





DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-241021>

EDN: <https://elibrary.ru/zyowck>

УДК 664.7:504.5

Научная статья

## Биоконверсия растительных отходов как инструмент регулирования техноэкосистемы целлюлозно-бумажной промышленности Северо-Западного региона

О.И. Болотникова<sup>1, 2</sup> , Н.В. Кваша<sup>1, 3</sup> ,

Е.Д. Малевская-Малевич<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Северо-Западный институт управления – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации", 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний проспект В.О., д. 57/43

<sup>2</sup> Петрозаводский государственный университет, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, просп. Ленина, д. 33

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, 22, к. 1, Санкт-Петербург, 193232

\*malevskaya-ed@ranepa.ru

**Аннотация.** Исследованы перспективы внедрения циркулярной экономической модели для оптимизации техноэкосистем целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) Северо-Запада РФ. Рассмотрен потенциал биорефайнинга отходов ЦБП (сульфитные щелока и гидролизаты лигноцеллюлозы) в биоэтанол. Представлен сравнительный анализ эффективности спиртовой ферментации D-ксилозы, основного пятиатомного сахара отходов ЦБП, различными видами ксилозоассимилирующих дрожжей из отечественных коллекций промышленных микроорганизмов. Лучшие скорость и эффективность образования спирта отмечены для *S. shehatae* Y-1632 (0.83 г/л×ч и 0.40 г/г потребленной D-ксилозы), *P. stipitis* Y-1483 (0.76 г/л×ч и 0.39 г/г), а также *P. tannophilus* Y-1533 (0.65 г/л×ч и 0.27 г/г). Изучены особенности ксилоредуктазы (XR) и ксилитдегидрогеназы (XD), ключевых ферментов катаболизма D-ксилозы, которые оказывают влияние на уровень продукции биоэтанола. XR спиртообразующих дрожжей имела двойную НАДФН/НАДН-коферментную специфичность, тогда как XD характеризовалась высоким сродством к НАД<sup>+</sup>. Наибольшая активность XR выявлена для *P. stipitis* Y-2160 (15.21 мкмоль/мг×мин). Наибольшей активностью XD обладали *S. shehatae* Y-1632 (13.95 мкмоль/мг×мин). Установлены предельно допустимые для спиртообразующей активности *S. shehatae* Y-1632 и *P. tannophilus* Y-1533 концентрации спирта в среде: 45.5 г/л и 46 г/л соответственно. Продемонстрирована большая устойчивость *P. tannophilus* Y-1533 к токсическим примесям отходов ЦБП: фурфуролу (Ф), оксиметилфурфуролу (ОФ), летучим органическим кислотам (ЛОК) и веществам лигнофуранового комплекса (ВЛК). Предельно допустимые концентрации ингибиторов для роста этих дрожжей составили (г/л): 0.1 (Ф); 0.27 (ОФ), 0.50 (ЛОК) и 1.74 (ВЛК). Впервые обсуждается биотехнологический потенциал дрожжей *Pachysolen tannophilus* Y-1533 для оптимизации техноэкосистем ЦБП региона присутствия.

**Ключевые слова:** биорефайнинг, отрицательные обратные связи, сульфитный щелок, гидролизат лигноцеллюлозы, ксилозоассимилирующие дрожжи, биоэтанол

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-28-00619 на тему «Методология обеспечения эффективности циркулярных экономических систем региона (на примере Северо-Запада России)», <https://rscf.ru/project/23-28-00619/>.

**ORCID:**

О.И. Болотникова, <https://orcid.org/0000-0001-7993-1745>

Н.В. Кваша, <https://orcid.org/0000-0003-0489-7671>

Е.Д. Малевская-Малевич, <https://orcid.org/0000-0003-0605-4969>

**Для цитирования:** Болотникова, О.И. и др., 2026. Биоконверсия растительных отходов как инструмент регулирования техноэкосистемы целлюлозно-бумажной промышленности Северо-Западного региона. *Трансформация экосистем* 9 (1), 125–135. <https://doi.org/10.23859/estr-241021>

Поступила в редакцию: 21.10.2024

Принята к печати: 06.12.2025

Опубликована онлайн: 06.03.2026

---

DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-241021>

EDN: <https://elibrary.ru/zyowck>

UDC 664.7:504.5

## Article

# Bioconversion of plant waste as a tool for regulating the techno-ecosystem of the pulp and paper industry in the North-Western region

O.I. Bolotnikova<sup>1, 2</sup> , N.V.Kvasha<sup>1, 3</sup> ,

E.D. Malevskaia-Malevich<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> North-West Institute of Management – branch of The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Sredniy Prospekt V.O. 57/43, St. Petersburg, 199178 Russia

<sup>2</sup> Petrozavodsk State University, Prospekt Lenina St. 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910 Russia

<sup>3</sup> Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Prospekt Bo'shevikov St. 22, build. 1, St. Petersburg, 193232 Russia

\*malevskaia-ed@ranepa.ru

---

**Abstract.** The prospects of introducing a circular economic model for optimizing the techno-ecosystems of the pulp and paper industry (PPI) in the North-West of the Russian Federation are investigated. The potential of biorefining PPI waste (sulfite liquor and lignocellulose hydrolysates) into bioethanol is considered. A comparative analysis of the effectiveness of alcoholic fermentation of D-xylose, the main pentatomic sugar of PPI waste, and various types of xylose-assimilating yeast from domestic collections of industrial microorganisms is presented. The best rate and efficiency of alcohol formation were noted for *C. shehatae* Y-1632 (0.83 g/l×h and 0.40 g/g of consumed D-xylose), *P. stipitis* Y-1483 (0.76 g/l×h and 0.39 g/g), and *P. tannophilus* Y-1533 (0.65 g/l×h and 0.27 g/g). The features of xylose reductase (XR) and xylitol dehydrogenase (XD), key enzymes of D-xylose catabolism, which affect the level of bioethanol production, have been studied. The XR of alcohol-forming yeast had a double NADPH/NADH had coenzyme specificity, whereas XD was characterized by high affinity for NAD<sup>+</sup>. The highest XR activity was detected for *P. stipitis* Y-2160 (15.21 mmol/mg×min). *C. shehatae* Y-1632 (13.95 mmol/mg×min) had the highest XD activity. The maximum permissible values for alcohol-forming activity have been established. *C. shehatae* Y-1632 and *P. tannophilus* Y-1533 alcohol concentrations in the medium: 45.5 g/l and 46 g/l, respectively. *P. tannophilus* Y-1533 has been shown to be highly resistant to toxic impurities from PPI waste: furfural (F), oxymethylfurfural (OF), volatile organic acids (VOA), and substances of the lignofuran complex (SLC). The maximum permissible concentrations of inhibitors for the growth of these yeasts were (g/l): 0.1 (F); 0.27 (OF), 0.50 (VOA) and 1.74 (SLC). For the first time, the biotechnological potential of *Pachysolen tannophilus* Y-1533 yeast for optimizing the techno-ecosystems of the PPI region of presence is discussed.

**Keywords:** biorefining, negative feedback, sulfite liquor, lignocellulose hydrolysate, xylose assimilating yeast, bioethanol

**Funding.** The study was carried out using funds from the Russian Science Foundation grant No. 23-28-00619 on the topic “Methodology for ensuring the efficiency of circular economic systems in a region (using the example of North-West Russia)”, <https://rscf.ru/project/23-28-00619/>.

#### ORCID:

O.I. Bolotnikova, <https://orcid.org/0000-0001-7993-1745>

N.V.Kvasha, <https://orcid.org/0000-0003-0489-7671>

E.D. Malevskaia-Malevich, <https://orcid.org/0000-0003-0605-4969>

**To cite this article:** Bolotnikova, O.I. et al., 2026. Bioconversion of plant waste as a tool for regulating the techno-ecosystem of the pulp and paper industry in the North-Western region. *Ecosystem Transformation* 9 (1), 125–135. <https://doi.org/10.23859/estr-241021>

Received: 21.10.2024

Accepted: 06.12.2025

Published online: 06.03.2026

---

## Введение

Известно, что современные модели экономического развития характеризуются петлями положительных обратных экономических связей и при этом весьма слабыми отрицательными обратными связями с природными экосистемами, что обуславливает экологическую неустойчивость формируемых техноэкосистем. Предметом исследования является антропогенное воздействие на природные экосистемы и среду обитания человека целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП), так как кроме всего многообразия полезных продуктов отрасль формирует большое количество отходов, в том числе токсичных.

Как было неоднократно нами показано, одним из направлений решения задачи формирования регулирующих отрицательных обратных связей в техноэкосистемах является реализация циклической модели с ориентацией на циркулярную экономику (экономику замкнутого цикла) (Кваша и Малевская-Малевич, 2022, Kvasha et al., 2023). При этом в соответствии со спецификой

ресурсно-потребительских потоков ЦБП основу циркулярных моделей составляют биотехнологические подходы, направленные на получение продуктов из биомассы. Иными словами, в рамках целлюлозно-бумажной отрасли процессы зацикливания ресурсных и продуктовых потоков реализуются преимущественно методами биорефайнинга (циркулярная биоэкономика), то есть любых рециклинговых процессов, основанных на биотехнологиях и ориентированных на использование вторичного сырья и продуктов.

Проблематика биоконверсии акцентирует внимание на устойчивых методах утилизации растительной биомассы, что способствует снижению объема перерабатываемых отходов и улучшению состояния экосистем. Типология отходов ЦБП по местам их возникновения была ранее исследована нашим авторским коллективом (Kvasha et al., 2023). Было показано, что основная часть отходов образуется в виде полимерных органических остатков (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина), которые в зависимости от способа варки целлюлозы (сульфатной или сульфитной) представлены либо в виде черного щелока, либо в виде сульфитных щелоков соответственно. Токсичное влияние органических отходов ЦБП на лито- и гидросферу служит предпосылкой к поиску инструментов формирования регулирующих отрицательных обратных связей в техноэкосистемах ЦБП.

Целлюлозно-бумажный комплекс Северо-Западного региона России представлен крупными сульфитными производствами (Кондопожский ЦБК (Республика Карелия) и Светогорский ЦБК (Ленинградская область)), что обуславливает наличие в составе отходов преимущественно сульфитных щелоков и гидролизатов лигноцеллюлозы. При этом высокая ценность биоэтанола как вторичного сырья и энергоресурса определяет фокус исследований на развитии технологий его спиртовой биоконверсии. Замещение хвойных пород лиственными, а также вторичным целлюлозосодержащим сырьем приводит к тому, что среди полученных при варке сахаров доминируют пентозы (Четвертнева и др., 2021; Pereira et al., 2013). В то же время способность активно утилизировать наряду с гексозами пентозные сахара выявлена главным образом для микроорганизмов, не имеющих сегодня биотехнологической значимости (Prakash et al., 2022).

Целью настоящего исследования являлся поиск эффективных инструментов регулирования техноэкосистем целлюлозно-бумажной промышленности Северо-Западного региона России, в частности, биотрансформации сульфитных щелоков и гидролизатов лигноцеллюлозы. В связи с этим поставленной задачей является формирование критериев, регламентирующих целесообразность биотехнологического использования ксилозоассимилирующих дрожжей, нетрадиционных биокатализаторов, для получения этанола из отходов ЦБП.

## Материалы и методы

Объектом исследования служил 21 штамм тринадцати различных видов ксилозоассимилирующих дрожжей из отечественных коллекций микроорганизмов: ВНИИГидролиз (Санкт-Петербург); ГосНИИгенетика (Москва), НИИ Пищевой биотехнологии (Москва), ИБФМ РАН (Пущино-на-Оке). Среди них представители родов *Candida* (*C. didensiae*, *C. scottii*, *C. intermediae*, *C. parapsilosis*, *C. shehatae*, *C. silvanorum*, *C. tropicalis*), *Pichia* (*P. guillermondii*, *P. stipitis*) и *Kluyveromyces* (*K. fragilis*, *K. marxianus*), а также *Pachysolen tannophilus* и *Torulopsis molishiana*. Их физиологические и биохимические особенности были изучены нами в период с 2002 по 2019 г. Основными критериями выбора штаммов для настоящего эксперимента являлись принадлежность к группе факультативных анаэробов и способность ассимилировать D-ксилозу (Kreger-Van Rij, 1982).

В качестве контроля для проведения ферментаций D-ксилозы и D-глюкозы использовали дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* ЛВ-7, не ассимилирующие D-ксилозу, но имеющие ярко выраженный бродильный тип катаболизма сахаров (Кудрявцев, 1981). Ферментацию D-ксилозы и D-глюкозы проводили в микроаэробных условиях, оптимальных для продукции спирта из пентоз (Yablochkova et al., 2003). Для подготовки бесклеточных экстрактов дрожжей, а также изучения активности ксилоредуктазы (КФ 1.1.1.21) (XR) и ксилитдегидрогеназы (КФ 1.1.1.9) (XD), ферментов начальных этапов катаболизма D-ксилозы, использовали стандартные методы (Bolotnikova et al., 2020).

Динамику роста ксилозоассимилирующих дрожжей изучали на лабораторной ферментационной установке Biostat M (Braun, Германия), согласно условиям, описанным О.И. Болотниковой и др. (2013а). Посевной материал выращивали в соответствии с О.И. Болотниковой и др. (2012), инокуляцию проводили культурой, находящейся в середине экспоненциальной фазы роста. Удельную скорость роста ( $\mu$ ) определяли в ходе микрокинетических исследований (Огородникова и др., 1995). Количественные характеристики роста дрожжей при изменении температуры инкубирования, pH, концентрации D-ксилозы и этилового спирта устанавливали аналогично (Кнорре и Эммануэль, 1974).

Для анализа чувствительности дрожжей к этанолу рассчитывали константу  $\alpha$  уравнения Луонга (Luong, 1985). Влияние ингибиторов (фурфурола, оксиметилфурфурола, летучих органических кислот и веществ лигнофуранового комплекса) на рост дрожжей оценивали согласно методикам, подробно изложенным в работе О.И. Шаповалова и др. (2008). Концентрацию D-ксилозы определяли по Феллингу (Костенко, 1977). Биомассу дрожжей рассчитывали спектрофотометрически при длине волны 620 нм (Lowry, 1951). Количество этилового спирта устанавливали методом газожидкостной хроматографии в дистилляте, полученном после перегонки исследуемой пробы (Yablochkova et al., 2003). Количество этанола оценивали на газовом хроматографе Vista 600 (Varian, 600). Концентрации фурфурола, оксиметилфурфурола, летучих органических кислот и веществ лигнофуранового комплекса определяли стандартными методиками (Емельянова, 1976).

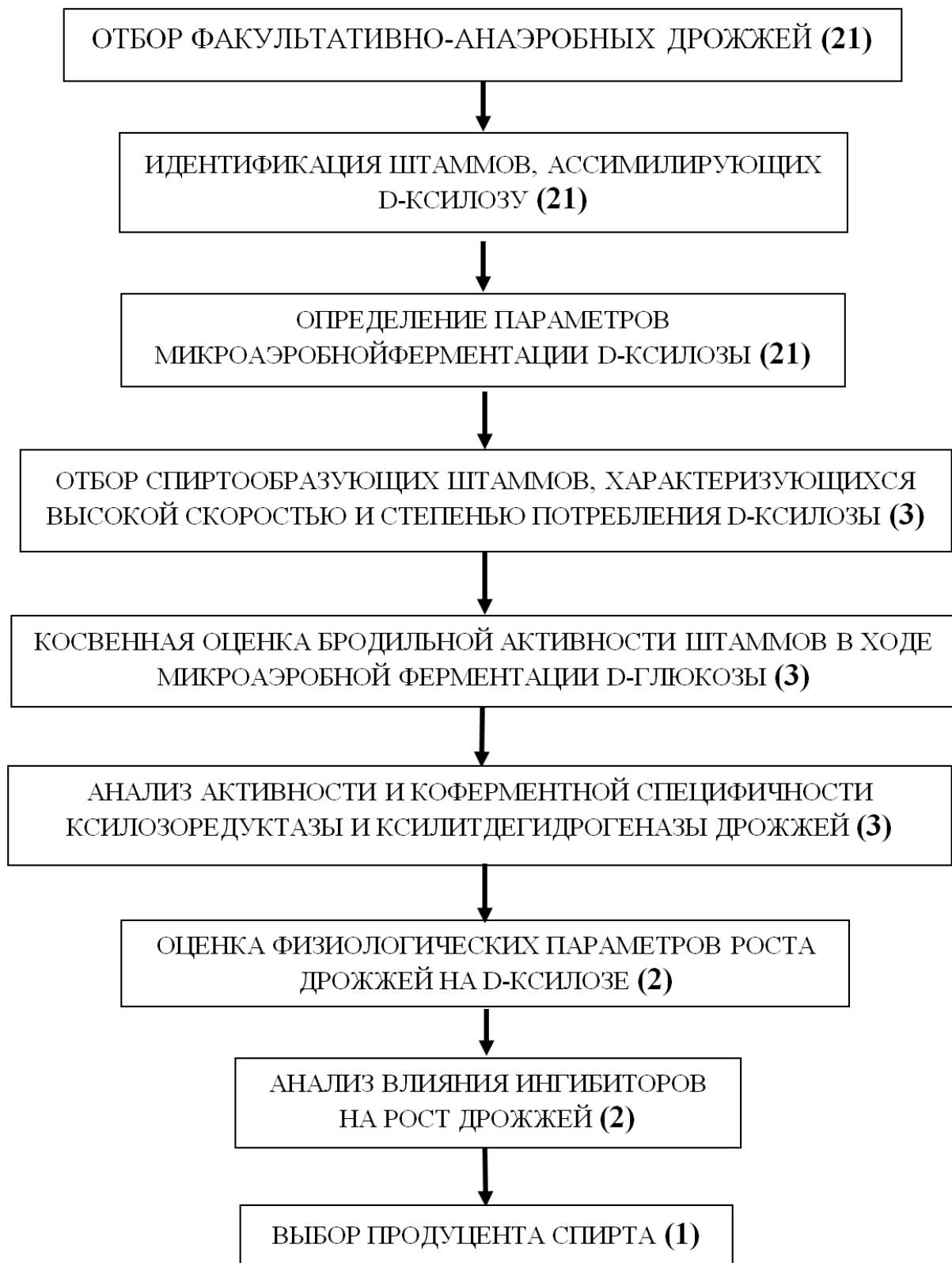
Анализ параметров спиртовой ферментации промышленных отходов растительной биомассы проводили, используя образец сульфитного щелока, побочного продукта сульфатной варки целлюлозы смешанных пород древесины (Светлогорский ЦБК). Сульфитный щелок подвергали предварительной детоксикации для уменьшения концентраций токсических примесей до конечных величин, не угнетающих спиртообразование дрожжей *P. tannophilus* Y-1533 (Шаповалов и др., 2008). Качественный состав сахаров образца сульфитного щелока соответствовал следующей схеме (г/л): 17.85 (D-ксилоза); 1.2 (L-арабиноза); 7.95 (D-манноза); 2.8 (D-глюкоза); 2.45 (D-галактоза). Спиртовую ферментацию сульфитного щелока проводили в течение 76 ч на пилотной установке Biostat M (Braun, Германия) в условиях, подробно изложенных в работе О.И. Шаповалова и др. (2008). Начальная концентрация биомассы *P. tannophilus* Y-1533 составляла 15 г/л (влажность 75%), режим принудительной аэрации благоприятствовал наибольшему выходу этанола (Болотникова и др., 2013а). Статистическую обработку экспериментальных результатов проводили стандартными методами определения критериев Стьюдента и  $\chi^2$  (Глотов и др., 1982).

## Результаты и обсуждение

Методика отбора коллекционных штаммов ксилосоассимилирующих дрожжей для спиртовой конверсии субстратов из отходов растительной биомассы показана на Рис. 1. На первом этапе отбора провели сравнительный анализ микроаэробной ферментации D-ксилозы и D-глюкозы, основных сахаров субстратов из отходов растительной биомассы (Болотникова и др., 2019; Kvasha et al., 2023). Установили, что коллекционные штаммы ксилосоассимилирующих дрожжей с различной скоростью и эффективностью ферментировали D-ксилозу. Прирост дрожжевой биомассы у всех ксилосоассимилирующих дрожжей был незначительным. Минимальный выход этанола не превышал 0.01 г на грамм потребленной D-ксилозы. Наилучшие характеристики спиртообразования отличали *C. shehatae* Y-1632. Эти дрожжи полностью ассимилировали 2.0% D-ксилозу в течение 24 ч со скоростью 0.83 г/л×ч и продуктивностью этанола 0.40 г/г (78% от теоретически рассчитанного максимума (Маринченко и др., 1981)). Кроме того, достаточно высокая скорость потребления D-ксилозы и экономический коэффициент образования спирта были отмечены для штаммов *P. stipitis* Y-1483 (0.76 г/л×ч и 0.39 г/г соответственно), а также *P. tannophilus* Y-1533 (0.65 г/л×ч и 0.27 г/г соответственно).

Затем провели микроаэробную ферментацию D-глюкозы, непосредственного субстрата реакций гликолиза. Ее результаты косвенно подтвердили достаточно высокую бродильную активность указанных выше ксилосоассимилирующих штаммов. Объемная скорость и эффективность продукции спирта достигали следующих величин: 0.80 г/л×ч и 0.40 г/г (*C. shehatae* Y-1632); 0.78 г/л×ч и 0.37 г/г (*P. stipitis* Y-1483); 0.79 г/л×ч и 0.36 г/г (*P. tannophilus* Y-1533). Тем не менее, во всех случаях продукция спирта ксилосоассимилирующими дрожжами уступала аналогичному показателю контрольного штамма *S. cerevisiae* ЛВ-7 (0.42 г/г). Это подтвердило зависимость между уровнем продукции этанола и активностью ферментов начальных этапов катаболизма D-ксилозы, катализирующих последовательные реакции превращения D-ксилозы в D-ксилулозу: ксилоредуктазы (XR) и ксилитдегидрогеназы (XD) (Болотникова и др., 2020).

Следующий этап отбора включал оценку активности и коферментной специфичности ферментов XR и XD у штаммов ксилосоассимилирующих дрожжей с наилучшей продукцией этанола. Установили, что XR *P. tannophilus*, *P. stipitis* и *C. shehatae* в микроаэробном режиме имела двойную НАДФН/НАДН-коферментную специфичность, тогда как XD характеризовалась высоким сродством к НАД<sup>+</sup>. При этом суммарная удельная активность XR *P. tannophilus* Y-1533 (4.16 мкМоль/мг×мин) оказалась ниже, чем аналогичная величина XD (5.26 мкМоль/мг×мин). У *P. stipitis* Y-2160 общие активности ферментов начальных этапов катаболизма D-ксилозы оказались зна-



**Рис. 1.** Скрининг продуцента этанола из D-ксилозы. В круглых скобках указано количество штаммов дрожжей, отобранных на каждом этапе скрининга.

чительно выше: 15.21 мкМоль/мг×мин (XR) и 8.64 мкМоль/мг×мин (XD), хотя их соотношение не изменилось. Штамм *C. shehatae* Y-1632, напротив, выделяла меньшая активность XR *C.* (8.33 мкМоль/мг×мин) по сравнению с XD (13.95 мкМоль/мг×мин).

Целесообразность практического использования того или иного штамма определяется не только его каталитическим потенциалом, но также физиологической пластичностью. Этанол является т.н. первичным метаболитом дрожжевой клетки (Болотникова и др., 2013а). В то же время накопление спирта в ферментационной среде угнетает метаболические процессы и рост дрожжевой культуры (Болотникова и др., 2013b). Аналогичное действие оказывают токсические компоненты промышленных отходов растительной биомассы – сульфитные щелоки: фурфурол (Ф), оксиметилфурфурол (ОФ), летучие органические кислоты (ЛОК) и вещества лигнофуранового комплекса (ВЛК) (Шаповалов и др., 2008). Поэтому на заключительных этапах отбора исследовали кинетику роста дрожжей *C. shehatae* (вероятной телеоморфы *P. stipitis* (Delweg et al., 1984)) и *P. tannophilus* на D-ксилозе, а также их чувствительность к токсическому действию этанола и других указанных выше ингибиторов.

Принадлежность к группе факультативных анаэробов сформировала близкие оптимумы температур, pH, концентраций O<sub>2</sub> и D-ксилозы в среде для роста обоих штаммов. Так, наибольшая скорость роста культуры *C. shehatae* Y-1632 наблюдалась при температурах 24–30 °С, pH = 4.5–5.5, концентрациях D-ксилозы не менее 0.15 г/л и не более 110.3 г/л в условиях полного насыщения ферментационной среды кислородом. Для штамма *P. tannophilus* Y-1533 отмечены лишь незначительные сдвиги оптимальных диапазонов температуры (24–32 °С), pH (3.5–5.0) и концентраций D-ксилозы в среде (3.01–109.6 г/л). Однако величина константы насыщения субстратом Моно ( $k_x = 4.44$  г/л) свидетельствовала о меньшем сродстве ферментов *P. tannophilus* Y-1533 к D-ксилозе и, соответственно, более низкой глубине потребления этого сахара в ходе микроаэробной ферментации. Аналогичная характеристика *C. shehatae* Y-1632 составляла 0.27 г/л. Вместе с тем удельная скорость роста последнего штамма  $\mu$ , равная 0.15 час<sup>-1</sup>, была существенно ниже, чем у *P. tannophilus* Y-1533 (0.25 час<sup>-1</sup>).

Наиболее разительные отличия выявили при анализе устойчивости ксилозоассимилирующих дрожжей к ингибиторам. При сходных предельно допустимых концентрациях этанола – 45.5 г/л (*C. shehatae* Y-1632) и 46 г/л (*P. tannophilus* Y-1533) – характер зависимости скорости роста штаммов от концентрации спирта был неодинаковым. Величина константы  $\alpha$  для *C. shehatae* (1.53) указывала на обратно пропорциональную зависимость, тогда как аналогичное значение для *P. tannophilus* (3.02) – на гиперболическую зависимость. Таким образом подтвердилась более высокая чувствительность *C. shehatae* Y-1632 к токсическому действию спирта. Кроме того, предельно допустимые для роста *C. shehatae* Y-1632 концентрации ингибиторов (г/л): 0.02 (Ф), 0.13 (ОФ), 0.44 (ЛОК), 0.76 (ВЛК) оказались значительно ниже, чем у *P. tannophilus* Y-1533: 0.1 (Ф), 0.27 (ОФ), 0.50 (ЛОК) и 1.74 (ВЛК). Следовательно, биоконверсию промышленных отходов растительной биомассы (таких как сульфитные щелока – побочные продукты целлюлозно-бумажной индустрии) целесообразно осуществлять с помощью дрожжей *P. tannophilus*, адаптированных к росту на бедных гексозами растительных субстратах с ингибиторами метаболизма (Boidin and Adzet, 1957). Поэтому на заключительном этапе работы установили параметры спиртовой ферментации образца сульфитного щелока периодической культурой *P. tannophilus* Y-1533 (Табл. 1).

Пересчет продукции спирта на 1200 мл бражки, полученной в ходе ректификации, свидетельствовал об экономическом выходе 12.52 г этанола или 15.5 мл этилового спирта крепостью 96%.

Согласно теоретическим расчетам, из 100 кг сахаров сульфитного щелока древесины лиственных пород, содержащей 55.6% D-ксилозы, 24.7% D-глюкозы, 8.7% D-маннозы, 7.6% D-галактозы и 3.7% L-арабинозы (Корольков, 1990) можно получить до 42.6 л этанола, увеличив общую продукцию

Табл. 1. Спиртовая ферментация сульфитного щелока штаммом *P. tannophilus* Y-1533. Статистическая ошибка в каждой экспериментальной точке не превышала 5.0%.

Параметры ферментации			
Время, час	Степень утилизации сахаров, %	Продукция этанола	
		Объемная скорость, г/л×ч	Концентрация, г/л
76	76	0.58	14.7

спирта на 70% по сравнению с традиционной технологией гидролизных производств (Шарков, 1973). Переработка сульфитного щелока древесины хвойных пород, имеющей в составе 46.3% D-маннозы, 24.6% D-глюкозы, 20.5% D-ксилозы, 7.9% L-арабинозы, 1.6% D-рамнозы (Корольков, 1990) обеспечит получение 55.5 л этанола, что улучшит общую продукцию спирта на 28% (Шарков, 1973).

## Заключение

1. Комплексный биотехнологический, биохимический и физиологический анализ особенностей катаболизма D-ксилозы у различных видов ксилозоассимилирующих дрожжей позволил сформулировать требования к продуцентам биоэтанола из отходов целлюлозно-бумажной промышленности. Возможность практической реализации данного процесса определяется степенью устойчивости ксилозоассимилирующих штаммов к токсическим примесям сульфитных щелоков и гидролизатов лигноцеллюлозы (фурфуролу, оксиметилфурфуролу, летучим органическим кислотам и веществам лигнофуранового комплекса). Уровень продукции биоэтанола из D-ксилозы, основного пятиатомного сахара отходов ЦБП, хорошо коррелирует с величиной активности, а также коферментной специфичностью ферментов ксилоредуктазы и ксилитдегидрогеназы.

2. Экспериментальные результаты доказывают перспективность использования ксилозоассимилирующих дрожжей штамма *P. tannophilus* Y-1533 для оптимизации техноэкосистем в регионах присутствия ЦБП. Однако разработка технологической концепции биорефайнинга сульфитных щелоков и гидролизатов лигноцеллюлозы требует предварительной селекции штаммов-продуцентов спирта на основе коллекционных культур *P. tannophilus*, которые никогда ранее не применялись в качестве промышленных биокатализаторов.

3. Успешное внедрение циркулярной экономической модели обеспечит формирование регулирующих обратных связей посредством замыкания ресурсных потоков на предприятиях ЦБП. Это значительно снизит токсичное действие органических отходов на лито- и гидросферу Северо-Запада РФ, а также создаст возможность для получения дешевой возобновляемой биоэнергии.

## Список литературы

- Болотникова, О.И., Михайлова, Н.П., Гинак, А.И., 2012. Физиологические особенности роста дрожжей *Pachysolen tannophilus*. *Микология и фитопатология* 46 (2), 136–139.
- Болотникова, О.И., Михайлова, Н.П., Гинак, А.И., 2013а. Спиртообразующая активность дрожжей *Pachysolen tannophilus* на ксилозосодержащих субстратах. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)* 20 (46), 72–74.
- Болотникова, О.И., Михайлова, Н.П., Гинак, А.И., 2013б. Сравнительный анализ физиологии роста ксилозоассимилирующих дрожжей *Candida shehatae* и *Pachysolen tannophilus*. *Микология и фитопатология* 47 (5), 329–332.
- Болотникова, О.И., Михайлова, Н.П., Базарнова, Ю.Г., Аронова, Е.Б., Болотникова, Т.А., Акинина, Ю.Н., 2019. Проблемы и перспективы использования микроорганизмов для утилизации отходов лигноцеллюлозы. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология* 9 (4), 679–693. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-679-693>
- Глотов, Н.В., Животовский, Н.В., Хованов, В.Г., Хромов-Борисов, Н.Н., 1982. Биометрия. ЛГУ, Ленинград, СССР, 244 с.
- Емельянова, И.З., 1976. Химико-технологический контроль гидролизных производств. Лесная промышленность, Москва, СССР, 328 с.
- Корольков, И.И., 1990. Перколяционный гидролиз растительного сырья. Лесная промышленность, Москва, СССР, 271 с.
- Костенко, В.Г., 1977. Газохроматографический анализ сред гидролизного производства на содержание индивидуальных моносахаридов. *Гидролизная и лесохимическая промышленность* 5, 11–13.

- Кудрявцев, В.И., 1981. Каталог культур микроорганизмов, поддерживаемых в СССР. Наука, Москва, Россия, 244 с.
- Кваша, Н.В., Малевская-Малевич, Е.Д., 2022. Проблема обеспечения эффективности циркулярных экономических систем Северо-Западного региона. *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития* **4** (71), 54–60. <https://doi.org/10.52897/2411-4588-2022-4-54-60>
- Кнорре, Д.Г., Эммануэль, Н.М., 1974. Курс химической кинетики. *Высшая школа*, Москва, СССР, 400 с.
- Маринченко, В.А., Смирнов, В.А., Устинников, Б.А., 1981. Технология спирта. Легкая и пищевая промышленность, Москва, СССР, 252 с.
- Огородникова, Т.Е., Михайлова, Н.П., Борохова, О.Э., Яблочкова, Е.Н., Андреевский, В.В., Шаповалов, О.И., 1995. Количественные показатели роста ксилосоусваивающих дрожжей *Pachysolen tannophilus* и *Candida chehatae*. *Микробиология* **64** (1), 13–17.
- Шаповалов, О.И., Михайлова, Н.П., Болотникова, О.И., 2008. Влияние ингибиторов гидролизатов лиственной древесины на продукцию биоэтанола. *Химическая промышленность* **85** (3), 122–126.
- Шарков, В.И., 1973. Технология гидролизных производств. Лесная промышленность, Москва, СССР, 408 с.
- Четвертнева, И.А., Каримов, О.Х., Тептерева, Г.А., Бабаев, Э.Р., Тивас, Н.С., Мовсумзаде, Э.М., 2021. Компоненты древесины как источники пентозансодержащего сырья для синтеза полезных соединений, продуктов и реагентов *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология* **64** (3), 107–115.
- Boidin, J., Adzet, J., 1957. Deux curieuses levures isolees d'extraits tannants d'origine végétale: *Pachysolen* (nov. gen.) *tannophilus* nov. sp. et *P. pelliculatus* nov. sp. *Bulletin de la Société Mycologique de France* **73** (4), 331–342. (In French).
- Bolotnikova, O., Bazarnova, J., Aronova, E., Bolotnikova, T., 2020. Study of transhydrogenase systems features in the mutants of the yeast *pachysolen tannophilus* for the production of ethanol and xylitol from agricultural wastes. *Agronomy Research* **18** (S1), 720–728. <https://doi.org/10.15159/AR.20.158>
- Kvasha, N., Bolotnikova, O., Malevskaia-Malevich, E., 2023. Biotechnological basis of the pulp and paper industry circular economic system. *Economies* **11** (12), 302. <https://doi.org/10.3390/economies11120302>
- Kreger-Van Rij, N.J.W. (ed.), 2013. The yeasts: a taxonomic study. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1082 p.
- Lowry, O.H., 1951. Protein measurement with the Folin phenol. *Journal of Biological Chemistry* **193** (1), 265–275.
- Luong, J.H.T., 1985. Kinetics of ethanol inhibition in alcohol fermentation. *Biotechnology and Bioengineering* **27** (3), 280–285.
- Prakash, K.S., Sanjukta, S., Latika, B., Koel, S., Divya, M. et al., 2022. Utilization of agricultural waste biomass and recycling toward circular bioeconomy. *Environ Sci Pollut Res Int.* **30** (4), 8526–8539. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20669-1>
- Pereira, S.R., Portugal-Nunes, D.J., Evtuguin, D.V., Serafim, L.S., Xavier, A.M.R.B., 2013. Advances in ethanol production from hardwood spent sulphite liquors. *Process Biochemistry* **48** (2) 272–282.

Yablochkova, E.N., Bolotnikova, O.I., Mikhailova, N.P., Nemova, N.N., Ginak, A.I., 2003. Specific features of fermentation of D-xylose and D-glucose by xylose-assimilating yeasts. *Applied Biochemistry and Microbiology* **39**, 265–269.

## References

Boidin, J., Adzet, J., 1957. Deux curieuses levures isolees d'extraits tannants d'origine végétale: *Pachysolen* (nov. gen.) *tannophilus* nov. sp. et *P. pelliculatus* nov. sp. *Bulletin de la Société Mycologique de France* **73** (4), 331–342. (In French).

Bolotnikova, O.I., Mikhailova, N.P., Ginak, A.I., 2012. Fiziologicheskie osobennosti rosta drozhzhei *Pachysolen tannophilus* [Physiological features of *Pachysolen tannophilus* yeast Growth. *Mikologiya i fitopatologiya* [Mycology and Phytopathology] **46** (2), 136–139. (In Russian).

Bolotnikova, O.I., Mikhailova, N.P., Ginak, A.I., 2013a. Spirtoobrazuyushchaya aktivnost' drozhzhei *Pachysolen tannophilus* na ksilozosoderzhashchih substratah [Alcohol-forming activity of *Pachysolen tannophilus* yeast on xylose-containing substrates. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University)] **20** (46), 72–74. (In Russian).

Bolotnikova, O.I., Mikhailova, N.P., Ginak, A.I., 2013b. Sravnitel'nyi analiz fiziologii rosta ksilozoassimiliruyushchih drozhzhei *Candida shehatae* i *Pachysolen tannophilus* [Comparative analysis of the growth physiology of the xylose-assimilating yeasts *Candida shehatae* and *Pachysolen tannophilus*. *Mikologiya i fitopatologiya* [Mycology and Phytopathology] **47** (5), 329–332. (In Russian).

Bolotnikova, O.I., Mikhailova, N.P., Bazarnova, Yu.G., Aronova, E.B., Bolotnikova, T.A., Akinina, Uu.N., 2019. Problemy i perspektivy ispol'zovaniia mikroorganizmov dlia utilizatsii otkhodov lignotselliulozy [Problems and prospects of using microorganisms for the utilization of lignocellulose waste]. *Izvestiia vuzov. Prikladnaia khimiia i biotekhnologiya* [Universities News. Applied Chemistry and Biotechnology] **9** (4), 679–693. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-679-693>

Bolotnikova, O., Bazarnova, J., Aronova, E., Bolotnikova, T., 2020. Study of transhydrogenase systems features in the mutants of the yeast *pachysolen tannophilus* for the production of ethanol and xylitol from agricultural wastes. *Agronomy Research* **18** (S1), 720–728. <https://doi.org/10.15159/AR.20.158>

Chetvertneva, I.A., Karimov, O.H., Teptereva, G.A., Babaev, E.R., Tivas, N.S., Movsumzade, E.M., 2021. Komponenty drevesiny kak istochniki pentozansoderzhashchego syr'ya dlya sinteza poleznykh soedinenii, produktov i reagentov [Wood components as sources of pentosan-containing raw materials for the synthesis of useful compounds, products, and reagents]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenii. Himiya i himicheskaya tekhnologiya* [News of Higher Educational Institutions. Chemistry and Chemical Technology] **64** (3), 107–115. (In Russian).

Glotov, N.V., Zhivotovsky, N.V., Khovanov, V.G., Khromov-Borisov, N.N., 1982. *Biometriya* [Biometry]. Leningrad State University, Leningrad, USSR, 244 p. (In Russian).

Emelyanova, I.Z., 1976. Himiko-tekhnologicheskij kontrol' gidroliznykh proizvodstv [Chemical-engineering control of hydrolysis production]. Forestry Industry, Moscow, USSR, 328 p. (In Russian).

Korolkov, I.I., 1990. Perkolyacionnyi gidroliz rastitel'nogo syr'ya [Percolation hydrolysis of plant raw materials]. Lesnaya promyshlennost', Moscow, USSR, 271 p. (In Russian).

Kostenko, V.G., 1977. Gazohromatograficheskij analiz sred gidroliznogo proizvodstva na sodержanie individual'nykh monosaharidov [Gas chromatographic analysis of hydrolysis production media for the content of individual monosaccharides]. *Gidroliznaya i lesohimicheskaya promyshlennost'* [Hydrolysis and Wood Chemical Industry] **5**, 11–13. (In Russian).

- Kudryavtsev, V.I., 1981. Katalog kul'tur mikroorganizmov, podderzhivaemyh v SSSR [Catalog of microorganism cultures maintained in the USSR]. Nauka, Moscow, Russia, 244 p. (in Russian).
- Kvasha, N.V., Malevskaya-Malevich, E.D., 2022. Problema obespecheniya effektivnosti cirkulyarnykh ekonomicheskikh sistem Severo-Zapadnogo regiona [The problem of ensuring the efficiency of circular economic systems in the Northwestern region]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the Northwest: Problems and Development Prospects] **4** (71), 54–60. (In Russian). <https://doi.org/10.52897/2411-4588-2022-4-54-60>
- Kvasha, N., Bolotnikova, O., Malevskaia-Malevich, E., 2023. Biotechnological basis of the pulp and paper industry circular economic system. *Economies* **11** (12), 302. <https://doi.org/10.3390/economies11120302>
- Knorre, D.G., Emmanuel, N.M., 1974. Kurs himicheskoi kinetiki [Course in chemical kinetics]. Vysshaya shkola, Moscow, USSR, 400 p. (In Russian).
- Kreger-Van Rij, N.J.W. (ed.), 2013. The yeasts: a taxonomic study. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1082 p.
- Lowry, O.H., 1951. Protein measurement with the Folin phenol. *Journal of Biological Chemistry* **193** (1), 265–275.
- Luong, J.H.T., 1985. Kinetics of ethanol inhibition in alcohol fermentation. *Biotechnology and Bioengineering* **27** (3), 280–285.
- Marinchenko, V.A., Smirnov, V.A., Ustinnikov, B.A., 1981. Tekhnologiya spirta [Alcohol technology]. Legkaya i pishchevaya promyshlennost', Moscow, USSR, 252 p. (In Russian).
- Ogorodnikova, T.E., Mikhailova, N.P., Borokhova, O.E., Yablochkova, E.N., Andreevsky, V.V., Shapovalov, O.I., 1995. Kolichestvennye pokazateli rosta ksilozousvaivayushchih drozhzhej *Pachysolen tannophilus* i *Candida chehatae* [Quantitative growth indices of xylose-assimilating yeasts *Pachysolen tannophilus* and *Candida chehatae*]. *Mikrobiologiya* [Microbiology] **64** (1), 13–17. (In Russian).
- Prakash, K.S., Sanjukta, S., Latika, B., Koel, S., Divya, M. et al., 2022. Utilization of agricultural waste biomass and recycling toward circular bioeconomy. *Environ Sci Pollut Res Int.* **30** (4), 8526–8539. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20669-1>
- Pereira, S.R., Portugal-Nunes, D.J., Evtuguin, D.V., Serafim, L.S., Xavier, A.M.R.B., 2013. Advances in ethanol production from hardwood spent sulphite liquors. *Process Biochemistry* **48** (2) 272–282.
- Shapovalov, O.I., Mihailova, N.P., Bolotnikova, O.I., 2008. Vliyanie ingibitorov gidrolizatov listvennoi drevesiny na produkciyu bioetanola [Effect of hardwood hydrolysate inhibitors on bioethanol production]. *Himicheskaya promyshlennost'* [Chemical Industry] **85** (3), 122–126. (In Russian).
- Sharkov, V.I., 1973. Tekhnologiya gidroliznykh proizvodstv [Technology of hydrolysis production]. Lesnaya promyshlennost', Moscow, USSR, 408 p. (In Russian).
- Yablochkova, E.N., Bolotnikova, O.I., Mikhailova, N.P., Nemova, N.N., Ginak, A.I., 2003. Specific features of fermentation of D-xylose and D-glucose by xylose-assimilating yeasts. *Applied Biochemistry and Microbiology* **39**, 265–269.