

Краткие сообщения

УДК 577.114

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-310-317>

EDN: URUPYY



Отбор травянистого целлюлозосодержащего сырья, пригодного для биотехнологической переработки

Е.К. Гладышева✉, В.В. Будаева, Е.А. Скиба, Е.И. Кашеева, В.Н. Золотухин

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,
г. Бийск, Российская Федерация

Аннотация. Использование целлюлозосодержащего растительного сырья для производства биопродуктов является одним из ключевых вопросов устойчивого экономического развития. Травянистое целлюлозосодержащее сырье – наиболее распространенный и легко возобновляемый ресурс. Данная работа посвящена отбору травянистого целлюлозосодержащего сырья, пригодного для биотехнологической переработки, исследованы следующие источники: тростник, мискантус сорта Сорановский, водяной гиацинт, салат Айсберг, суданская трава, шелуха овса, солома льна-межеумка. Предварительная химическая обработка сырья проведена классическим методом щелочной делигнификации при атмосферном давлении, полученные субстраты превращены в раствор редуцирующих сахаров методом ферментативного гидролиза. Установлено, что методом щелочной делигнификации исходного сырья возможно получить продукты с массовым содержанием целлюлозы по Кюршнеру от 82,9 до 93,1%, что является хорошим показателем для дальнейшего ферментативного гидролиза. По результатам ферментативного гидролиза продуктов щелочной делигнификации выявлено, что наибольшую реакционную способность к ферментативному гидролизу имели продукты щелочной делигнификации мискантуса сорта Сорановский, салата Айсберг и шелухи овса: концентрация редуцирующих веществ составила 25,0; 28,4 и 26,9 г/л (выход редуцирующих веществ от массы субстрата составил 75,0; 85,2 и 80,7%) соответственно. Таким образом, высокая реакционная способность этих видов сырья позволяет рекомендовать их для дальнейшей биотехнологической переработки. Для других видов сырья необходима оптимизация стадии щелочной делигнификации для повышения реакционной способности к ферментативному гидролизу.

Ключевые слова: травянистое целлюлозосодержащее сырье, продукт щелочной делигнификации, ферментативный гидролиз, компонентный состав, редуцирующие вещества

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках государственного задания Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН (госрегистрация темы проекта 121061500030-3).

Для цитирования: Гладышева Е.К., Будаева В.В., Скиба Е.А., Кашеева Е.И., Золотухин В.Н. Отбор травянистого целлюлозосодержащего сырья, пригодного для биотехнологической переработки // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 2. С. 310–317. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-310-317>. EDN: URUPYY.

Brief communication

Selection of herbaceous cellulose-containing raw materials for biotechnological processing

Evgeniya K. Gladysheva✉, Vera V. Budaeva, Ekaterina A. Skiba,
Ekaterina I. Kashcheeva, Vladimir N. Zolotuhin

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the SB RAS, Biysk, Russian Federation

Abstract. The use of cellulose-containing plant materials for obtaining bioproducts comprises a relevant research direction in the field of sustainable economic development. Herbaceous cellulose-containing raw materials are among the most widespread and easily renewable resources. In this study, we set out to identify herbaceous cellulose-containing raw materials suitable for biotechnological processing among the following plants: cane, miscanthus (Soranovsky variety), water hyacinth, iceberg lettuce, Sudan grass, oat husk, flax straw (*Linum usitatissimum* L.). Preliminary chemical treatment of raw materials was carried out by the conventional method of alkaline delignification at atmospheric pressure. The obtained substrates were converted into a solution of reducing sugars by enzymatic hydrolysis. The method of alkaline delignification of initial raw materials was found to be suitable for obtaining products with the cellulose mass content of 82.9–93.1% by the Kurschner method. This conversion rate can be considered a good indicator for further enzymatic hydrolysis. According to the results of enzymatic

hydrolysis of alkaline delignification products, the highest reactivity to enzymatic hydrolysis was demonstrated by the alkaline delignification products of miscanthus (Soranovsky variety), iceberg lettuce and oat husk. For these plants, the concentration of reducing substances reached 25.0, 28.4 and 26.9 g/l, under the yield of reducing substances from the substrate mass of 75.0, 85.2 and 80.7%, respectively. Therefore, the high reactivity of these plant materials makes them prospective candidates for further biotechnological processing. Other investigated plant materials require optimization of the alkaline delignification stage to increase their reactivity to enzymatic hydrolysis.

Keywords: herbaceous cellulose-containing raw materials, alkaline delignification product, enzymatic hydrolysis, component composition, reducing agents

Funding. The work was completed under the auspices of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no.121061500030-3).

For citation: Gladysheva E.K., Budaeva V.V., Skiba E.A., Kashcheeva E.I., Zolotuhin V.N. Selection of herbaceous cellulose-containing raw materials for biotechnological processing. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(2):310-317. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-310-317>. EDN: URUPYY.

ВВЕДЕНИЕ

Целлюлоза является одним из наиболее распространенных доступных природных полимеров, встречающихся в структурных тканях клеточных стенок всех высших растений и некоторых водорослей [1]. Основными преимуществами целлюлозосодержащего сырья являются его возобновляемость, биоразлагаемость, биосовместимость, доступность, экологичность [1–4].

Как правило, травянистое целлюлозосодержащее сырье представляет собой матрицу, состоящую из трех полимеров: целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина, минеральных и других компонентов, которые плотно связаны между собой, создавая усиленную гидрофобную сеть с высокой прочностью и жесткостью клеточной стенки [5]. По этой причине предварительная обработка сырья является важным этапом разрушения естественной структуры клеточной стенки растения для обеспечения доступа к полисахаридам гидролитических ферментов [6]. В качестве метода предварительной химической обработки в данной работе выбрана обработка щелочью. Щелочная делигнификация прошла многочисленные исследования, она является одним из самых распространенных способов разрушения сырьевой матрицы и выделения полисахаридов и считается классическим способом предобработки для травянистого сырья [7–10].

В данной статье исследуются щелочная делигнификация и ферментативный гидролиз семи видов травянистого целлюлозосодержащего сырья Российской Федерации с целью обоснования выбора сырья, целесообразного для дальнейшей биотехнологической переработки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве сырья в данной работе были исследованы актуальные для России источники, признанные также во всем мире: тростник (*Phragmites australis*) [11] (ООО «Лотос Холдинг», Республика Калмыкия); мискантус сахароцветковый (*Miscanthus sacchariflorus*) [12] сорт Сорановский (СибНИИРС – филиал ИЦиГ СО РАН, п. Мичуринский, Новосибирская область); водный гиацинт (*Eichhornia crassipes*) [13] (ЦБС СО РАН, г. Новосибирск); салат Айсберг (*Lactuca sativa*) [14] (ООО «Прованс», г. Тюмень); суданская трава, сор-

го (*Sorghum × drummondii*) [15] (СибНИИРС – филиал ИЦиГ СО РАН, г. Новосибирск); шелуха овса (*Avena sativa* L.) [16] (ООО «Диарит», г. Тамбов); солома льна-межеумка (*Linum usitatissimum* L.) [17] (ЗАО «СЭУС», Алтайский край).

Щелочная делигнификация проводилась обработкой сырья раствором 4%-го NaOH при температуре от 92 до 96 °С и атмосферном давлении в течение от 1 до 6 ч с последующим отжимом на вакуум-фильтре и промывкой до нейтральной реакции [18]. В сырье и полученных продуктах щелочной делигнификации (ПЩД) определяли компонентный состав классическими «мокрыми» методами [19]. Ферментативный гидролиз образцов ПЩД проводился в 0,1 М ацетатном буферном растворе (рН 4,6); начальная концентрация субстрата – 30,0 г/л в расчете на сухое вещество, температурный режим – (46±2) °С, скорость перемешивания – 150 об/мин, продолжительность процесса – 72 ч; ферментные препараты: «Целлолюкс-А (0,054 г/г субстрата) и «Ультрафло Коре» (0,165 г/г субстрата). Концентрация редуцирующих веществ (РВ) в процессе ферментативного гидролиза определялась спектрофотометрически на спектрофотометре Agilent Cary-60 (Agilent, Малайзия) с использованием динитросалицилового реактива [20]. Все реактивы приобретены в АО «Вектон» (г. Санкт-Петербург, Россия). Работа выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице представлен компонентный состав сырья и образцов ПЩД, полученных из него.

Максимальная массовая доля целлюлозы по Кюршнеру содержится в соломе льна-межеумка (51,9%), минимальные – в водяном гиацинте (26,0%) и салате Айсберг (17,1%). Для остальных источников сырья содержание целлюлозы по Кюршнеру варьирует от 36,5 до 49,2%. Максимальная массовая доля пентозанов содержится в шелухе овса (29,3%), достаточно высокая – в мискантусе (24,2%), минимальная – в салате Айсберг (5,2%). Наибольшую массовую долю кислотонерастворимого лигнина содержит тростник (23,8%), наименьшую – салат Айсберг (6,0%). Наибольшую массовую долю золы содержит

Компонентный состав сырья и образцов продуктов щелочной делигнификации, полученных из него

Component composition of raw materials and samples of alkaline delignification products purchased from it

Сырье	Массовая доля, %					Выход, %
	Целлюлоза по Кюршнеру	Пентозаны	Лигнин*	Зола	ЖВФ**	
Сырье						
Тростник	42,7	18,5	23,8	6,6	1,1	–
Мискантус сорта Сорановский	49,2	24,2	16,9	3,7	1,0	–
Водяной гиацинт	26,0	11,4	11,7	25,4	1,2	–
Салат Айсберг	17,1	5,2	6,0	11,3	1,9	–
Суданская трава	43,1	18,7	16,5	6,4	1,3	–
Шелуха овса	36,5	29,3	19,2	6,2	2,2	–
Солома льна-межеумка	51,9	14,7	20,8	2,7	2,9	–
Продукты щелочной делигнификации						
Тростник	88,4	3,5	7,6	1,0	1,2	28,0
Мискантус сорта Сорановский	93,1	4,0	5,4	0,5	1,9	38,0
Водяной гиацинт	82,9	1,4	18,6	7,5	2,3	14,3
Салат Айсберг	83,6	3,0	15,0	0,2	–	28,0
Суданская трава	91,6	7,5	5,9	2,1	2,4	33,3
Шелуха овса	86,7	7,0	5,4	1,1	–	34,7
Солома льна-межеумка	90,1	3,5	15,3	3,1	1,9	48,6

Примечание. * – кислотонерастворимый лигнин; ** – жировосковая фракция.

водяной гиацинт (25,4%), наименьшую – мискантус (3,7%). Все виды сырья характеризуются низким содержанием жировосковой фракции, наибольшее значение 2,9% наблюдается для соломы льна-межеумка, что связано с масличной природой этой культуры.

Следует отметить, что водяной гиацинт и салат Айсберг характеризуются минимальной суммой гидролизующих веществ (37,4 и 22,3%). Несмотря на это, оба этих вида сырья являются перспективными для дальнейшей биотехнологической переработки вследствие их воспроизводства в промышленных масштабах. В процессе выращивания и поставки в торговлю салата Айсберг образуется около 50% отсортированной и непригодной для дальнейшего применения фракции, подлежащей утилизации [14]. Водяной гиацинт является инвазивным водным сорняком, который быстро растет на поверхности водных сред и сильно истощает питательные вещества [13]. Кроме компонентов, представленных в таблице, в состав водяного гиацинта и салата Айсберг входят минеральные и белковые вещества [21, 22]. Таким образом, все виды сырья являются перспективными целлюлозосодержащими культурами.

Анализ компонентного состава образцов ПЩД показал, что в результате химической обработки возрастает содержание массовой доли целлюлозы и снижаются массовые доли пентозанов, кислотонерастворимого лигнина и золы. Массовую долю целлюлозы по Кюршнеру выше 90% имели образцы ПЩД, полученные из мискантуса, суданской травы и соломы льна-межеумка. В других образцах ПЩД массовая доля целлюлозы по Кюршнеру находилась в

диапазоне от 82,9 до 88,4%, этот факт является необходимым условием для успешного проведения ферментативного гидролиза [23, 24]. Содержание кислотонерастворимого лигнина в образцах ПЩД снижается в 1,4–3,5 раза, за исключением образцов ПЩД водяного гиацинта и салата Айсберг. Салат Айсберг и гиацинт были собраны в активную фазу роста и имели высокую влажность. Увеличение массовой доли кислотонерастворимого лигнина в образцах ПЩД из этих видов сырья в процессе предобработки обусловлено специфической природой лигнина. Описано, что лигнин сырья, характеризующегося высокой влажностью в момент сбора, не растворим в растворе гидроксида натрия в процессе делигнификации [25]. Процесс щелочной делигнификации всех видов сырья, за исключением соломы льна-межеумка, приводит к снижению массовой доли золы: для салата Айсберг в 65 раз, для остальных видов сырья в 3–7 раз. Сравнение выхода образцов ПЩД, полученных из разных источников сырья, показало, что наибольшим выходом характеризуется образец ПЩД, полученный из соломы льна-межеумка (48,6%), наименьшим выходом – ПЩД водяного гиацинта (14,3%).

На рисунке представлена зависимость концентрации РВ от продолжительности ферментативного гидролиза образцов ПЩД. Выявлено, что образцы ПЩД мискантуса, салата Айсберг и шелухи овса обладали наибольшей реакционной способностью. Через 72 ч концентрация РВ в них составила 25,0; 28,4 и 26,9 г/л (выход РВ от массы субстрата составил 75,0; 85,2 и 80,7%) соответственно. Следует отметить, что образец ПЩД мискантуса характеризовался особой кинетической зависимостью: резкий рост concentra-

ции РВ в первые 24 ч гидролиза до 25,0 г/л (выход РВ 75,0%) и затем замедление процесса. Прирост РВ в течение всего процесса гидролиза образцов ПЩД салата Айсберг и шелухи овса происходил более равномерно.

Высокая реакционная способность к ферментативному гидролизу образцов ПЩД мискантуса, салата Айсберг и шелухи овса не согласуется с компонентным составом ПЩД. Предварительная обработка методом щелочной делигнификации направлена на выделение целлюлозы и удаление значительного количества лигнина и частично гемицеллюлоз [6, 7]. Исходя из этого, высокой реакционной способностью к ферментативному гидролизу, кроме ПЩД мискантуса, должны обладать ПЩД суданской травы и соломы льна-межеумка.

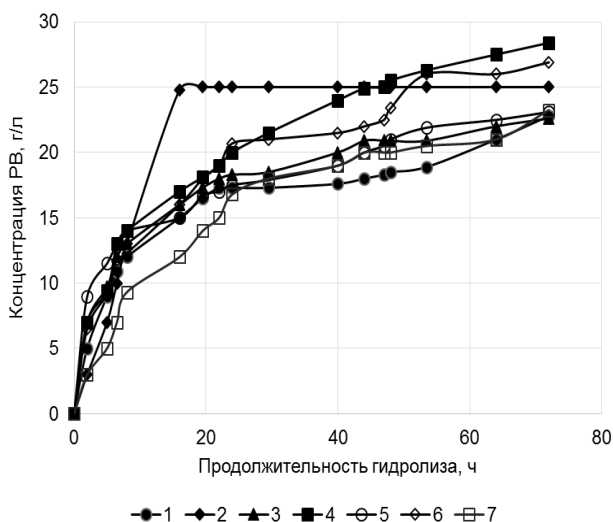
Высокое содержание кислотонерастворимого лигнина может оказывать негативное влияние при проведении ферментативного гидролиза из-за возможной адсорбции ферментных препаратов на лигнине [26]. Однако на примере ПЩД салата Айсберг это не подтверждается, т.к. при массовом содержании лигнина 15% наблюдается высокая реакционная способность субстрата к гидролизу. Реакционная

способность к ферментативному гидролизу исследованных субстратов не объясняется ни компонентным составом сырья, ни компонентным составом ПЩД. Ее можно объяснить зависимостью от природы (морфологии) субстрата, предполагающего доступность целлюлозных волокон для фермента [23], что, в свою очередь, может быть обусловлено диаметром волокна, разрыхленностью волокна, морфологическими особенностями органов растений (например, плоские листья салата или калиброванные природой тонкие пластинки шелухи овса). Таким образом, успешная щелочная делигнификация и высокая доля целлюлозы в субстрате недостаточны для прогнозирования успешности результатов ферментативного гидролиза. Заключительный анализ совокупности стадий щелочной делигнификации и ферментативного гидролиза с целью обоснования выбора сырья, целесообразного для дальнейшей биотехнологической переработки, возможен после проведения полного цикла исследований. Получение продуктов микробиологического синтеза на средах ферментативных гидролизатов также непредсказуемо, поскольку среды могут содержать природные ингибиторы для чувствительных продуцентов [27].

Остальные виды сырья – тростник, суданская трава, шелуха овса, солома льна-межеумка – после проведенного ферментативного гидролиза позволили получить выход РВ от 68,2 до 80,7%, что является вполне приемлемым, а оптимизация стадии щелочной делигнификации позволит повысить реакционную способность к ферментативному гидролизу для этих видов сырья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы выявлено, что все семь видов исследуемых растений являются перспективными целлюлозосодержащими культурами. Установлено, что методом щелочной делигнификации исходного сырья (тростник, мискантус сорта Сорановский, водяной гиацинт, салат Айсберг, суданская трава, шелуха овса, солома льна-межеумка) возможно получить продукты щелочной делигнификации с массовым содержанием целлюлозы по Кюршнеру от 82,9 до 93,1%, что является хорошим показателем для дальнейшего ферментативного гидролиза. Показано, что наибольшую реакционную способность к ферментативному гидролизу имели продукты щелочной делигнификации мискантуса сорта Сорановский, салата Айсберг и шелухи овса: концентрация РВ составила 25,0; 28,4 и 26,9 г/л (выход РВ от массы субстрата составил 75,0; 85,2 и 80,7% соответственно). Для других видов сырья необходима оптимизация стадии щелочной делигнификации для повышения реакционной способности к ферментативному гидролизу.



Зависимость концентрации редуцирующих веществ от продолжительности ферментативного гидролиза образцов продуктов щелочной делигнификации: 1 – тростник; 2 – мискантус; 3 – водяной гиацинт; 4 – салат Айсберг; 5 – суданская трава; 6 – шелуха овса; 7 – солома льна-межеумка

Relationship between RS concentration and duration of enzymatic hydrolysis of alkaline delignification products: 1 – reed; 2 – miscanthus; 3 – water hyacinth; 4 – iceberg lettuce; 5 – Sudan grass; 6 – oat husk; 7 – flax straw

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lu H., Yadav V., Bilal M., Iqbal H.M. Bioprospecting microbial hosts to valorize lignocellulose biomass – Environmental perspectives and value-added bioproducts // Chemosphere. 2022. Vol. 288. P. 132574. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132574>.

2. El-Gendi H., Taha T.H., Ray J.B., Saleh A.K. Recent advances in bacterial cellulose: a low-cost effective production media, optimization strategies and applications // Cellulose. 2022. Vol. 29. P. 7495–7533. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04697-1>.

3. Son J., Lee K.H., Lee T., Kim H.S., Shin W.H., Oh J.-M., et al. Enhanced production of bacterial cellulose from *Miscanthus* as sustainable feedstock through statistical optimization of culture conditions // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19, no. 2. P. 866. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020866>.
4. Евстафьев С.Н., Фомина Е.С., Тигунцева Н.П. Термохимическое ожигание соломы пшеницы в среде суб- и сверхкритического тетралина // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 1. С. 160–166. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-160-166>.
5. van der Crujisen K., Al Hassan M., van Erven G., Dolstra O., Trindade L.M. Breeding targets to improve biomass quality in miscanthus // Molecules. 2021. Vol. 26, no. 2. P. 254. <https://doi.org/10.3390/molecules26020254>.
6. Baksi S., Saha D., Saha S., Sarkar U., Basu D., Kuniyal J.C. Pre-treatment of lignocellulosic biomass: review of various physico-chemical and biological methods influencing the extent of biomass depolymerization // International Journal of Environmental Science and Technology. 2023. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04838-4>.
7. Naeem M., Imran M., Latif S., Ashraf A., Hussain N., Boczkaj G., et al. Multifunctional catalyst-assisted sustainable reformation of lignocellulosic biomass into environmentally friendly biofuel and value-added chemicals // Chemosphere. 2023. Vol. 330, no. 6. P. 138633. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138633>.
8. Bhatia S.K., Jagtap S.S., Bedekar A.A., Bhatia R.K., Patel A.K., Pant D., et al. Recent developments in pre-treatment technologies on lignocellulosic biomass: effect of key parameters, technological improvements, and challenges // Bioresource Technology. 2020. Vol. 300. P. 122724. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122724>.
9. Козлов И.А., Гарипов Р.М. Катализ и его роль в процессах глубокой переработки растительной биомассы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. N 1. С. 188–191. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-1-188-191>.
10. Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Александров А.А., Печеный Е.А., Нуриев Н.К., Ямашев Т.А. [и др.]. Управление яркостью травянистой целлюлозы на стадии ее отбелки // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24. N 2. С. 49–55.
11. Podgorbunskikh E.M., Bychkov A.L., Lomovsky O.I., Ryabchikova E.I., Lomovsky O.I. The effect of thermomechanical pretreatment on the structure and properties of lignin-rich plant biomass // Molecules. 2020. Vol. 25, no. 4. P. 995. <https://doi.org/10.3390/molecules25040995>.
12. Капустянчик С.Ю. Особенности развития и формирования биомассы мискантуса в лесостепи Новосибирского Приобья // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. N 12. С. 28–31.
13. Hronich J.E., Martin L., Plawsky J., Bungay H.R. Potential of *Eichhornia crassipes* for biomass refining // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2008. Vol. 35, no. 5. P. 393–402. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0333-x>.
14. Procentese A., Raganati F., Olivieri G., Russo M.E., Marzocchella A. Pre-treatment and enzymatic hydrolysis of lettuce residues as feedstock for bio-butanol production // Biomass and Bioenergy. 2017. Vol. 96. P. 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.11.015>.
15. Abdelhalim T.S., Kamal N.M., Hassan A.B. Nutritional potential of wild sorghum: Grain quality of Sudanese wild sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* L. Moench) // Food Science and Nutrition. 2019. Vol. 7, no. 4. P. 1529–1539. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1002>.
16. Chopda R., Ferreira J.A., Taherzadeh M.J. Biorefining oat husks into high-quality lignin and enzymatically digestible cellulose with acid-catalyzed ethanol organosolv pretreatment // Processes. 2020. Vol. 8, no. 4. P. 435. <https://doi.org/10.3390/pr8040435>.
17. Gismatulina Yu.A. Intermediate flax straw-derived cellulose // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2022. Vol. 15, no. 3. P. 377–386. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0301>.
18. Kashcheyeva E.I., Gismatulina Y.A., Budaeva V.V. Pretreatments of non-woody cellulosic feedstocks for bacterial cellulose synthesis // Polymers. 2019. Vol. 11, no. 10. P. 1645. <https://doi.org/10.3390/polym11101645>.
19. Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Kortusov A.N., Kashcheyeva E.I., Gladysheva E.K., Mironova G.F., et al. Evaluation of chemical composition of *Miscanthus × giganteus* raised in different climate regions in Russia // Plants. 2022. Vol. 11, no. 20. P. 2791. <https://doi.org/10.3390/plants11202791>.
20. Miller G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar // Analytical Chemistry. 1959. Vol. 31, no. 3. P. 426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>.
21. de Souza Araújo D.F., da Silva A.M.R.B., de Andrade Lima L.L., da Silva Vasconcelos M.A., Andrade S.A.C., Sarubbo L.A. The concentration of minerals and physicochemical contaminants in conventional and organic vegetables // Food Control. 2014. Vol. 44. P. 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.04.005>.
22. Akinwande V.O., Mako A.A., Babayemii O.J. Biomass yield, chemical composition and the feed potential of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*, Mart. Solms-Laubach) in Nigeria // International Journal of Agri-Science. 2013. Vol. 3, no. 8. P. 659–666.
23. Kashcheyeva E.I., Gismatulina Yu.A., Mironova G.F., Gladysheva E.K., Budaeva V.V., Skiba E.A., et al. Properties and hydrolysis behavior of celluloses of different origin // Polymers. 2022. Vol. 14. P. 3899. <https://doi.org/10.3390/polym14183899>.
24. Podgorbunskikh E.M., Bychkov A.L., Lomovsky O.I. Determination of surface accessibility of the cellulose substrate according to enzyme sorption // Polymers. 2019. Vol. 11, no. 7. P. 1201. <https://doi.org/10.3390/polym11071201>.
25. Höller M., Lunze A., Wever C., Deutschle A.L., Stücker A., Frase N., et al. Meadow hay, *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L. as potential non-wood raw materials for the pulp and paper industry // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 167. P. 113548. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113548>.

26. Gu Y., Guo J., Nawaz A., ul Haq I., Zhou X., Xu Y. Comprehensive investigation of multiples factors in sulfuric acid pretreatment on the enzymatic hydrolysis of waste straw cellulose // *Bioresource Technology*. 2021. Vol. 340. P. 125740. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125740>.

27. Ha D.T., Kanarsky A.V., Kanarskaya Z.A., Shcher-

bakov A.V., Shcherbakova E.N., Pranovich A.V. Impact of cultivation conditions on xylanase production and growth in *paenibacillus mucilaginosus* // *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020. Vol. 10, no. 3. P. 459–469. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-459-469>.

REFERENCES

1. Lu H., Yadav V., Bilal M., Iqbal H.M. Bioprospecting microbial hosts to valorize lignocellulose biomass – Environmental perspectives and value-added bioproducts. *Chemosphere*. 2022;288:132574. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132574>.

2. El-Gendi H., Taha T.H., Ray J.B., Saleh A.K. Recent advances in bacterial cellulose: a low-cost effective production media, optimization strategies and applications. *Cellulose*. 2022;29:7495-7533. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04697-1>.

3. Son J., Lee K.H., Lee T., Kim H.S., Shin W.H., Oh J.-M., et al. Enhanced production of bacterial cellulose from *Miscanthus* as sustainable feedstock through statistical optimization of culture conditions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(2):866. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020866>.

4. Evstaf'ev S.N., Fomina E.S., Tiguntceva N.P. Thermochemical liquefaction of wheat straw in sub- and supercritical tetralin. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(1):160-166. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-160-166>.

5. van der Crujisen K., Al Hassan M., van Erven G., Dolstra O., Trindade L.M. Breeding targets to improve biomass quality in miscanthus. *Molecules*. 2021;26(2):254. <https://doi.org/10.3390/molecules26020254>.

6. Baksi S., Saha D., Saha S., Sarkar U., Basu D., Kuniyal J.C. Pre-treatment of lignocellulosic biomass: review of various physico-chemical and biological methods influencing the extent of biomass depolymerization. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04838-4>.

7. Naeem M., Imran M., Latif S., Ashraf A., Hussain N., Boczkaj G., et al. Multifunctional catalyst-assisted sustainable reformation of lignocellulosic biomass into environmentally friendly biofuel and value-added chemicals. *Chemosphere*. 2023;330(6):138633. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138633>.

8. Bhatia S.K., Jagtap S.S., Bedekar A.A., Bhatia R.K., Patel A.K., Pant D., et al. Recent developments in pretreatment technologies on lignocellulosic biomass: effect of key parameters, technological improvements, and challenges. *Bioresource Technology*. 2020;300:122724. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122724>.

9. Kozlov I.A., Garipov R.M. Catalysis and its impact in the processes of deep processing of plant biomass. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2017;7(1):188-191. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-1-188-191>.

10. Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Aleksandrov A.A., Pechenyi E.A., Nuriev N.K., Yamashev T.A., et al. Brightness control of herbal cellulose at the stage of its bleaching. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2021;24(2):49-55. (In Russian).

11. Podgorbunskikh E.M., Bychkov A.L., Lomovsky O.I., Ryabchikova E.I., Lomovsky O.I. The effect of thermomechanical pretreatment on the structure and properties of lignin-rich plant biomass. *Molecules*. 2020;25(4):995. <https://doi.org/10.3390/molecules25040995>.

12. Kapustyanchik S.Yu. Peculiarities of development and biomass formation of miscanthus in the forest – steppe of the Novosibirsk Ob region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2017;31(12):28-31. (In Russian).

13. Hronich J.E., Martin L., Plawsky J., Bungay H.R. Potential of *Eichhornia crassipes* for biomass refining. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2008;35(5):393-402. (In Russian). <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0333-x>.

14. Procentese A., Raganati F., Olivieri G., Russo M.E., Marzocchella A. Pre-treatment and enzymatic hydrolysis of lettuce residues as feedstock for bio-butanol production. *Biomass and Bioenergy*. 2017;96:172-179. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.11.015>.

15. Abdelhalim T.S., Kamal N.M., Hassan A.B. Nutritional potential of wild sorghum: Grain quality of Sudanese wild sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Food Science and Nutrition*. 2019;7(4):1529-1539. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1002>.

16. Chopda R., Ferreira J.A., Taherzadeh M.J. Biorefining oat husks into high-quality lignin and enzymatically digestible cellulose with acid-catalyzed ethanol organosolv pretreatment. *Processes*. 2020;8(4):435. <https://doi.org/10.3390/pr8040435>.

17. Gismatulina Yu.A. Intermediate flax straw-derived cellulose. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2022;15(3):377-386. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0301>.

18. Kashcheyeva E.I., Gismatulina Y.A., Budaeva V.V. Pretreatments of non-woody cellulosic feedstocks for bacterial cellulose synthesis. *Polymers*. 2019;11(10):1645. <https://doi.org/10.3390/polym11101645>.

19. Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Kortusov A.N., Kashcheyeva E.I., Gladysheva E.K., Mironova G.F., et al. Evaluation of chemical composition of *Miscanthus × giganteus* raised in different climate regions in Russia. *Plants*. 2022;11(20):2791. <https://doi.org/10.3390/plants11202791>.

20. Miller G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chem-*

istry. 1959;31(3):426-428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>.

21. de Souza Araújo D.F., da Silva A.M.R.B., de Andrade Lima L.L., da Silva Vasconcelos M.A., Andrade S.A.C., Sarubbo L.A. The concentration of minerals and physicochemical contaminants in conventional and organic vegetables. *Food Control*. 2014;44:242-248. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.04.005>.

22. Akinwande V.O., Mako A.A., Babayemii O.J. Bio-mass yield, chemical composition and the feed potential of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*, Mart. Solms-Laubach) in Nigeria. *International Journal of Agri-Science*. 2013;3(8):659-666.

23. Kashcheyeva E.I., Gismatulina Yu.A., Mironova G.F., Gladysheva E.K., Budaeva V.V., Skiba E.A., et al. Properties and hydrolysis behavior of celluloses of different origin. *Polymers*. 2022;14:3899. <https://doi.org/10.3390/polym14183899>.

24. Podgorbunskikh E.M., Bychkov A.L., Lomovsky O.I. Determination of surface accessibility of the cellulose substrate according to enzyme sorption.

Polymers. 2019;11(7):1201. <https://doi.org/10.3390/polym11071201>.

25. Höller M., Lunze A., Wever C., Deutschle A.L., Stücker A., Frase N., et al. Meadow hay, *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L. as potential non-wood raw materials for the pulp and paper industry. *Industrial Crops and Products*. 2021;167:113548. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113548>.

26. Gu Y., Guo J., Nawaz A., ul Haq I., Zhou X., Xu Y. Comprehensive investigation of multiples factors in sulfuric acid pretreatment on the enzymatic hydrolysis of waste straw cellulose. *Bioresource Technology*. 2021;340:125740. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125740>.

27. Ha D.T., Kanarsky A.V., Kanarskaya Z.A., Shcherbakov A.V., Shcherbakova E.N., Pranovich A.V. Impact of cultivation conditions on xylanase production and growth in *paenibacillus mucilaginosus*. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(3):459-469. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-459-469>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гладышева Евгения Константиновна,
к.т.н., научный сотрудник лаборатории
био конверсии,
Институт проблем химико-энергетических технологий
СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
evg-gladysheva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6567-9662>

Будаева Вера Владимировна,
к.х.н., доцент, заведующая лабораторией
био конверсии,
Институт проблем химико-энергетических технологий
СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
budaeva@ipcet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1628-0815>

Скиба Екатерина Анатольевна,
к.т.н., доцент, старший научный сотрудник
лаборатории био конверсии,
Институт проблем химико-энергетических технологий
СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
eas08988@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8897-347X>

Кашеева Екатерина Ивановна,
к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории
био конверсии,
Институт проблем химико-энергетических технологий
СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
massl@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1593-7982>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniya K. Gladysheva,
Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
Laboratory of Bioconversion,
Institute for Problems of Chemical and Energetic
Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
evg-gladysheva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6567-9662>

Vera V. Budaeva,
Cand. Sci. (Chemistry), Associated Professor,
Head of the Laboratory of Bioconversion,
Institute for Problems of Chemical and Energetic
Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
budaeva@ipcet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1628-0815>

Ekaterina A. Skiba,
Cand. Sci. (Engineering), Associated Professor, Senior
Researcher,
Laboratory of Bioconversion,
Institute for Problems of Chemical and Energetic
Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
eas08988@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8897-347X>

Ekaterina I. Kashcheeva,
Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher,
Laboratory of Bioconversion,
Institute for Problems of Chemical and Energetic
Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
massl@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1593-7982>

Золотухин Владимир Николаевич,
к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории
био конверсии,
Институт проблем химико-энергетических технологий
СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
ipcet@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9630-6332>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.04.2023.
Одобрена после рецензирования 27.05.2023.
Принята к публикации 30.05.2023.

Vladimir N. Zolotuhin,
Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher,
Laboratory of Bioconversion,
Institute for Problems of Chemical and Energetic
Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
ipcet@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9630-6332>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding
the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 18.04.2023.
Approved after reviewing 27.05.2023.
Accepted for publication 30.05.2023.