



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 674.8:663.15

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-153-168

Ферментативный гидролиз арабиногалактана древесины лиственницы сибирской

А.Р. Галиева¹, ассистент; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9562-0871>

Е.В. Крякунова¹, канд. биол. наук; ResearcherID: [Z-3038-2019](https://orcid.org/0000-0003-4563-9847),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4563-9847>

Л.А. Мингазова¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAO-9184-2020](https://orcid.org/0000-0003-3289-3977),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3289-3977>

З.А. Канарская¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAG-2997-2020](https://orcid.org/0000-0002-8194-6185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8194-6185>

А.В. Канарский¹✉, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-8113-2016](https://orcid.org/0000-0002-3541-2588),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

А.Г. Кузнецов², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AEX-1353-2022](https://orcid.org/0000-0003-1476-1065),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1476-1065>

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; af.signal@mail.ru, Oscillatoria@rambler.ru, leisan1@mail.ru, zosya_kanarskaya@mail.ru, alb46@mail.ru✉

²Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095;

anton.kuznetsov@hotmail.com

Поступила в редакцию 28.03.25 / Одобрена после рецензирования 16.06.25 / Принята к печати 17.06.25

Аннотация. При получении целлюлозы из растительного сырья образуются вторичные ресурсы в виде гидролизатов полисахаридов и лигнина, которые могут выступать субстратом в микробиотехнологии для производства биопродуктов. К экономически привлекательным субстратам для культивирования микроорганизмов следует отнести и арабиногалактан, переходящий по действующей технологии в щелок при получении целлюлозы из древесины лиственницы. Разработана и технология варки целлюлозы древесины лиственницы с предварительной экстракцией арабиногалактана горячей водой, что делает его доступным в качестве сырья для микробиологии. Однако не все микроорганизмы обладают необходимыми ферментами для расщепления данного субстрата, поэтому для повышения биодоступности арабиногалактан необходимо подвергнуть предварительному каталитическому, предпочтительно ферментативному, гидролизу, который является более экологически безопасным по сравнению с химическим гидролизом. Данная работа посвящена исследованию потенциала использования β-галактозидазного ферментного комплекса *Rhizopus oryzae* F-1030 для биодеградации арабиногалактана. Показана способность гриба метаболизировать и ассимилировать арабиногалактан как единственный источник углерода. Установлено, что увеличение биомассы гриба находится в прямой зависимости от концентрации арабиногалактана

в среде. Подбор рациональных условий инкубирования внеклеточной β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030 после удаления из культуральной жидкости биомассы гриба позволил достичь эффективного уровня расщепления арабиногалактана с обогащением среды редуцирующими веществами, представленными простыми сахарами. Установлено, что β -галактозидаза *R. oryzae* F-1030 при температуре 60 °C, pH 7,0 $\pm$ 0,2, наличии постоянного перемешивания проявляет высокую ферментативную активность при всех исследованных концентрациях арабиногалактана. Отмечено, что в первые 3 сут. инкубирования происходит основной прирост концентрации редуцирующих веществ в среде культивирования, тогда как в последующем увеличения содержания редуцирующих веществ почти не наблюдается вследствие истощения доступных для гидролиза ферментом β -галактозидазой связей в молекулах арабиногалактана, а также из-за возможного взаимодействия фермента с продуктами реакции. Доказано, что активность фермента β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030 находится в прямой зависимости от концентрации арабиногалактана и температуры среды культивирования. Полученные результаты позволяют рассматривать β -галактозидазу *R. oryzae* F-1030 в качестве перспективного фермента для биомодификации арабиногалактана и для совместного применения как фермента, так и арабиногалактана в кормовой промышленности.

Ключевые слова: арабиногалактан, *Rhizopus oryzae*, β -галактозидаза, ферментативный гидролиз, простые сахара, редуцирующие вещества

Для цитирования: Галиева А.Р., Крякунова Е.В., Мингазова Л.А., Канарская З.А., Канарский А.В., Кузнецов А.Г. Ферментативный гидролиз арабиногалактана древесины лиственницы сибирской // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 153–168. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-153-168>

Original article

Enzymatic Hydrolysis of Arabinogalactan from Siberian Larch Wood

Aigul R. Galieva¹, Assistant; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9562-0871>

Elena V. Kryakunova¹, Candidate of Biology; ResearcherID: [Z-3038-2019](https://orcid.org/0000-0003-4563-9847),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4563-9847>

Leysan A. Mingazova¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAO-9184-2020](https://orcid.org/0000-0003-3289-3977),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3289-3977>

Zosya A. Kanarskaya¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAG-2997-2020](https://orcid.org/0000-0002-8194-6185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8194-6185>

Albert V. Kanarsky^{1✉}, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-8113-2016](https://orcid.org/0000-0002-3541-2588),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

Anton G. Kuznetsov², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AEX-1353-2022](https://orcid.org/0000-0003-1476-1065),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1476-1065>

¹Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksа, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; af.signal@mail.ru, Oscillatoria@rambler.ru, leisan1@mail.ru, zosya_kanarskaya@mail.ru, alb46@mail.ru✉

²Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernenkh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; anton.kuznetsov@hotmail.com

Received on March 28, 2025 / Approved after reviewing on June 16, 2025 / Accepted on June 17, 2025



Abstract. When pulp is obtained from plant raw materials, secondary resources are formed represented by hydrolysates of polysaccharides and lignin, which can act as a substrate in microbiotechnology for the production of bioproducts. Arabinogalactan, which is converted into liquor by the current technology during the production of pulp from larch wood, should also be considered an economically attractive substrate for cultivating microorganisms. A technology for cooking larch wood pulp with pre-extraction of arabinogalactan with hot water has also been developed, making it available as a raw material for microbiology. However, not all microorganisms possess the necessary enzymes to break down this substrate, therefore, in order to increase the bioavailability, arabinogalactan must be subjected to preliminary catalytic, preferably enzymatic, hydrolysis, which is more environmentally friendly compared to chemical hydrolysis. This work is devoted to the investigation of the potential of using the β -galactosidase enzyme complex *Rhizopus oryzae* F-1030 for the biodegradation of arabinogalactan. The ability of the fungus to metabolize and assimilate arabinogalactan as a sole carbon source has been demonstrated. It has been established that the increase in fungal biomass is directly dependent on the concentration of arabinogalactan in the medium. The selection of rational incubation conditions for extracellular β -galactosidase *R. oryzae* F-1030 after the removal of fungal biomass from the culture fluid has made it possible to achieve an effective level of arabinogalactan cleavage with enrichment of the medium with reducing substances represented by simple sugars. It has been established that β -galactosidase *R. oryzae* F-1030 at a temperature of 60 °C, pH 7.0 $\pm$ 0.2 and constant stirring exhibits high enzymatic activity at all arabinogalactan concentrations studied. It has been noted that during the first 3 days of incubation, the main increase in the concentration of reducing substances in the culture medium occurs, whereas subsequently, almost no increase in the content of reducing substances is observed due to the depletion of bonds in arabinogalactan molecules available for hydrolysis by the β -galactosidase enzyme, as well as due to the possible interaction of the enzyme with the reaction products. It has been proven that the activity of the β -galactosidase enzyme *R. oryzae* F-1030 is directly dependent on the concentration of arabinogalactan and the temperature of the culture medium. The results obtained allow us to consider β -galactosidase *R. oryzae* F-1030 as a promising enzyme for the biomodification of arabinogalactan and for the combined use of both the enzyme and arabinogalactan in the feed industry.

Keywords: arabinogalactan, *Rhizopus oryzae*, β -galactosidase, enzymatic hydrolysis, simple sugars, reducing substances

For citation: Galieva A.R., Kryakunova E.V., Mingazova L.A., Kanarskaya Z.A., Kanarsky A.V., Kuznetsov A.G. Enzymatic Hydrolysis of Arabinogalactan from Siberian Larch Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 153–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-153-168>

Введение

Рациональное использование природных ресурсов должно основываться на комплексной переработке сырья. В этом контексте растительное сырье представляет собой особо ценный ресурс – возобновляемый и почти неисчерпаемый, что открывает широкие перспективы для его промышленной переработки. Биомасса растений представлена в основном полисахаридами, гидролитическая обработка которых позволяет получать множество моносахаридов, обладающих большим потенциалом для дальнейшей переработки и использования в различных отраслях промышленности [2]. Гидролиз полисахаридов растительного происхождения в основном осуществляется ферментативными методами, т. к. при высоком содержании сухих веществ субстрата ферментативный гидролиз предпочтительнее кислотного из-за специфичности действия

ферментов, низких температур протекания процесса, значительного выхода искомого продукта при отсутствии вторичных превращений моносахаридов. С экономической и экологической точки зрения ферментативный гидролиз также выгоднее кислотного [21, 25, 27, 36].

Основным продуктом гидролиза растительных полисахаридов являются редуцирующие вещества (РВ), представленные смесью разных сахаров и несхаристых веществ, имеющих альдегидную или кетонную группу в составе молекулы. К РВ растительного сырья относят моносахариды (глюкоза, манноза, галактоза, фруктоза, ксилоза), фурфурол, уроновые кислоты, декстрины (дисахариды, полученные при неполном гидролизе клетчатки или гемицеллюлоз – лактоза, мальтоза, целлобиоза), лигносульфоновые кислоты, гуминовые вещества [7].

Арабиногалактаны – широко распространенные в растительном мире полисахариды. Арабиногалактаны содержатся в клеточной оболочке как в свободном состоянии, так и в виде мономерной единицы макромолекулы пектиновых веществ, либо как моносахаридный остаток балластных полисахаридов: камедей, гемицеллюлоз [3, 14, 25, 26, 28, 29]. Химически чистый арабиногалактан лиственницы представляет собой белый или почти белый порошок без выраженного запаха. Технический арабиногалактан, выделяемый из древесины лиственницы предварительной экстракцией горячей водой при ее промышленной переработке, – это смесь различных водорастворимых компонентов, поэтому его гидрофильный порошок имеет бледно-кремовый цвет и обладает слабым хвойным запахом. Арабиногалактан – химически стабильное соединение, устойчивое к низким pH, нагреванию и гидролизу. Он обладает бактерицидными, иммуностимулирующими, общетонизирующими свойствами, способствует восстановлению нормобиоценоза желудочно-кишечного тракта. Названные свойства арабиногалактана способствуют его широкому применению в фармацевтической и пищевой промышленности для изготовления пребиотиков и функциональных продуктов питания [5, 23–25, 32, 33, 38, 40]. Недавние исследования показали перспективу применения арабиногалактана, модифицированного с помощью ди- и трикарбоксильных кислот, в качестве основы для экологических и биологически разлагаемых пленок, которые могут применяться в упаковочной и биомедицинской областях [31]. В животноводстве арабиногалактан используют для увеличения прироста живой массы, удоев молока и повышения резистентности организма к различным заболеваниям вследствие нормализации обмена веществ и оптимизации работы антиоксидантной системы, в результате чего повышаются адаптивные возможности организмов животных. Введение в рационы молодняка сельскохозяйственных животных и птицы арабиногалактана способствует интенсификации прироста биомассы вследствие повышения усвояемости корма и улучшения его конверсии посредством увеличения содержания в желудочно-кишечном тракте животных бифидобактерий и лактобацилл [13, 18, 19].

Мировой рынок арабиногалактана стабильно растет, что обусловлено ростом спроса на пищевые и кормовые добавки, фармацевтические препараты и функциональные продукты питания, стимулированным интересом потребителей к натуральным пребиотикам и модуляторам иммунной системы. При изготовлении кормов для животных используются кормовые добавки, полученные методом ферментации микроорганизмов на питательных средах на основе арабиногалактана [23].

Известно, что источником углерода, необходимым для набора биомассы и физиологической активности микроорганизмов, являются простые сахара – продукты гидролиза полисахаридов. Однако далеко не все микроорганизмы имеют необходимые ферменты для гидролиза арабиногалактана до простых сахаров, поэтому было бы нецелесообразно использовать интактный арабиногалактан в составе микробиологической питательной среды. Ферментом, ответственным за расщепление сложных углеводов до простых сахаров, хорошо усваиваемых всеми микроорганизмами, является β -галактозидаза (β -D-галактогидролаза), катализирующая реакции гидролиза и трансгалактозилирования олигосахаров по гликозидной связи (1-3 галактопиранозная связь и 1-6 арабинофуранозная боковая связь в арабиногалактане) [10]. Фермент β -галактозидаза продуцируется бактериями р. *Escherichia*, *Lactobacillus*, мицелиальными грибами р. *Aspergillus*, некоторыми представителями дрожжеподобных грибов и т. д. Микробные β -галактозидазы в настоящее время широко используются в биотехнологических производствах и пищевой промышленности, т. к. данный фермент способен гидролизовать лактозу. Этот фермент также может быть использован в биосинтезе галактоолигосахаридов – неперевариваемых олигосахаридов, способствующих росту полезной кишечной микрофлоры [30, 34, 39].

В зависимости от происхождения β -галактозидазы условно подразделяют на внутриклеточные и внеклеточные. Например, β -галактозидазы, полученные из мицелиальных грибов р. *Aspergillus* и *Rhizopus*, являются внеклеточными ферментами, тогда как большинство бактериальных β -галактозидаз – внутриклеточные ферменты. Структурно-механические и кинетические свойства β -галактозидазы зависят от происхождения фермента. Например, внеклеточная β -галактозидаза – гликопротеин с молекулярной массой 115–176 кДа, субъединичной структуры не имеет, не активируется металлами, характеризуется оптимальным pH 3,6–5,3. Внеклеточная β -галактозидаза более стабильна, но менее активна, чем внутриклеточная β -галактозидаза дрожжей и бактерий [17].

Соответственно, поиск продуцентов внеклеточной β -галактозидазы среди мицелиальных грибов для культивирования на субстратах-индукторах из арабиногалактана является актуальной проблемой. Проводимые исследования обосновывают целесообразность получения биопродуктов кормового назначения на основе арабиногалактана с содержанием ферментов и редуцирующих веществ.

Цель исследования – изучение возможности биodeградации технического арабиногалактана ферментной системой мицелиального гриба *Rhizopus oryzae* F-1030.

Задачи: определение возможности использования арабиногалактана в качестве источника углерода в составе питательных сред для культивирования мицелиального гриба *R. oryzae* F-1030; подбор условий инкубирования внеклеточной β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030 для максимальной биоконверсии арабиногалактана и обогащения культуральной жидкости редуцирующими веществами.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служил мицелиальный гриб *R. oryzae* штамм ВКПМ F-1030. Штамм был предоставлен Всероссийской коллекцией про-

мышленных микроорганизмов. Первоначально выращивание биомассы гриба *R. oryzae* F-1030 осуществлялось твердофазным культивированием музейной культуры на картофельно-глюкозном агаре при температуре 28–30 °С в течение 7 сут. Картофельно-глюкозный агар содержал 200 г мелкоизмельченных клубней картофеля, 20 г глюкозы, 20 г бактериологического агара на 1000 см³ воды. Стерилизацию питательных сред проводили автоклавированием при температуре 115 °С в течение 60 мин.

Основой питательной среды для последующего культивирования гриба служил технический арабиногалактан в концентрации 2, 4 и 6 %. Арабиногалактан был предоставлен Санкт-Петербургским государственным университетом промышленных технологий и дизайна, кафедрой Технологии целлюлозы и композиционных материалов. Используемый арабиногалактан – порошок с содержанием сухих веществ 92 %, полученный путем сушки на распылительной сушилке экстракта технологической щепы древесины лиственницы сибирской (Братский лесопромышленный комплекс) [4, 6, 10, 11]. Экстракт был получен 2-ступенчатой водной экстракцией при температуре 90–105 °С при гидромодуле 1:4, после чего дополнительно сконцентрирован с применением мембранной фильтрации до концентрации 25 %. Качественный анализ состава порошка показал присутствие незначительного количества олигосахаридов, прошедших через ультрафильтрационную мембрану, а также наличие дигидрокверцетина, низкомолекулярных фенольных соединений и танинов. Количественный состав компонентов данного образца не изучался, однако компонентный состав водных экстрактов древесины лиственницы той же лесосырьевой базы известен [16]. Сухой остаток экстрактов представляет собой смесь полисахаридов (94–97 % арабиногалактана и 3–6 % пектиновых веществ), дигидрокверцетина (3,2–4,0 %) и танинов (3,6–4,6 %). Кроме того, в количестве 1,7–3,2 % присутствуют минеральные вещества и фенолокислоты.

Засев питательной среды на основе арабиногалактана проводился внесением в питательную среду части мицелия *R. oryzae* F-1030 в вегетативной фазе роста в массовом соотношении 1:500. Глубинное культивирование гриба осуществлялось в колбах Эрленмейера объемом 250 см³ при температуре 28±2 °С и непрерывном перемешивании в течение 7 сут. В культуральной жидкости контролировали pH, температуру, содержание редуцирующих веществ (РВ). Отбор проб проводили каждые 24 ч.

В питательные среды вносили минеральные соли $\text{KН}_2\text{PO}_4$ и $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ в следующих концентрациях: при добавлении в питательную среду, в которой содержалось 2 % арабиногалактана, 0,3 сМ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и 0,1 сМ $\text{KН}_2\text{PO}_4$; 4 % – 0,6 и 0,3 сМ; 6 % – 1,0 и 0,6 сМ.

Расчет количества вносимых в питательную среду солей осуществляли из расчета содержания редуцирующих веществ (РВ) в питательной среде.

Содержание РВ определяли по методике, приведенной в работе [12].

По истечении 7 сут. культивирования мицелий гриба *R. oryzae* F-1030 отделяли от культуральной жидкости центрифугированием на центрифуге СМ-12 при 4000 об./мин. в течение 40 мин. В культуральной жидкости определяли активность внеклеточного фермента β-галактозидазы фотометрическим методом с применением О-нитрофенил-β-D-галактопиринозида [15].

Культуральную жидкость смешивали в соотношении 1:1 со стерильной средой, содержащей арабиногалактан. Смесь термостатировали при 50 или

60 °С при постоянном перемешивании. Ежедневно в смеси в течение последующих 7 сут. определяли активность β-галактозидазы.

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью программы Microsoft Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Субстрат для промышленного культивирования микроорганизмов должен иметь не только сбалансированный состав (источники углерода, азота, воды), обеспечивающий веществом и энергией процессы роста и обмена веществ конкретного микроорганизма, но и быть экономически доступным и экологически безопасным. Арабиногалактан, представляющий собой вторичный ресурс, получаемый при производстве целлюлозы из древесины лиственницы, может рассматриваться в качестве перспективного недорогого источника углерода для промышленного культивирования микроорганизмов. Известно, что мицелиальные грибы способны к усвоению сложных источников углеводов растительного происхождения, в частности, арабиногалактана, таким образом участвуя в биоконверсии отходов переработки древесины [10, 35].

В предыдущих работах авторов была показана способность данного гриба использовать в качестве источника углерода щелока – вторичные ресурсы целлюлозно-бумажной промышленности [8, 9]. В данной работе рассматривается возможность использования арабиногалактана в качестве основы питательной среды для культивирования гриба *R. oryzae* F-1030. Арабиногалактан представляет собой гидрофильный полисахарид, состоящий из мономеров простых сахаров арабинозы и галактозы, которые могут ассимилироваться грибом в качестве источников углерода. Известно, что микроорганизмы синтезируют гидролитические ферменты, в т. ч. β-галактозидазу, лишь когда целлюлоза, гемицеллюлоза и другие сложные углеводы являются единственным источником углерода [22, 37]. При наличии более доступных для ассимиляции углеводов (простых сахаров) синтез данных ферментов прекращается. Поэтому единственным источником углерода в данной серии экспериментов служил арабиногалактан, дополнительных источников углерода в виде легкоусвояемых сахаров в питательную среду не добавляли.

В ходе исследования была показана возможность применения арабиногалактана как единственного источника углерода для культивирования гриба *R. oryzae* F-1030. Характеристика роста гриба *R. oryzae* F-1030 на питательных средах на основе арабиногалактана представлена в таблице.

Характеристика роста гриба *R. oryzae* F-1030
на питательных средах на основе арабиногалактана
The characteristics of the *R. oryzae* F-1030 fungus growth
on nutrient media based on arabinogalactan

Концентрация арабиногалактана, %	Сухая биомасса, г/дм³	Избыток РВ на окончание культивирования, %	pH
2	13,9±0,7	0,16±0,02	6,9±0,2
4	14,6±0,6	0,22±0,02	7,1±0,2
6	19,7±0,9	0,39±0,02	6,9±0,3

Выявлена прямая зависимость выхода биомассы гриба от концентрации арабиногалактана: с ее увеличением пролиферация клеток гриба усиливается и его биомасса растет. Это является свидетельством расщепления арабиногалактана β -галактозидазным ферментным комплексом гриба и последующей ассимиляции выделившихся простых сахаров – арабинозы и галактозы.

Известно, что pH питательной среды является основным показателем, регулирующим физико-химические свойства и биологическую активность микроорганизма-продуцента. Необходимо на протяжении всего времени культивирования не допускать значительного отклонения значения pH от оптимального для данного микроорганизма, в случае гриба *R. oryzae* F-1030 такое значение составляет 4,5–7,0 [8, 9]. При несоблюдении приведенных оптимальных значений pH метаболическая активность гриба ощутимо замедляется. Установлено, что на начало культивирования питательная среда на основе арабиногалактана имела нейтральное значение pH $7,0 \pm 0,2$, которое в течение 7 сут. культивирования немного снижалось. Подкисление питательной среды в процессе культивирования, очевидно, связано с синтезом грибом *R. oryzae* F-1030 ряда органических кислот, в т. ч. молочной.

В предыдущей работе авторов [9] было показано, что на 7-е сут. культивирования гриб *R. oryzae* F-1030 достигает физиологической зрелости, что выражается в замедлении прироста биомассы и увеличении активности внеклеточных ферментов (ксилаказы, целлюлазы) до максимальной. Относительно β -галактозидазы гриба авторами было сделано аналогичное предположение, что по истечении 7 сут. культивирования концентрация фермента β -галактозидазы в культуральной жидкости достигнет предельно возможной для данного штамма и в дальнейшем будет поддерживаться на уровне, необходимом для утилизации субстратов в среде. Соответственно, на 7-е сутки культивирования биомассу гриба *R. oryzae* F-1030 из культуральной жидкости можно удалить, т. к. в ней уже будет находиться достаточное количество внеклеточного фермента β -галактозидазы.

На начальном этапе исследования подбирали условия, при которых внеклеточная β -галактозидаза *R. oryzae* F-1030 в наибольшей степени сможет расщепить субстрат – арабиногалактан. Известно, что для обеспечения высокой степени биоконверсии растительного сырья требуется длительное время экспозиции субстрата с ферментом в условиях, оптимальных для действия ферментного препарата [21]. Степень расщепления арабиногалактана определяли по количеству образованных РВ. Поскольку известно, что β -галактозидазы микроорганизмов обладают широким диапазоном оптимальных температур реакции: от 35 °С для клеток дрожжей до 50–65 °С для плесневых грибов [30], то первым анализируемым параметром была температура. Вторым – наличие постоянного перемешивания, т. к. для протекания биохимической реакции необходимо перемешивание, особенно при повышенных концентрациях субстрата. Интенсивность перемешивания определяет скорость и степень биоконверсии [21]. Однако при слишком интенсивном перемешивании или встряхивании вероятно механическая денатурация белков, в т. ч. и ферментов, что может выразиться в снижении скорости реакции и уменьшении выхода продукта.

Третьим анализируемым параметром стал pH, т. к. белковая природа ферментов определяет зависимость их каталитической активности от pH среды:

смещение pH в кислую или щелочную сторону от оптимальной вызывает изменение заряда функциональных групп фермента и субстрата, что приводит к изменению конформации белковой структуры фермента и, соответственно, его ферментативной активности. Наивысшая активность большинства ферментов отмечается при слабокислой или нейтральной реакции среды.

Определение оптимальных параметров действия фермента β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030, обеспечивающих максимальное расщепление арабиногалактана, проводили при температуре 60 и 65 °C (верхняя температурная граница работы фермента), pH $7,0 \pm 0,2$, наличии постоянного перемешивания и в статичном состоянии. Было установлено, что при постоянном перемешивании увеличение содержания РВ в культуральной жидкости вследствие расщепления арабиногалактана до простых сахаров происходило как при 60, так и при 65 °C. При статичном методе инкубирования лишь при температуре 65 °C наблюдали заметный рост РВ в среде, тогда как при 60 °C и отсутствии постоянного перемешивания процесс расщепления арабиногалактана практически не шел. Концентрация субстрата в среде также влияла на эффективность ферментативного гидролиза: при повышении концентрации арабиногалактана в среде наблюдается замедление процесса выделения РВ при температуре 60 °C и отсутствии постоянного перемешивания. При изменении pH среды более чем на 0,2 ед. в обе стороны увеличения концентрации РВ практически не наблюдали, очевидно, вследствие осмотической денатурации молекулы фермента.

В результате проведенных предварительных экспериментов были определены рациональные параметры инкубирования, обеспечивающие гидролиз арабиногалактана внеклеточной β -галактозидазой *R. oryzae* F-1030 в наибольшей степени: температура 60 °C, т. к. температура 65 °C граничит с верхним температурным оптимумом фермента и может вызывать частичную тепловую денатурацию белковой молекулы; постоянное перемешивание; поддержание pH $7,0 \pm 0,2$.

На рис. 1 показано влияние температуры и концентрации субстрата на степень гидролиза арабиногалактана β -галактозидазой *R. oryzae* F-1030, выражающееся в увеличении концентрации РВ (простых сахаров) в среде. Анализ проводили при постоянном перемешивании и поддержании температуры среды 50 или 60 °C. Температура 50 °C, являющаяся нижним температурным оптимумом фермента, была введена в основную серию экспериментов в качестве контрольного параметра активности β -галактозидазы.

Как видно из рис. 1, температура 50 °C недостаточна для сохранения высокой активности фермента β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030, т. к. при данной температуре рост концентрации РВ наблюдается лишь при высокой концентрации арабиногалактана в среде – 6 %. При более низких концентрациях статистически значимых изменений в уровне РВ в среде в течение 7 сут. инкубирования при 50 °C не наблюдали. В свою очередь, β -галактозидаза *R. oryzae* F-1030 при температуре 60 °C проявляет высокую ферментативную активность на всех концентрациях арабиногалактана, обуславливая увеличение концентрации РВ – 6-углеродных пираноз и 5-углеродных фураноз, отщепляемых ферментом от галактозного остова. При этом основной прирост РВ отмечали в первые 3 сут. инкубирования, тогда как в последующие 4 сут. увеличение концентрации РВ в среде было незначительным, что,

очевидно, связано с истощением доступных для расщепления β -галактозидозой связей в молекулах арабиногалактана, а также со взаимодействием фермента с продуктами реакции.

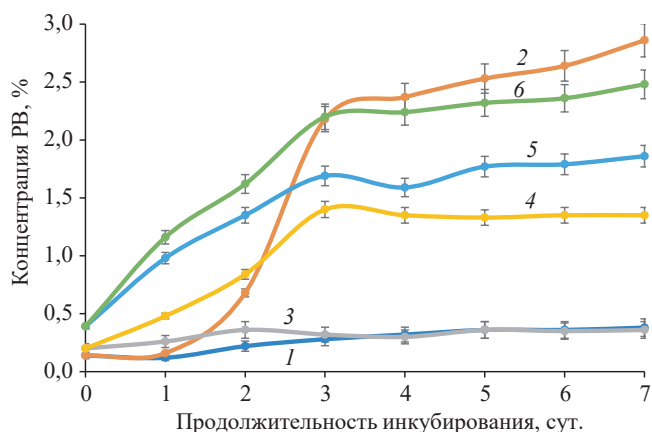


Рис. 1. Кинетика изменения уровня РВ в культуральной жидкости, содержащей β -галактозидазу *R. oryzae* F-1030 и арабиногалактан в различных концентрациях (%), при температуре процесса (°C): 1 – 2 % и 50 °C; 2 – 2 % и 60 °C; 3 – 4 % и 50 °C; 4 – 4 % и 60 °C; 5 – 6 % и 50 °C; 6 – 6 % и 60 °C

Fig. 1. The kinetics of changes in the reducing substances content in the culture liquid containing β -galactosidase *R. oryzae* F-1030 and arabinogalactan in various concentrations (%), at the process temperature (°C): 1 – 2 % and 50 °C; 2 – 2 % and 60 °C; 3 – 4 % and 50 °C; 4 – 4 % and 60 °C; 5 – 6 % and 50 °C; 6 – 6 % and 60 °C

Кроме того, было установлено, что при концентрации арабиногалактана в среде 6 % выход РВ на протяжении всего инкубирования β -галактозидазы при 60 °C был выше, чем при аналогичных условиях на среде с 4 % арабиногалактана. Данное явление вполне закономерно, т. к. с увеличением концентрации субстрата при избытке фермента должен возрастать выход конечного продукта. Однако при концентрации арабиногалактана в питательной среде 2 % при температуре инкубирования 60 °C выход РВ в последние 4 сут. инкубирования был выше, чем при концентрации арабиногалактана 6 %, хотя в первые 2 сут. прирост РВ на данной концентрации арабиногалактана был ниже, чем в аналогичных точках более высоких концентраций. Данный эффект может быть вызван явлением насыщения субстратом: при низкой концентрации субстрата скорость реакции возрастает пропорционально содержанию субстрата в среде, но по мере роста концентрации субстрата скорость увеличивается медленнее и пропорциональность нарушается вследствие насыщения активных центров фермента субстратом и взаимодействия с ферментом продуктов реакции. Таким образом, при высоких концентрациях субстрата скорость образования продукта пропорциональна не концентрации субстрата, а концентрации комплекса фермент–субстрат [20].

Изменение активности фермента β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030 в зависимости от концентрации арабиногалактана и температуры среды представлено на рис. 2. Известно, что повышение температуры приводит к увеличению кинетической энергии, что вызывает более частое столкновение молекул фермента и субстрата в единицу времени, тем самым обуславливается рост скорости реакции и происходит образование большего количества продукта [1].

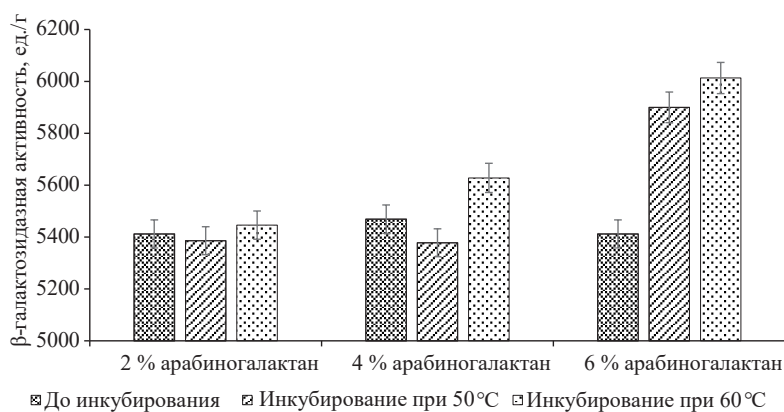


Рис. 2. Влияние температуры процесса и концентрации арабиногалактана на активность β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030

Fig. 2. The effect of the process temperature and arabinogalactan concentration on the activity of β -galactosidase *R. oryzae* F-1030

Как видно из данных рис. 2, увеличение температуры реакционной среды в совокупности с увеличением концентрации субстрата приводит к росту активности фермента β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030, выражаемой в повышении количества результативных столкновений фермент–субстрат. Например, при концентрации арабиногалактана в среде 2 % статистически значимых различий в активности фермента β -галактозидазы в зависимости от температуры среды не отмечено. При увеличении концентрации арабиногалактана до 4 % существенный рост активности фермента наблюдали лишь при температуре 60 °С, тогда как при температуре 50 °С активность фермента даже немного снижается по сравнению с начальной. Данный эффект, очевидно, связан с описанным выше явлением насыщения фермента субстратом, при котором скорость ферментативной реакции замедляется при повышении концентрации субстрата, т. к. все активные центры фермента в единицу времени связаны с субстратом или продуктом реакции. Метод определения активности фермента [15], используемый в данной работе, основан на учете количества свободных молекул фермента, способных вступить в реакцию в единицу времени. Соответственно, при концентрации арабиногалактана в среде 4 % свободных ферментных единиц при температуре 50 °С меньше, чем в изначальной культуральной жидкости, не подвергнутой нагреванию. При увеличении температуры инкубирования до 60 °С при данной концентрации арабиногалактана зафиксировали незначительное повышение активности фермента β -галактозидазы вследствие роста количества результативных столкновений фермент–субстрат и ускорения процесса освобождения активного центра фермента как итог увеличения общей кинетической энергии реакционной среды. Повышение концентрации арабиногалактана в среде до 6 % приводит к практическому нивелированию отличий в активности фермента β -галактозидазы при разных температурах инкубирования, что, вероятнее всего, связано с обилием доступного для расщепления субстрата при высокой концентрации арабиногалактана при температуре как 50, так и 60 °С. Обилие результативных столкновений при обеих анализируемых температурах привело к освобождению множества ферментативных единиц вследствие активного расщепления арабиногалактана до простых сахаров.

Заключение

Изучен потенциал использования β -галактозидазного ферментного комплекса *R. oryzae* F-1030 для биодеградации арабиногалактана. Доказана способность гриба метаболизировать и ассимилировать арабиногалактан в качестве единственного источника углерода. Подбор оптимальных условий инкубирования внеклеточной β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030 позволил достичь эффективного уровня расщепления арабиногалактана, сопровождаемого обогащением среды простыми сахарами. Проведенное исследование открывает перспективы для последующей разработки биотехнологических процессов биодеградации арабиногалактана с получением ценных кормовых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баранова В.Н., Селиванец Е.И., Боровская Л.В. Влияние внешних факторов на ферментативные реакции // The scientific heritage. 2021. № 79. С. 37–40.

Baranova V., Selivanets E., Borovskaya L. Influence of External Factors on Enzymatic Reactions. *The Scientific Heritage*, 2021, no. 79, pp. 37–40. (In Russ.).

2. Болтовский В.С. Ферментативный гидролиз растительного сырья: состояние и перспективы // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер.: Хіміч. навук. 2021. Т. 57, № 4. С. 502–512.

Boltovsky V.S. Enzymatic Hydrolysis of Plant Raw Materials: State and Prospects. *Vesći Nacyânaŭnaj akademii navuk Belarusi. Seryâ himičnyh navuk* = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 502–512. (In Russ.). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-502-512>

3. Бушневая О.А., Оводова Р.Г., Шашков А.С., Чижов А.О., Гюнтер Е.А., Оводов Ю.С. Структурное исследование арабиногалактана и пектина из каллуса *Silene vulgaris* (М.) Г. // Биохимия. 2006. Т. 71, № 6. С. 798–807.

Bushneva O.A., Ovodova R.G., Shashkov A.S., Chizhov A.O., Gunter E.A., Ovodov Yu.S. Structural Studies of Arabinogalactan and Pectin from *Silene vulgaris* (M.) G. callus. *Biokhimiya* = Biochemistry (Moscow), 2006, vol. 71, no. 6, pp. 644–651. <https://doi.org/10.1134/S0006297906060083>

4. Галютудинова И.А., Канарский А.В., Канарская З.А., Кузнецов А.Г. Эффективность культивирования дрожжей *Debaryomyces hansenii* и *Guehomyces pullulans* на питательных средах из арабиногалактана // Вестн. технол. ун-та. 2016. Т. 19, № 16. С. 96–99.

Galyautdinova I.A., Kanarskiy A.V., Kanarskaya Z.A., Kuznetsov A.G. Efficiency of *Debaryomyces hansenii* and *Guehomyces pullulans* Yeasts Cultivation in Nutrient Media of Arabinogalactan. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2016, vol. 19, no. 16, pp. 96–99. (In Russ.).

5. Гусева Е.Ю., Романцева Ю.Н. Апробирование арабиногалактана в процессе переработки продукции мараловодства // Вестн. КрасГАУ. 2019. № 7. С. 143–146.

Guseva E.Yu., Romantseva Yu.N. The Testing of Arabinogalactan in the Course of Deer Farming Products Processing. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2019, no. 7, pp. 143–146. (In Russ.).

6. Кузнецов А.Г., Махотина Л.Г., Аким Э.Л. Использование биополимера арабиногалактана при производстве целлюлозных композиционных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. 2012. № 5(25). С. 82–84.

Kuznetsov A.G., Makhotina L.G., Akim E.L. Usage of Biopolymer Arabinogalactan in Production of Cellulose Composites. *Dizajn. Materialy. Tekhnologiya* = Design. Materials. Technology, 2012, no. 5(25), pp. 82–84. (In Russ.).

7. Кулешова М.А., Рудакова В.А. Ферментативный гидролиз отходов переработки дикорастущего плодово-ягодного сырья северных районов европейской части России // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: тез. докл. XI Всерос. науч.-практ. конф. Бийск: АлтГТУ, 2018. С. 366–368.

Kuleshova M.A., Rudakova V.A. Enzymatic Hydrolysis of Waste from Wild-Growing Fruit and Berry Raw Materials Processing from Northern Regions of the European Part of Russia. *Tekhnologii i oborudovanie khimicheskoy, biotekhnologicheskoy i pishchevoj promyshlennosti*: Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference. Biysk, Altai State Technical University Publ., 2018, pp. 366–368. (In Russ.).

8. Мингазова Л.А., Канарский А.В., Крякунова Е.В., Канарская З.А. Синтез молочной кислоты грибом *Rhizopus oryzae* F-1030 на питательных средах из сульфитных щелоков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 146–158.

Mingazova L.A., Kanarsky A.V., Kryakunova E.V., Kanarskaya Z.A. Lactic Acid Synthesis by Fungus *Rhizopus oryzae* F-1030 on Growth Media Based on Sulphite Liquors. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 2, pp. 146–158. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-146-158>

9. Мингазова Л.А., Крякунова Е.В., Галиева А.Р., Канарская З.А., Канарский А.В., Кручина-Богданов И.В., Белкина Е.В. Влияние способа культивирования гриба *Rhizopus oryzae* F-1030 на гидролизатах нейтрально-сульфитного щелока на эффективность синтеза молочной кислоты // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2024. № 250. С. 405–422.

Mingazova L.A., Kryakunova E.V., Galieva A.R., Kanarskaya Z.A., Kanarskii A.V., Kruchina-Bogdanov I.V., Belkina E.V. The Fungus *Rhizopus oryzae* F-1030 Cultivating Mode on Neutral Sulphite Liquor Hydrolysates Affects the Lactic Acid Synthesis Efficiency. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*, 2024, no. 250, pp. 405–422. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.250.405-422>

10. Митина Г.В., Сокорнова С.В., Махотина Л.Г., Кузнецов А.Г., Аким Э.Л. Перспективы использования арабиногалактана для культивирования высших грибов и микроорганизмов – продуцентов средств защиты растений // Вестн. защиты растений. 2012. № 3. С. 28–32.

Mitina G.V., Sokornova S.V., Mahotina L.G., Kuznetsov A.G., Akim E.L. The Perspectives of Arabinogalactan for Cultivation Microbiological Control Agents and Mushrooms. *Vestnik Zashchity Rasteniy* = Plant Protection News, 2012, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.).

11. Митина Г.В., Сокорнова С.В., Титова Ю.А., Махотина Л.Г., Кузнецов А.Г., Первушин А.Л. Использование макро- и микромицетов в биоконверсии растительного сырья // Изв. РГПУ им. А.И. Герцена. 2013. № 163. С. 69–79.

Mitina G., Sokornova S., Titova Ju., Mahotina L., Kuznetsov A., Pervushin A. The Usage of Macro- and Micromycetes in the Bioconversion of Wood Raw Material. *Izvestiya RGPU im. A.I. Gertsena* = Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences, 2013, no. 163, pp. 69–79. (In Russ.).

12. Морозова Ю.А., Скворцов Е.В., Алимова Ф.К., Канарский А.В. Биосинтез ксиланаз и целлюлаз грибами рода *Trichoderma* на послеспиртовой барде // Вестн. технол. ун-та. 2012. Т. 15, № 19. С. 120–122.

Morozova Yu.A., Skvortsov E.V., Alimova F.K., Kanarskiy A.V. Biosynthesis of Xylanases and Cellulases by Fungi of the Genus *Trichoderma* on Post-Alcohol Stillage. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2012, vol. 15, no. 19, pp. 120–122. (In Russ.).

13. Никанова Л.А. Использование дигидрокверцетина и арабиногалактана в питании поросят-отъемышей // Вестн. АПК Верхневолжья. 2019. № 3(47). С. 47–50.

Nikanova L.A. The Use of Dihydroquercetin and Arabinogalactan in the Diet of Weaned Piglets. *Vestnik APK Verhevolzh'ya* = Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald, 2019, no. 3(47), pp. 47–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.35694/YARCX.2019.47.3.010>

14. Першакова Т.В., Хагур Р.Н. Исследование влияния арабиногалактана на качество кондитерских изделий // Науч. журн. КубГАУ. 2012. № 84(10). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/72.pdf> (дата обращения: 21.04.25).

Pershakova T.V., Khagur R.N. Investigation of the Influence of Arabinogalactan on the Quality of Confectionery Products. *Nauchnyj zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU, 2012, no. 84(10), art. no. 0841210072. (In Russ.).

15. Полыгалина Г.В., Чередниченко В.С., Римарева Л.В. Определение активности ферментов. Справочник. М.: ДеЛи принт, 2003. 375 с.

Polygalina G.V., Cherednichenko V.S., Rimareva L.V. *Determination of Enzyme Activity. Handbook*. Moscow, DeLi print Publ., 2003. 375 p. (In Russ.).

16. Разработка ветеринарного препарата на основе биологически активных соединений биомассы лиственницы: отчет о НИР / ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ; рук-ль Ч.Б. Кушеев. Иркутск, 2018. ГК №Ф.2018.206347. 99 с.

Development of a Veterinary Drug Based on Biologically Active Compounds of Larch Biomass: Research Report. Irkutsk State Agrarian University; Research Director Ch.B. Kushcheev. Irkutsk, 2018, State Corporation no. F.2018.206347. 99 p. (In Russ.).

17. Скрипнюк А.А., Рябцева С.А. Современные методы получения β-галактозидаз // Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 3. С. 197–204.

Skripnyuk A.A., Riabtseva S.A. Modern Methods for Producing β-galactosidase. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii* = Science. Innovations. Technologies, 2014, no. 3, pp. 197–204. (In Russ.).

18. Торшков А.А. Влияние арабиногалактана на продуктивные качества цыплят-бройлеров // Изв. ОГАУ. 2010. № 27-1. С. 203–205.

Torshkov A.A. Evaluation of Arabinogalactan on the Productive Qualities of Broiler Chickens. *Izvestiya Orenburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University, 2010, no. 27-1, pp. 203–205. (In Russ.).

19. Фомичев Ю.П., Никанова Л.А., Дорожкин В.И., Торшков А.А., Романенко А.А., Еськов Е.К., Семенова А.А., Гоноцкий В.А., Дунаев А.В., Ярошевич Г.С., Лашин С.А., Стольная Н.И. Дигидрокверцетин и арабиногалактан – природные биорегуляторы в жизнедеятельности человека и животных, применение в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. М.: Науч. библиотека, 2017. 702 с.

Fomichev Yu.P., Nikanova L.A., Dorozhkin V.I., Torshkov A.A., Romanenko A.A., Es'kov E.K., Semenova A.A., Gonotskij V.A., Dunaev A.V., Yaroshevich G.S., Lashin S.A., Stol'naya N.I. *Dihydroquercetin and Arabinogalactan – Natural Bioregulators in Human and Animal Life, Application in Agriculture and Food Industry*. Moscow, Nauchnaya biblioteka Publ., 2017. 702 p. (In Russ.).

20. Черникевич И.П. Ферментативный катализ // Журн. ГрГМУ. 2008. № 1. С. 21–27.

Chernikevich I.P. Enzymatic Catalysis. *Zhurnal Grodnenskogo Gosudarstvennogo Meditsinskogo Universiteta* = Journal of the Grodno State Medical University, 2008, no. 1, pp. 21–27. (In Russ.).

21. Шариков А.Ю., Иванов В.В., Амелякина М.В. Влияние перемешивания на эффективность ферментативного гидролиза высококонцентрированных сред экструдированного крахмала кукурузы // Вестн. ВГУИТ. 2020. Т. 82, № 3. С. 96–103.

Sharikov A.Yu., Ivanov V.V., Amelyakina M.V. Effect of Agitation on the Efficiency of Enzymatic Hydrolysis of Highly Concentrated Media of Extruded Corn Starch. *Vestnik VGUI* = Proceedings of VSUET, 2020, vol. 82, no. 3, pp. 96–103. (In Russ.).

<https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-3-96-103>

22. *Advances in Biorefineries. Biomass and Waste Supply Chain Exploitation*. Ed. by K. Waldron. Cambridge, Sawston: Woodhead Publ., 2014. 902 p.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-521-3.50033-8>

23. *Arabinogalactan Market Analysis by Animal Feed, Pharmaceuticals, Cosmetic and Others through 2035*. New York, Future Market Insights Publ., 2025. 250 p.

24. Cheng J., Wei C., Li W., Wang Y., Wang S., Huang Q., Liu Y., He L. Structural Characteristics and Enhanced Biological Activities of Partially Degraded Arabinogalactan from Larch Sawdust. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, vol. 171, pp. 550–559. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.01.039>

25. Ghosh K., Takahashi D., Kotake T. Plant Type II Arabinogalactan: Structural Features and Modification to Increase Functionality. *Carbohydrate Research*, 2023, vol. 529, art. no. 108828. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2023.108828>

26. Ito K., Fukuoka K., Nishigaki N., Hara K., Yoshimi Y., Kuki H., Takahashi D., Tsumuraya Y., Kotake T. Structural Features Conserved in Subclass of Type II Arabinogalactan. *Plant Biotechnology*, 2020, vol. 37, iss. 4, pp. 459–463. <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.20.0721a>

27. Kalenborn S., Zühlke D., Harder J. Proteomic Insight into Arabinogalactan Utilization by Particle-Associated *Maribacter* sp. MAR_2009_72. *FEMS Microbiology Ecology*, 2024, vol. 100, iss. 5, art. no. fiae045. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiae045>

28. Leszczuk A., Kalaitzis P., Zdunek A. Review: Structure and Modifications of Arabinogalactan Proteins (AGPs). *BMC Plant Biology*, 2023, vol. 23, art. no. 45. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04066-5>

29. Li N., Yang F., Su J., Shi S., Ordaz-Ortiz J.J., Cheng X., Xiong S., Xu Y., Wu J., Wang H., Wang S. Structure Characterization of an Arabinogalactan from *Cynanchum atratum* and its Immune Stimulatory Activity on RAW264.7 Cells. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, vol. 194, pp. 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.172>

30. Liu Z., Zhao C., Deng Y., Huang Y., Liu B. Characterization of a Thermostable Recombinant β -Galactosidase from a Thermophilic Anaerobic Bacterial Consortium YTY-70. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2015, vol. 29, iss. 3, pp. 547–554. <https://dx.doi.org/10.1080/13102818.2015.1015244>

31. Malyar Yu.N., Borovkova V.S., Kazachenko A.S., Fetisova O.Yu., Skripnikov A.M., Sychev V.V., Taran O.P. Preparation and Characterization of Di- and Tricarboxylic Acids-Modified Arabinogalactan Plasticized Composite Films. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 9, art. no. 1999. <https://doi.org/10.3390/polym15091999>

32. Pokatilov F.A., Akamova H.V., Kizhnyaev V.N. Synthesis and Properties of Tetrazole-Containing Polyelectrolytes Based on Chitosan, Starch, and Arabinogalactan. *E-Polymers*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 203–213. <https://doi.org/10.1515/epoly-2022-0026>

33. Qi H., Tang S., Bian B., Lai C., Chen Y., Ling Z., Yong Q. Effect of H_2O_2 - V_C Degradation on Structural Characteristics and Immunomodulatory Activity of Larch Arabinogalactan. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2024, vol. 12, art. no. 1461343. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1461343>

34. Ruiz-Ramírez S., Jiménez-Flores R. *Invited Review*: Properties of β -Galactosidases Derived from *Lactobacillaceae* Species and Their Capacity for Galacto-Oligosaccharide Production. *Journal of Dairy Science*, 2023, vol. 106, iss. 12, pp. 8193–8206. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23392>

35. Saito K., Hasa Y., Abe H. Production of Lactic Acid from Xylose and Wheat Straw by *Rhizopus oryzae*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2012, vol. 114, pp. 166–169. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2012.03.007>

36. Sasaki Y., Yanagita M., Hashiguchi M., Horigome A., Xiao J.-Z., Odamaki T., Kitahara K., Fujita K. Assimilation of Arabinogalactan Side Chains with Novel 3-O- β -L-Arabinopyranosyl- α -L-Arabinofuranosidase in *Bifidobacterium pseudocatenulatum*. *Microbiome Research Reports*, 2023, vol. 2, art. no. 12. <https://doi.org/10.20517/mrr.2023.08>

37. Srivastava N., Rathour R., Jha S., Pandey K., Srivastava M., Thakur V.K., Sengar R.S., Gupta V.K., Mazumder P.B., Khan A.F., Mishra P.K. Microbial Beta Glucosidase Enzymes: Recent Advances in Biomass Conversion for Biofuels Application. *Biomolecules*, 2019, vol. 9, no. 6, art. no. 220. <https://doi.org/10.3390/biom9060220>

38. Tang S., Jiang M., Huang C., Lai C., Fan Y., Yong Q. Characterization of Arabinoxylans from *Larix principis-rupprechtii* and Their Effects on NO Production by Macrophages. *Carbohydrate Polymers*, 2018, vol. 200, pp. 408–415.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.027>

39. Volford B., Varga M., Szekeres A., Kotogán A., Nagy G., Vágvolgyi C., Papp T., Takó M. β -Galactosidase-Producing Isolates in Mucoromycota: Screening, Enzyme Production, and Applications for Functional Oligosaccharide Synthesis. *Journal of Fungi*, 2021, vol. 7, no. 3, art. no. 229. <https://doi.org/10.3390/jof7030229>

40. Zvereva M.V., Zhmurova A.V. Synthesis, Structure, and Spectral Properties of ZnTe-Containing Nanocomposites Based on Arabinogalactan. *Russian Journal of General Chemistry*, 2022, vol. 92, pp. 1995–2004. <https://doi.org/10.1134/S1070363222100139>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article