метод, применимый для различных полисахаридных комплексов. Наиболее выгодными субстратами для обработки ферментами являются древесные технические полуфабрикаты целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП), представляющие собой коммерчески доступные комплексы полисахаридов, преимущественно целлюлозы (63–80 %), ксилана и других гемицеллюлоз из древесины. Стадии химической делигнификации при высоких температурах обеспечивают удаление наибольшей части ингибиторов ферментов — лигнина и др. веществ, что обуславливает их высокую способность к ферментативному гидролизу [2, 22, 24]. Эти субстраты являются потенциальным источником ЦОС, КОС, МОС и других ОС для применения в качестве компонентов пребиотических или синбиотических композиций для модуляции микробиоты кишечника [22].

Цель настоящей работы — оптимизация условий получения ОС ферментативным гидролизом коммерчески доступных комплексов древесных полисахаридов и оценка их пребиотического потенциала.

МЕТОДИКА

Субстраты для ферментативного получения олигосахаридов

В качестве субстратов для ферментативного гидролиза использовали технические образцы древесной целлюлозы, полученной промышленным способом в результате делигнификации и отбеливания на двух целлюлозно-бумажных комбинатах в Архангельской и Иркутской областях. Для достижения максимальной реакционной способности древесных полисахаридов к воздействию ферментов использовали образцы технических целлюлоз, не подвергавшихся высушиванию [1].

Ферментные препараты

Для гидролиза применяли комплексные ферментные препараты ксиланаз, целлюлаз и других гликозил-гидролаз на основе рекомбинантного штамма аскомицетного гриба *Penicillium verrucosum* 537 (*ΔniaD*) [25] (ФП PV №1-3), опытного препарата β-маннаназы гриба *Myceliophthora thermophila* [8], а также моноферментного препарата эндоксилаказы XylE мицелиального гриба *Penicillium canescens*, полученного хроматографическим фракционированием ферментного комплекса аскомицетного гриба, [6] и коммерческого препарата эндоксилаказы АВ Enzymes (Германия). Расход ферментных препаратов определяли по ключевым активностям по отношению к модельным углеводным субстратам — карбоксиметилцеллюлозе (КМЦ, эндоглюканазы, ЭГ), микрокристаллической целлюлозе (МКЦ, целлобиогидролазы ЦБГ), ксилану бука (ксилазная, КСИЛ, активность), маннану из семян рожкового дерева (маннаназная, МАН активность) и пара-нитрофенилглюкопиранозиду (*n*-НФГ, β-глюкозидазная, БГЛ активность). Количественные показатели активности представлены в табл. 1.

Таблица 1. Субстратная специфичность ферментных препаратов

*ед./мл препарата; ** н/о - не определялось

Table 1. Substrate specificity of enzyme preparations

*units/ml of preparation; **n/o - not determined

Название	Активность фермента по субстрату, ед/г препарата				
	КМЦ	Ксилан	МКЦ	<i>n</i> -НФГ	Маннан
ФП PV №1	2500	1400	65	80	74
ФП PV №2	740	5250	44	49	59
ФП PV №3	1640	4040	45	54	79
β-маннаназа <i>M. thermophila</i>	4635	2775	90	н/о**	17130
Эндоксилаказа (АВ Enzymes)	15*	10500*	-	-	-
Эндоксилаказа Xyl E	-	130*	-	-	-

Ферментативный гидролиз и анализ продуктов биоконверсии

Ферментативный гидролиз проводили при pH 5,0, поддерживаемом за счет натрий-ацетатного буфера, в диапазоне температур 50–65 °С при постоянном перемешивании в лабораторных био-реакторах двух типов: ферментере Biostat A Plus 1L (Sartorius, Германия) и шейкере — инкубаторе ES-200 (Biosan, Латвия). Концентрацию сухого вещества субстрата в реакционной среде варьировали в пределах 3–10 %. Образцы ОС в порошко-

образной форме получали при удалении влаги из гидролизатов в лиофильной сушилке FreeZone 2,5 (Labconco, США). Анализ количественного содержания восстанавливающих сахаров (ВС), образующихся в результате ферментативного гидролиза древесных полисахаридов, проводили методом Шомоди-Нельсона с параллельным определением содержания глюкозы глюкозооксидазным методом [2]. По этим показателям рассчитывали степень конверсии технических целлюлоз, как описано в статье [24]. Степень полимеризации (СП) олиго-

сахаридов определяли с помощью анализа углеводного состава гидролизатов до и после инверсии сахаров [24] с применением высокоэффективной анионообменной хроматографии в хроматографической системе высокого давления Agilent 1200 (Agilent technologies, США) с автоматической системой ввода пробы, электрохимическим детектором Coulochem III (Thermo Scientific ESA, США) с использованием колонок CarboPac PA20 и CarboPac PA200 (Dionex, США) с соответствующими предколонами, в ФИЦ Биотехнологии РАН (Россия). В качестве стандартов для калибровки хроматографической системы были использованы моносахариды (арабиноза, глюкоза, ксилоза, манноза, фруктоза), КОС со СП 2-5 (ксилобиоза, ксилотриоза, ксилотетраоза и ксилопентаоза), ЦОС со СП 2-4 (целлобиоза, целлотриоза, целлотетраоза), ФОС (кестоза, кестотетраоза, кестопентаоза, инулотриоза) и сахароза.

Оценка биодоступности олигосахаридов

Биодоступность полученных ОС исследовали, культивируя пробиотические бактерии на среде MRS [5], в которой глюкоза была заменена на эквивалентное количество (по массе) исследуемых ОС. В качестве референсного образца применяли коммерческий препарат ФОС 95%-ной чистоты из сахарного тростника (Nichiga, Япония) и препарат КОС (образец № 4, табл. 2), полученный в результате гидролиза эндоксилазой АВ Enzymes ксилана овса. Культуры *Pediococcus acidilactici* LR-1, *Lactiplantibacillus plantarum* FCa3L, *L. plantarum* S10 [3] и *L. plantarum* 8PA3 (ВКПМ В-11007), выращенные в течение 16–18 ч на стандартной среде MRS, использовали для засева модифицированной жидкой и плотной (содержащей дополнительно 2 % агар) среды MRS. Культуры инкубировали 24 ч при 37 °С, после чего оценивали рост бактерий по интенсивности штриха и оптической плотности (ОП) при длине волны 600 нм.

Таблица 2. Характеристика образцов олигосахаридов, полученных ферментативным гидролизом целлюлозо-/ксиланосодержащих технических субстратов

¹Субстрат представляет собой ксилан, выделенный из овса физико-химическим методом

²Препарат эндоксилазы зарубежного производства (АВ Enzymes, Германия)

Table 2. Characteristics of oligosaccharide samples obtained by enzymatic hydrolysis of cellulose/xylan-containing substrates

¹The substrate is xylan isolated from oats by a physical and chemical method

²Endoxylanase preparation of foreign production (АВ Enzymes, Germany)

№ п.п	Состав сырья, доля в %	Условия ферментативного гидролиза	Основные активности ферментов, ед/г с.в. суб.	Степень конверсии субстрата, %	Средняя СП ОС, ед; Преобладающий ОС	Доля ОС от общего количества ВС, %
1	Береза, 50 Осина, 50	Концентрация субстрата 10%, рН 5,0, температура 50 °С, 1,5 ч.	ЭГ, 1100 КСИЛ, 610 ЦБГ, 20 БГЛ, 14 МАН, 35	15,8	2,0 Целлобиоза : ксилобиоза = 1:1	47,2
2	Ель, 50 Сосна, 50	Концентрация субстрата 10%, рН 5,0, температура 50 °С, 1,5 ч.	ЭГ, 290 КСИЛ, 2350 ЦБГ, 20 БГЛ, 26 МАН, 23	13,3	2,5 Целлобиоза	39,2
3	Береза, 50 Осина, 50	Концентрация субстрата 10%, рН 5,0, температура 50 °С, 1,5 ч.	КСИЛ, 5	1,0	2,4 Ксилобиоза	31,2
4	Овес, 100 ¹	Концентрация субстрата 3%, рН 5,0, температура 65 °С, 4 ч.	КСИЛ ² , 21	68,6	2,9 Ксилобиоза: ксилотриоза: ксилотетраоза = 3 : 1 : 3	88,3
5	Береза, 37 Лиственница, 30 Сосна, 29 Осина, 4	Концентрация субстрата 7%, рН 5,0, температура 65 °С, 5 ч.	ЭГ, 14 КСИЛ, 105 ЦБГ, 0,9 БГЛ, 1 МАН, 29	7,6	2,04 Ксилобиоза: целлобиоза = 1 : 1	72,2

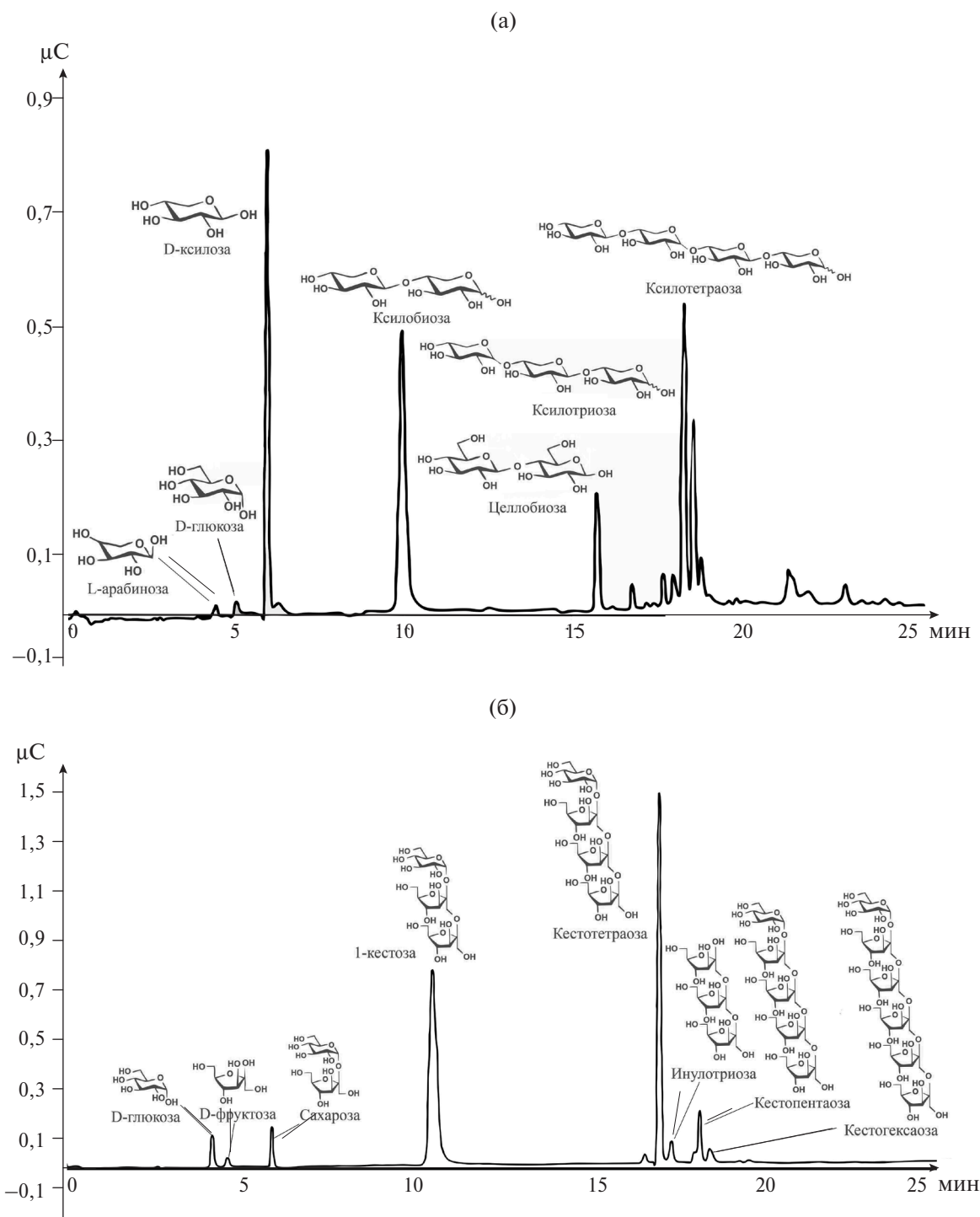


Рис. 1. Хроматографические профили препарата №4 (А) и ФОС (Б)

Fig. 1. Chromatographic profiles of sample №4 (A) and FOS (Б)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе получена линейка препаратов олигосахаридов из технических целлюлоз различных пород древесины. Выход, тип и средняя степень полимеризации олигосахаридов варьировали в зависимости от соотношения и активности ферментов в составе

ферментного комплекса (табл. 1). Эндоглюканазы и эндоксилаказы в присутствии экзо-гидролазы и β -глюкозидазы катализировали деполимеризацию полисахаридов на начальных стадиях гидролиза технической целлюлозы как из лиственных, так и из хвойных пород древесины до олигомеров целлюлозы и ксилана с СП в диапазоне 2–3 ед. (табл. 2).

Наличие β-глюкозидаз в составе ферментных препаратов способствовало гидролизу ОС до мономеров, что сопровождалось снижением доли ОС от общего количества ВС до 39–47 %, тогда как оптимизированный комплекс с минимизированным расходом β-глюкозидаз и целлюбиогидролаз обеспечивал больший (72,2 %) выход ОС от общего количества ВС при почти вдвое меньшей степени конверсии. Моноферментные эндоксилазы, выделенные из комплекса ферментов хроматографическим фракционированием, отличались отсутствием сторонних, например, целлюлазных или иных активностей, и поэтому способствовали избирательной деполимеризации ксилана технической целлюлозы из лиственных пород древесины до КОС с низким содержанием примесей целлюлозной природы, однако отсутствие эндоглюканазного воздействия существенно снизило выход ОС от массы субстрата. Ксиланаза *P. canescens* обеспечивала деполимеризацию ксилана, адсорбированного на поверхности целлюлозных волокон в процессе сульфатной варки

[22]. Однако локализованный внутри целлюлозных фибрилл ксилан остался недоступным для атаки ксиланазами. Для раскрытия структуры волокна необходимо было воздействие эндоглюканаз на целлюлозные фибриллы, результатом которого также является образование ЦОС. Контрольный образец КОС (рис. 1а), полученного из ксилана, выделенного из лигноцеллюлозной матрицы овса физико-химическим методом, максимально быстро подвергался гидролизу при использовании коммерческой эндоксилазы АВ Enzymes. Наибольший выход ОС от общего количества ВС составил 88,3 %, однако продукт гидролиза представлял собой смесь длинноцепочечных КОС, которые, согласно исследованиям [11], хуже утилизируются пробиотическими штаммами. В работах по получению пребиотических ОС отмечается, что биозы и триозы потребляются бактериями уже на начальном этапе культивирования, обеспечивая больший прирост биомассы по сравнению с глюкозой [11, 33].

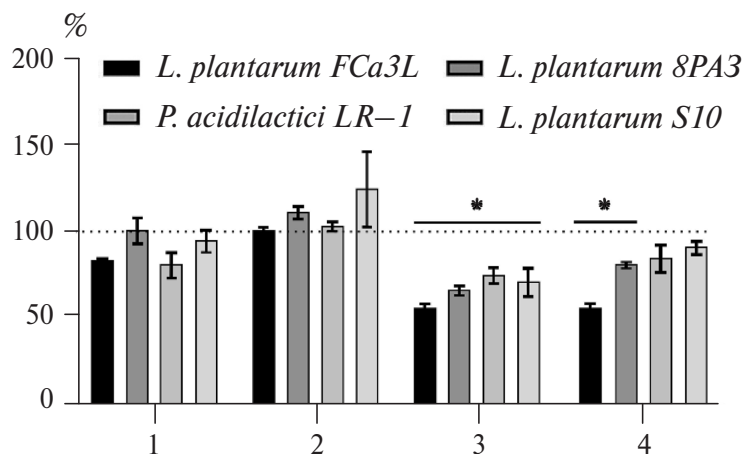


Рис. 2. Влияние олигосахаридов и ксилозы на рост (% от роста на среде MRS) пробиотических штаммов бактерий *L. plantarum* FCa3L, *P. acidilactici* LR-1, *L. plantarum* 8PA3, *L. plantarum* S10: 1 — ксилоза, 2 — древесные олигосахариды (образец № 5 в табл. 2), 3 — фруктоолигосахариды, 4 — ксилоолигосахариды (образец №4 в табл. 2). Приведены средние значения ± стандартное отклонение в пяти биологических повторях. Достоверное отличие от роста на среде MRS с глюкозой в % ($p < 0,05$) согласно множественному t-тесту с поправкой Холма-Шидака

Fig. 2. Effect of oligosaccharides and xylose on the growth (% of growth on MRS medium) of probiotic bacterial strains *L. plantarum* FCa3L, *P. acidilactici* LR-1, *L. plantarum* 8PA3, *L. plantarum* S10: 1 — xylose, 2 — wood oligosaccharides (sample No. 5 in Table. 2), 3 — fructooligosaccharides, 4 — xylooligosaccharides (sample No. 4 in Table 2). The values are the mean ± standard deviation of five biological replicates. Significant difference from growth on MRS medium with glucose in % ($p < 0.05$) according to the multiple t-test with Holm-Sidak correction

Для проверки гипотезы преимущественного гидролиза короткоцепочечных ОС и оценки возможности использования полученных ОС в качестве питательных субстратов для выращивания пробиотиков, пробиотические бактерии культивировали на среде MRS, в которой глюкоза была заменена на эквивалентное количество ОС или ксилозы, или типичного древесного сахара. Накопление биомассы бактерий *L. plantarum* S10 и *P. aci-*

dilactici LR-1 не различалось на средах с глюкозой и ксилозой в контрольных условиях, но штаммы *L. plantarum* FCa3L и 8PA3 характеризовались на 15–20 % меньшей биомассой на среде с ксилозой по сравнению со средой с глюкозой (рис. 2). Полученные данные сопоставимы с ростом на плотной питательной среде. КОС, полученные из ксилана овса с применением эндоксилазы АВ Enzymes с минимальным присутствием других активностей,

утилизовались пробиотическими штаммами бактерий в равной или превосходящей степени по сравнению с коммерческими ФОС (рис. 1б), которые в литературе рассматривают как типичный пребиотик для поддержания здоровья ЖКТ [18]. Снижение скорости роста бактерий на средах с ФОС и КОС в качестве питательного субстрата по сравнению со средой, содержащей глюкозу или ксилозу, может быть обусловлено необходимостью адаптации метаболизма бактерий для утилизации ОС с большей длиной цепи и индукции синтеза экзогидролаз для деполимеризации ОС до моносахаридов [9]. В свою очередь, это позволяет рассматривать ОС как перспективный питательный субстрат за счет их превращения в большее количество моносахаридов. Преобладание короткоцепочечных целлюлозных и гемицеллюлозных ОС и наличие моносахаридных примесей (менее 28%) обеспечило наилучшую биодоступность препарата № 5, причем штамм *L. plantarum* S10 проявил наиболее высокую способность к гидролизу целлюлозы и других ОС этого образца, вероятно, за счет активации метаболизма за счет моносахаридов препарата. Препарат 4 характеризовался большей длиной цепи ксилоолигосахаридов, чем препарат 5, что требовало больше времени на гидролитическое расщепление ксилотриоз и ксилотетраоз. В свою очередь, в сочетании с низким количеством моносахаридных примесей это, по-видимому, приводило к более медленному росту пробиотических штаммов на среде, где препарат 4 был единственным источником углеводов. Препарат 5 содержал примеси моносахаридов (34 масс. % глюкозы), которые ассимилировались бактериями в первую очередь, но более интенсивный рост пробиотических бактерий по сравнению с ростом на стандартной MRS-среде с глюкозой достигался быстрее всего за счет дисахаридов (57 масс. %) и трисахаридов (3 масс.%). Таким образом, древесные ОС могут рассматриваться в качестве потенциальных субстратов для выращивания, утилизирующих ксилозу пробиотических микроорганизмов.

Возможность получения целлюлозных и гемицеллюлозных ОС расширяет спектр продуктов,

получаемых из древесного сырья в рамках развития биоэкономической повестки [33]. Применение ферментов для этой цели, с одной стороны, предъявляет высокие требования к предварительной подготовке полисахаридных субстратов, с другой стороны, во многом основывается на опыте использования гликозил-гидролаз в целлюлозно-бумажной промышленности [11]. Кроме того, предлагаемая технология, заключающаяся в контролируемом биокаталитическом воздействии на влажную техническую целлюлозу из древесины хвойных и лиственных пород деревьев, повышает эффективность комплексной переработки этого вида возобновляемого ресурса [24]. Такой подход в схеме биоконверсии технических целлюлоз целесообразно использовать на начальном этапе, когда наряду с направленным получением древесных ОС будут происходить изменения физико-химических характеристик субстратов, способствующих последующему доступу целлюлазно-гемицеллюлазного комплекса ферментов. Выделение ОС при реализации ранее разработанной концепции биорефайнинга сульфатной и сульфитных целлюлоз [24] возможно и после стадии микробиологического синтеза продуктов с высокой добавленной стоимостью. Для получения индивидуальных препаратов ОС, как правило, используют технологии мембранного или хроматографического разделения, однако более перспективным является применение в качестве пребиотических композиций ОС с различным составом ксило-, целло-, и манноолигосахаридов, что делает данный продукт универсальным питательным агентом для различных пробиотических микроорганизмов.

Таким образом, коммерческая доступность древесных полисахаридных субстратов, промышленно вырабатываемых в России, в сочетании с высокоэффективными отечественными препаратами гликозил-гидролаз является платформой для продолжения исследований ростовых и протекторных свойств древесных олигосахаридов и дальнейшей разработки новых биологически активных добавок и препаратов с синбиотическим эффектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aksenov A.S., Tyshkunova I.V., Poshina D.N., et al. Biocatalysis of industrial kraft pulps: similarities and differences between hardwood and softwood pulps in hydrolysis by enzyme complex of *Penicillium verruculosum*. *Catalysts*. 2020. V. 10. № 5. P. 536. <https://doi.org/10.3390/catal10050536>
2. Аксенов А.С., Синельников И.Г., Шевченко А.Р. и др. Ферментативная конверсия промышленных целлюлозно-бумажных полуфабрикатов // Прикл. биохимия и микробиология. 2024. Т. 60. № 3. С. 274–283. <https://doi.org/10.31857/S0555109924030068>
3. Anisimova E.A., Yarullina D.R., Ilyinskaya O.N. Antagonistic activity of lactobacilli isolated from natural ecotopes. *Microbiology*. 2017. V. 86. № 6. P. 696–702. <https://doi.org/10.1134/S0026261717060054>
4. da Silva M.F., Bueno D., Goldbeck R. Challenges and trends in the industrial production and application of cello-oligosaccharides. *Curr. Opin. Food Sci.* 2025. V. 63. P. 101308. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2025.101308>

5. De Man J.C., Rogosa M., Sharpe M.T. A medium for the cultivation of lactobacilli. *J. Appl. Bacteriol.* 1960. V. 23. P. 130–135. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1960.tb00188.x>
6. Denisenko Y.A., Merzlov D.A., Gusakov A.V., Chekushina A.V., Sinitsyn A.P. Comparative characterization of xylanases XylA and XylE from *Penicillium canescens* fungi. *Mosc. Univ. Chem. Bull.* 2015. V. 70. № 6. P. 278–282. <https://doi.org/10.3103/S0027131415060012>
7. Dieryck I., Dejonghe W., Hecke W.V., et al. Toward renewable-based prebiotics from woody biomass: Potential of tailored Xylo-Oligosaccharides obtained by enzymatic hydrolysis of beechwood Xylan as a prebiotic feed supplement for young broilers. *Animals.* 2023. V. 13. № 22. P. 3511. <https://doi.org/10.3390/ani13223511>
8. Доценко Г.С., Семенова М.В., Сеницына О.А. и др. Клонирование, выделение и характеристика галактоманнан-гидролизующих ферментов *Muceliophthora thermophila* // Биохимия. 2012. Т. 77. № 11. С. 1556–1566.
9. Gänzle M.G., Follador R. Metabolism of oligosaccharides and starch in lactobacilli: a review. *Front. Micro.* 2012. V. 3. P. 340. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00340>
10. Han S., Lu Y., Xie J., et al. Probiotic gastrointestinal transit and colonization after oral administration: a long journey. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 2021. V. 11. P. 609722. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.609722>
11. Iliev I., Vasileva T., Bivolarski V., Momchilova A., Ivanova I. Metabolic profiling of xylooligosaccharides by Lactobacilli. *Polymers.* 2020. V. 12 № 10. 2387. <https://doi.org/10.3390/polym12102387>
12. La Rosa S.L., Kachrimanidou V., Buffetto F., et al. Wood-derived dietary fibers promote beneficial human gut microbiota. *MSphere.* 2019. V. 4. V. 1. <https://doi.org/10.1128/mSphere.00554-18>
13. Li X.Y., Chen X.G., Cha D.S. et al. Microencapsulation of a probiotic bacteria with alginate–gelatin and its properties. *J. Microencapsul.* 2009. V. 26. № 4. P. 315–324. <https://doi.org/10.1080/02652040802328685>
14. Liao N., Luo B., Gao J., et al. Oligosaccharides as co-encapsulating agents: effect on oral *Lactobacillus fermentum* survival in a simulated gastrointestinal tract. *Biotechnol. Lett.* 2019. V. 41. № 2. P. 263–272. <https://doi.org/10.1007/s10529-018-02634-6>
15. Луицкая К.В., Николаев И.В., Торкова А.А., и др. Анализ функциональных свойств биологически активных веществ на моделях эукариотических клеток (обзор) // Прикл. биохимия и микробиология. 2012. Т. 48. № 6. С. 581–581.
16. Novik G.I., Astapovich N.I., Ryabaya N.E. Production of hydrolases by lactic acid bacteria and bifidobacteria and their antibiotic resistance. *Appl. Biochem. Microbiol.* 2007. V. 43. P. 164–172. <https://doi.org/10.1134/S0003683807020068>
17. Ohbuchi T., Takahashi T., Azumi N., Sakaino M. Structural analysis of neutral and acidic xylooligosaccharides from hardwood kraft pulp, and their utilization by intestinal bacteria in vitro // *Biosci. Biotech. Biochem.* 2009. V. 73. № 9. P. 2070–2076. <https://doi.org/10.1271/bbb.90260>
18. Pandey K., Naik S.R., Vakil B.V. Probiotics, prebiotics and synbiotics- a review. *J. Food Sci. tech.* 2015. V. 52. № 12. P. 7577–7587. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1921-1>
19. Perez-Perez A., Gullon B., Lobato-Rodrigues A., et al. Microwave-assisted extraction of hemicellulosic oligosaccharides and phenolics from *Robinia pseudoacacia* wood. *Carb. Pol.* 2023. V. 301. P. 120364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120364>
20. Rajagopalan G., Shanmugavelu K., Yang K.L. Production of prebiotic-xylooligosaccharides from alkali pretreated mahogany and mango wood sawdust by using purified xylanase of *Clostridium* strain BOH3. *Carb. Pol.* 2017. V. 167. P. 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.021>
21. Rajan K., D’Souza D.H., Kim K., et al. Production and characterization of high value prebiotics from biorefinery-relevant feedstocks. *Front. Microbiotechnology.* 2021. V. 12. P. 675314. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.675314>
22. Rajani J., Dastar B., Samadi F., et al. Effect of extracted galactoglucomannan oligosaccharides from pine wood (*Pinus brutia*) on *Salmonella typhimurium* colonisation, growth performance and intestinal morphology in broiler chicks. *Brit. Poultry Sci.* 2016. V. 57. № 5. P. 682–692. <https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1200013>
23. Remón J., Li T., Chuck C.J., Matharu A.S., Clark J.H. Toward renewable-based, food-applicable prebiotics from biomass: a one-step, additive-free, microwave-assisted hydrothermal process for the production of high purity xylo-oligosaccharides from beech wood hemicellulose. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2019. V. 7. № 19. P. 16160–16172. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03096>
24. Shevchenko A., Mayorova K., Chukhchin D., et al. Enzymatic hydrolysis of kraft and sulfite pulps: what is the best cellulosic substrate for industrial saccharification? *Fermentation.* 2023. V. 9. № 11. P. 936. <https://doi.org/10.3390/fermentation9110936>
25. Sinitsyn A.P., Korotkova O.G., Rubtsova E.A., et al. Construction of recombinant producers of enzyme preparations for feed production with an expression system based on *Penicillium verrucosum* fungus. *Appl. Biochem. Micro.* 2020. V. 56. № 8. P. 875–880. <https://doi.org/10.1134/s0003683820080104>

26. Tiboni M., Grzybowski A., Baldo G.R., et al. Thermopressurized diluted phosphoric acid pretreatment of ligno (hemi) cellulose to make free sugars and nutraceutical oligosaccharides. *J. Ind. Micro. Biotech.* 2014. V. 41. № 6. P. 957–964. <https://doi.org/10.1007/s10295-014-1426-3>
27. Valcheva R., Dieleman L.A. Prebiotics: Definition and protective mechanisms. *Best Pract. Res. Cl. Ga.* 2016. V. 30. № 1. P. 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.bpg.2016.02.008>
28. van der Waals J., O'Callahan D., Campion S., et al. Boosting softwood hemicellulose hydrolysis: Enzymes from a new fungi *Penicillium rotoruae* remarkably improve CTec-2 hydrolysis efficiency and reduce sugar production costs. *Biores. Tech.* 2026. V. 441. P. 133486. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133486>
29. Vázquez M.J., Alonso J.L., Dominguez H., Parajo J.C. Xylooligosaccharides: manufacture and applications. *Food Biotech.* 2002. V. 16. № 2. P. 91–105. <https://doi.org/10.1081/FBT-120014321>
30. Verma D., Satyanarayana T. Cloning, expression and applicability of thermo-alkali-stable xylanase of *Geobacillus thermoleovorans* in generating xylooligosaccharides from agro-residues. *Biores. Tech.* 2012. V. 107. P. 333–338. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.055>
31. Whelan K., Alexander M., Gaiani C. et al. Design and reporting of prebiotic and probiotic clinical trials in the context of diet and the gut microbiome. *Nat. Microbiol.* 2024. V. 9. № 11. P. 2785–2794. <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01831-6>
32. Yassine F., Najm A., Bilen M. The role of probiotics, prebiotics, and synbiotics in the treatment of inflammatory bowel diseases: an overview of recent clinical trials. *Front. Syst. Biol.* 2025. V. 5. P. 1561047. <https://doi.org/10.3389/fsysb.2025.1561047>
33. Zeng M., Oh, J.H., van Pijkeren J.P., Pan X. Selective utilization of gluco-oligosaccharides by lactobacilli: A mechanism study revealing the impact of glycosidic linkages and degree of polymerization on their utilization. *J. Food Sci.* 2024. V. 89. № 1. P. 523–539. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16851>
34. Zhao M., Qu F., Wu Z., et al. Protection mechanism of alginate microcapsules with different mechanical strength for *Lactobacillus plantarum* ST-III. *Food Hydro.* 2017. V. 66. P. 396–402. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.013>

References

1. Aksenov A.S., Tyshkunova I.V., Poshina D.N., et al. Biocatalysis of industrial kraft pulps: similarities and differences between hardwood and softwood pulps in hydrolysis by enzyme complex of *Penicillium verruculosum*. *Catalysts.* 2020. V. 10. № 5. P. 536. <https://doi.org/10.3390/catal10050536>
2. Aksenov A.S., Sinelnikov I.G., Shevchenko A.R., et al. Enzymatic conversion of wood materials from the pulp and paper industry. *Appl. Biochem. Micro.* 2024. V. 1. 60. No. 3. P. 274–283. <https://doi.org/10.31857/S0555109924030068>
3. Anisimova E.A., Yarullina D.R., Ilyinskaya O.N. Antagonistic activity of lactobacilli isolated from natural ecotopes. *Microbiology.* 2017. V. 86. № 6. P. 696–702. <https://doi.org/10.1134/S0026261717060054>
4. da Silva M. F., Bueno D., Goldbeck R. Challenges and trends in the industrial production and application of cellooligosaccharides. *Curr. Opin. Food Sci.* 2025. V. 63. P. 101308. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2025.101308>
5. De Man J.C., Rogosa M., Sharpe M.T. A medium for the cultivation of lactobacilli. *J. Appl. Bacteriol.* 1960. V. 23. P. 130–135. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1960.tb00188.x>
6. Denisenko Y.A., Merzlov D.A., Gusakov A.V., Chekushina A.V., Sinitsyn A.P. Comparative characterization of xylanases XylA and XylE from *Penicillium canescens* fungi. *Mosc. Univ. Chem. Bull.* 2015. V. 70. № 6. P. 278–282. <https://doi.org/10.3103/S0027131415060012>
7. Dieryck I., Dejonghe W., Hecke W.V., et al. Toward renewable-based prebiotics from woody biomass: Potential of tailored Xylo-Oligosaccharides obtained by enzymatic hydrolysis of beechwood Xylan as a prebiotic feed supplement for young broilers. *Animals.* 2023. V. 13. № 22. P. 3511. <https://doi.org/10.3390/ani13223511>
8. Dotsenko G.S., Semenova M.V., Sinitsyna O.A., et al. Cloning, isolation, and characterization of galactomannan-hydrolyzing enzymes from *Myceliophthora thermophila*. *Biochemistry.* 2012. V. 77. №. 11. P. 1556–1566.
9. Gänzle M.G., Follador R. Metabolism of oligosaccharides and starch in lactobacilli: a review. *Front. Micro.* 2012. V. 3. P. 340. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00340>
10. Han S., Lu Y., Xie J. et al. Probiotic gastrointestinal transit and colonization after oral administration: a long journey. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 2021. V. 11. P. 609722. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.609722>
11. Iliev I., Vasileva T., Bivolarski V., Momchilova A., Ivanova I. Metabolic profiling of xylooligosaccharides by Lactobacilli. *Polymers.* 2020. V. 12 № 10. 2387. <https://doi.org/10.3390/polym12102387>
12. La Rosa S.L., Kachrimanidou V., Buffetto F., et al. Wood-derived dietary fibers promote beneficial human gut microbiota. *MSphere.* 2019. V. 4. V. 1. <https://doi.org/10.1128/mSphere.00554-18>
13. Li X.Y., Chen X.G., Cha D.S. et al. Microencapsulation of a probiotic bacteria with alginate–gelatin and its properties. *J. Microencapsul.* 2009. V. 26. № 4. P. 315–324. <https://doi.org/10.1080/02652040802328685>

14. Liao N., Luo B., Gao J., et al. Oligosaccharides as co-encapsulating agents: effect on oral *Lactobacillus fermentum* survival in a simulated gastrointestinal tract. *Biotechnol. Lett.* 2019. V. 41. № 2. P. 263–272. <https://doi.org/10.1007/s10529-018-02634-6>
15. Lisitskaya K.V., Nikolaev I.V., Torkova A.A., et al. Analysis of the functional properties of biologically active substances on models of eukaryotic cells (review). *Appl. Biochem. Micro.* 2012. V. 48. № 6. P. 581–581.
16. Novik G.I., Astapovich N.I., Ryabaya N.E. Production of hydrolases by lactic acid bacteria and bifidobacteria and their antibiotic resistance. *Appl. Biochem. Microbiol.* 2007. V. 43. P. 164–172. <https://doi.org/10.1134/S0003683807020068>
17. Ohbuchi T., Takahashi T., Azumi N., Sakaino M. Structural analysis of neutral and acidic xylooligosaccharides from hardwood kraft pulp, and their utilization by intestinal bacteria in vitro // *Biosci. Biotech. Biochem.* 2009. V. 73. № 9. P. 2070–2076. <https://doi.org/10.1271/bbb.90260>
18. Pandey K., Naik S.R., Vakil B.V. Probiotics, prebiotics and synbiotics- a review. *J. Food Sci. tech.* 2015. V. 52. № 12. P. 7577–7587. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1921-1>
19. Perez-Perez A., Gullon B., Lobato-Rodrigues A., et al. Microwave-assisted extraction of hemicellulosic oligosaccharides and phenolics from *Robinia pseudoacacia* wood. *Carb. Pol.* 2023. V. 301. P. 120364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120364>
20. Rajagopalan G., Shanmugavelu K., Yang K.L. Production of prebiotic-xylooligosaccharides from alkali pretreated mahogany and mango wood sawdust by using purified xylanase of *Clostridium* strain BOH3. *Carb. Pol.* 2017. V. 167. P. 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.021>
21. Rajan K., D'Souza D.H., Kim K., et al. Production and characterization of high value prebiotics from biorefinery-relevant feedstocks. *Front. Microbiotechnology.* 2021. V. 12. P. 675314. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.675314>
22. Rajani J., Dastar B., Samadi F., et al. Effect of extracted galactoglucomannan oligosaccharides from pine wood (*Pinus brutia*) on *Salmonella typhimurium* colonisation, growth performance and intestinal morphology in broiler chicks. *Brit. Poultry Sci.* 2016. V. 57. № 5. P. 682–692. <https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1200013>
23. Remón J., Li T., Chuck C.J., Matharu A.S., Clark J.H. Toward renewable-based, food-applicable prebiotics from biomass: a one-step, additive-free, microwave-assisted hydrothermal process for the production of high purity xylo-oligosaccharides from beech wood hemicellulose. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2019. V. 7. № 19. P. 16160–16172. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03096>
24. Shevchenko A., Mayorova K., Chukhchin D., et al. Enzymatic hydrolysis of kraft and sulfite pulps: what is the best cellulosic substrate for industrial saccharification? *Fermentation.* 2023. V. 9. № 11. P. 936. <https://doi.org/10.3390/fermentation9110936>
25. Sinitsyn A.P., Korotkova O.G., Rubtsova E.A., et al. Construction of recombinant producers of enzyme preparations for feed production with an expression system based on *Penicillium verrucosum* fungus. *Appl. Biochem. Micro.* 2020. V.56. № 8. P. 875–880. <https://doi.org/10.1134/s0003683820080104>
26. Tiboni M., Grzybowski A., Baldo G.R., et al. Thermopressurized diluted phosphoric acid pretreatment of ligno (hemi) cellulose to make free sugars and nutraceutical oligosaccharides. *J. Ind. Micro. Biotech.* 2014. V. 41. № 6. P. 957–964. <https://doi.org/10.1007/s10295-014-1426-3>
27. Valcheva R., Dieleman L.A. Prebiotics: Definition and protective mechanisms. *Best Pract. Res. Cl. Ga.* 2016. V. 30. № 1. P. 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.bpg.2016.02.008>
28. van der Waals J., O'Callahan D., Campion S., et al. Boosting softwood hemicellulose hydrolysis: Enzymes from a new fungi *Penicillium rotoruae* remarkably improve CTec-2 hydrolysis efficiency and reduce sugar production costs. *Biores. Tech.* 2026. V. 441. P. 133486. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133486>
29. Vázquez M.J., Alonso J.L., Dominguez H., Parajo J.C. Xylooligosaccharides: manufacture and applications. *Food Biotech.* 2002. V. 16. № 2. P. 91–105. <https://doi.org/10.1081/FBT-120014321>
30. Verma D., Satyanarayana T. Cloning, expression and applicability of thermo-alkali-stable xylanase of *Geobacillus thermoleovorans* in generating xylooligosaccharides from agro-residues. *Biores. Tech.* 2012. V. 107. P. 333–338. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.055>
31. Whelan K., Alexander M., Gaiani C. et al. Design and reporting of prebiotic and probiotic clinical trials in the context of diet and the gut microbiome. *Nat. Microbiol.* 2024. V. 9. № 11. P. 2785–2794. <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01831-6>
32. Yassine F., Najm A., Bilen M. The role of probiotics, prebiotics, and synbiotics in the treatment of inflammatory bowel diseases: an overview of recent clinical trials. *Front. Syst. Biol.* 2025. V. 5. P. 1561047. <https://doi.org/10.3389/fsysb.2025.1561047>
33. Zeng M., Oh, J.H., van Pijkeren J.P., Pan X. Selective utilization of gluco-oligosaccharides by lactobacilli: A mechanism study revealing the impact of glycosidic linkages and degree of polymerization on their utilization. *J. Food Sci.* 2024. V. 89. № 1. P. 523–539. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16851>

34. Zhao M., Qu F., Wu Z., et al. Protection mechanism of alginate microcapsules with different mechanical strength for *Lactobacillus plantarum* ST-III. *Food Hydro.* 2017. V. 66. P. 396–402. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.013>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Майорова Ксения Александровна — инженер научно-исследовательского управления Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация

E-mail: ksu100103@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7009-2500>

Каюмов Айрат Рашитович — д.б.н., заведующий кафедрой института фундаментальной медицины и биологии Казанского (Приволжского) федерального университета, Казань, Российская Федерация

E-mail: kairatr@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7195-1557>

Зоров Иван Никитич — к.х.н., с.н.с. лаборатории биотехнологии ферментов ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Российская Федерация

E-mail: inzorov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6888-172X>

Шевченко Александр Русланович — ассистент кафедры биологии, экологии и биотехнологии, м.н.с. Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация

E-mail: a.shevchenko@narfu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1220-9234>

Латипова Илида Алмазовна — лаборант-исследователь института фундаментальной медицины и биологии Казанского (Приволжского) федерального университета, Казань, Российская Федерация

E-mail: ilida24@mail.ru

Яруллина Дина Рашидовна — к.б.н., доцент института фундаментальной медицины и биологии Казанского (Приволжского) федерального университета, Казань, Российская Федерация

E-mail: kasfes@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0717-302X>

Аксёнов Андрей Сергеевич — к.т.н., профессор кафедры биологии, экологии и биотехнологии Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация

E-mail: a.s.aksenov@narfu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1013-1357>

ABOUT THE AUTHORS

Mayorova, Ksenia A. — Engineer of the Research Department of the Northern (Arctic) federal university named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

E-mail: ksu100103@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7009-2500>

Kayumov, Airat R. — D.Sc. in Biology, Head of the Department of the Institute of Fundamental Medicine and Biology of the Kazan (Volga Region) federal university, Kazan, Russian Federation

E-mail: kairatr@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7195-1557>

Zorov, Ivan N. — PhD in Chemistry, Senior Researcher at the Laboratory of Enzyme Biotechnology at the Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology”, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

E-mail: inzorov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6888-172X>

Shevchenko, Alexander R. — Assistant of the Department of Biology, Ecology and Biotechnology, Junior Researcher of the Northern (Arctic) federal university named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

E-mail: a.shevchenko@narfu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1220-9234>

Latipova, Ilida A. — Research Assistant of the Institute of Fundamental Medicine and Biology of the Kazan (Volga Region) federal university, Kazan, Russian Federation

E-mail: ilida24@mail.ru

Yarullina, Dina R. — PhD in Biology, Associate Professor at the Institute of Fundamental Medicine and Biology of Kazan (Volga Region) federal university, Kazan, Russian Federation

E-mail: kasfes@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0717-302X>

Aksenov, Andrey S. — PhD in Technical Sciences, Professor at the Department of Biology, Ecology, and Biotechnology of Northern (Arctic) federal university named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

E-mail: a.s.aksenov@narfu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1013-1357>

Поступила в редакцию 30.12.2025

После доработки 30.01.2026

Принята к публикации 06.02.2026

Received December 30, 2025

Revised January 30, 2026

Accepted February 06, 2026