

Обзорная статья
УДК 581.6:581.192
DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-3-383-393>



Перспективы химической и биотехнологической переработки мискантуса

Надежда Александровна Шавыркина, Юлия Александровна Гисматулина,
Вера Владимировна Будаева

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

Автор, ответственный за переписку: Шавыркина Надежда Александровна, 32nadina@mail.ru

Аннотация. Переработка растительной биомассы в востребованные и экономически обоснованные продукты на сегодняшний момент является признанным мировым трендом. Среди альтернативных энергетических направлений конверсия биомассы – наиболее прогнозируемый и устойчивый углеродный ресурс, способный заменить ископаемые виды топлива. Уже на сегодняшний момент растительная биомасса обеспечивает почти 25% мирового энергоснабжения. В данном обзоре приведены сведения о наиболее перспективных направлениях химической и биотехнологической переработки биомассы такого энергетического растения, как мискантус. Выбор мискантуса обусловлен его высокой урожайностью (до 40 т/га посевной площади) и высоким выходом энергии (140–560 ГДж/га) по сравнению с другим растительным сырьем. Кроме того, мискантус способен расти на маргинальных землях и не требует особых агрономических мероприятий, при этом в процессе его культивирования происходит обогащение почвы органическими веществами и ее очистка от загрязняющих веществ. В обзоре отражены направления переработки нативной биомассы и биомассы, подвергнутой предварительной обработке. Биомассу мискантуса, помимо переработки в энергоресурсы, можно фракционировать и трансформировать во множество высокоценных продуктов – целлюлозу, нитраты целлюлозы, этилен, гидроксиметилфурфурол, фурфурол, фенолы, этиленгликоль. Варочные растворы после азотнокислой предобработки биомассы мискантуса могут выступать в роли лигногуминовых удобрений. Кроме того, на основе гидролизатов целлюлозы мискантуса можно получать доброкачественные питательные среды для биотехнологической трансформации в бактериальную наноцеллюлозу, для накопления и выделения всевозможных микробных ферментов.

Ключевые слова: мискантус, углеродный след, промышленная переработка, возобновляемые источники энергии, экология мискантуса

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-13-00107, <https://rscf.ru/project/22-13-00107/>.

Для цитирования: Шавыркина Н. А., Гисматулина Ю. А., Будаева В. В. Перспективы химической и биотехнологической переработки мискантуса // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 3. С. 383–393. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-3-383-393>.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Review article

Prospects for chemical and biotechnological processing of miscanthus

Nadezhda A. Shavyrkina, Yuliya A. Gismatulina, Vera V. Budaeva

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russian Federation
Corresponding author: Nadezhda A. Shavyrkina, 32nadina@mail.ru

Abstract. The processing of plant biomass into demanded and economically viable products is currently a recognized global trend. Among alternative energy directions, biomass conversion is the most predictable and sustainable carbon resource that can replace fossil fuels. Already today, plant biomass provides almost 25% of the world's energy supply. This review provides information on the most promising areas of chemical and

© Шавыркина Н. А., Гисматулина Ю. А., Будаева В. В., 2022

biotechnological processing of the biomass of such an energy plant as miscanthus. The choice of miscanthus is due to its high yield (up to 40 t/ha of sown area) and high energy yield (140–560 GJ/ha) compared to other plant materials. In addition, miscanthus is able to grow on marginal lands and does not require special agronomic measures, while in the process of its cultivation, the soil is enriched with organic substances and it is cleaned from pollutants. The review reflects the directions of processing of native biomass and pretreated biomass. Miscanthus biomass, in addition to processing into energy resources, can be fractionated and transformed into many high-value products - cellulose, cellulose nitrates, ethylene, hydroxymethylfurfural, furfural, phenols, ethylene glycol, cooking solutions after nitric acid pretreatment of miscanthus biomass can act as lignohumic fertilizers. In addition, on the basis of miscanthus cellulose hydrolysates, it is possible to obtain benign nutrient media for biotechnological transformation into bacterial nanocellulose, for the accumulation and isolation of various microbial enzymes.

Keywords: *Miscanthus, carbon footprint, industrial processing, renewable energy sources, Miscanthus ecology*

Funding. *The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation no. 22-13-00107, <https://rscf.ru/project/22-13-00107/>.*

For citation: Shavyrkina N. A., Gismatulina Yu. A., Budaeva V. V. Prospects for chemical and biotechnological processing of miscanthus. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(3):383-393. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-3-383-393>.

ВВЕДЕНИЕ

В свете все более усугубляющихся энергетических и экологических проблем в мировом масштабе совершенно очевидным становится тот факт, что решение этих проблем лежит в области поиска альтернативных возобновляемых источников энергии. При этом необходимо двигаться в 2-х направлениях: увеличивать рентабельность энергоресурсов и в то же время снижать энергопотребление, совершенствуя энергосберегающие технологии в различных сферах человеческой деятельности.

Несомненным преимуществом возобновляемых сырьевых ресурсов является возможность их использования не только в качестве биотоплива напрямую путем сжигания или в преобразованном виде, но и возможность их трансформации в различные высокоценные продукты путем фракционирования и дальнейшей модификации [1]. Кроме того, одним из самых важных современных критериев качества энергетических ресурсов является их экологичность, в частности величина углеродного следа при использовании этих ресурсов. Экологические последствия, такие как резкое изменение климата, чрезмерный выброс парниковых газов в атмосферу и повышение цен на топливо за последние несколько лет, являются следствием крайней зависимости от невозобновляемых ресурсов [2]. Общее конечное потребление энергии увеличилось вдвое с 1973 года, достигнув 9425 млн тонн нефтяного эквивалента в 2014 году [3].

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ И НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ СЫРЬЕВЫЕ РЕСУРСЫ

Углекислый газ, выступающий основным компонентом парниковых газов, является естественным конечным продуктом окисления всех органических веществ, т. е. человечество во всех сферах

своей деятельности генерирует его в различных объемах: мы дышим, мы сжигаем топливо, ведем химические и биотехнологические процессы, перерабатываем все возрастающие объемы отходов – во время всех этих процессов выделяется углекислый газ. Таким образом, энергетический углеродный след складывается из следующих составляющих: количество CO_2 , которое выделяется при добыче и использовании топлива, минус количество CO_2 , которое поглощается при формировании этого топлива и возможной переработке отходов.

Невозобновляемые источники энергии (нефть, каменный уголь, газ) сформировались очень давно и не обеспечивают фиксации углекислого газа, только его выделение. Небольшого эффекта сокращения углеродного следа можно достичь переработкой отходов различной полимерной продукции, получаемой из этих невозобновляемых источников. Кроме того, совершенно необходимым условием предотвращения глобальных экологических последствий является сокращение уровня потребления всевозможных товаров и, как следствие, производства огромного количества различных видов полимерной упаковки, для переработки которой природе требуются десятилетия. Вопросы совершенствования упаковочных материалов однозначно должны переместиться в область поиска и разработки технологий производства биоразлагаемых полимеров [4].

Солнечная, гидроэнергия, энергия ветра, биомасса растений относятся к числу возобновляемых источников энергии, которым уделяется наибольшее внимание [2]. Среди этих альтернативных энергетических направлений конверсия биомассы является наиболее прогнозируемым и устойчивым углеродным ресурсом, способным заменить ископаемые виды топлива [5, 6]. Уже на сегодняшний момент растительная биомасса обеспечивает почти 25% мирового энергоснабжения [7, 8].

Интересное исследование проведено в Сербии

[9], произведены расчеты выбросов CO₂ от посадки мискантуса до получения и использования топливных брикетов из его высушенной биомассы: наибольший углеродный след приходится на операцию брикетирования из-за высокого потребления электроэнергии, которая вырабатывается в основном из невозобновляемых источников энергии, при этом результаты исследования показали резкое снижение выбросов CO₂ – до 4000 раз в случае использования возобновляемых источников для производства электроэнергии.

Преимущества биомассы в качестве альтернативного возобновляемого энергоресурса достаточно очевидны: ежегодная воспроизводимость в значительных количествах, низкая стоимость, умеренное количество примесей [10, 11]. Углеродный след при использовании растительного сырья будет складываться из следующих компонентов: +CO₂ (увеличение углеродного следа) – затраты энергоресурсов на посадку и выращивание, сжигание и трансформацию (химическую, биотехнологическую) биомассы; -CO₂ (снижение углеродного следа) – фиксация углекислого газа посредством фотосинтеза при выращивании биомассы, возможность снятия многократного урожая с одной плантации, широкий спектр продуктов, которые можно получить из растительного сырья, возможность повторной переработки полученных материалов без ущерба для окружающей среды. Таким образом, использование возобновляемых растительных сырьевых ресурсов во всех областях человеческой деятельности однозначно будет способствовать снижению углеродного следа.

БИОХИМИЧЕСКИЕ И ВИДОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ КУЛЬТУРЫ *MISCANTHUS*, СПОСОБСТВУЮЩИЕ СНИЖЕНИЮ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА

Практически все растения используют энергию солнечного света для преобразования углекислого газа и воды в кислород и сахара посредством фотосинтеза. Растения поглощают углекислый газ из атмосферы. Большинство растений используют ферментативный путь, который называется фотосинтезом C₃. Некоторые растения способны более активно фиксировать углекислый газ, интенсивность фотосинтеза у них выше. Такой тип преобразования солнечной энергии, называемый фотосинтезом C₄, сопряжен с механизмом, который увеличивает уровень углекислого газа в клетках [12], т. е. растения, реализующие такой путь фотосинтеза, поглощают из окружающей среды больше углекислого газа и способны более существенно снизить его уровень в атмосфере.

Биоэнергетические культуры подразделяются на три основные категории: 1) культуры, содержащие крахмал и сахара, используемые в производстве топливного этанола; 2) масличные культуры, из которых получают биодизельное топливо; 3) лигноцеллюлозные культуры, богатые целлюлозой, гемицеллюлозой лигнином, используемые для выработки тепла, электроэнергии,

биогаза и этанола. Лигноцеллюлозная биомасса является перспективным сырьем для производства биоэтанола [13, 14]. Такие энергетические культуры, как мискантус (*Miscanthus*) – многолетнее травянистое растение с фотосинтетическим путем C₄, сочетают высокую продуктивность и эффективность использования ресурсов с низкими требованиями к агрономическим ресурсам, т. е. они обладают способностью высокоэффективно преобразовывать солнечную энергию в биомассу [15].

Биомасса мискантуса набирает популярность в качестве биоэнергетического сырья во всем мире из-за ее высокой урожайности (до 40 т/га посевной площади) и высокого выхода энергии (140–560 ГДж/га) по сравнению с другим сырьем [16, 17]. Мискантус растет на маргинальных или неиспользуемых землях, привлекает внимание не только как биоинтермедиат, способствующий сокращению выбросов углекислого газа на суше, но и как растительный ресурс, способный обеспечить реальную, масштабируемую и устойчивую альтернативу невозобновляемым ресурсам. При этом мискантус не имеет свойства разрастаться бесконтрольно на всей доступной ему территории, т. е. он не будет вытеснять традиционные для данной местности виды растительности и нарушать биоценозы [18, 19]. Таким образом, использование биомассы мискантуса для энергетических нужд приведет к сокращению углеродного следа в Центральной Европе до 30,6 т CO_{2-экв}/га в год, а в странах с холодным климатом (в том числе и России) эта позитивная тенденция составит порядка 19 т CO_{2-экв}/га в год [20].

Кроме того, мискантус успешно выполняет экологические и средоулучшающие функции: защищает ландшафты от эрозии, способствует накоплению органического вещества в почве, значительно уменьшая эмиссию CO₂ [21]. При произрастании мискантуса происходит обогащение почвы органическими веществами и повышение ее дыхательной активности. Таким образом, выращивание мискантуса позволяет связывать в органическом веществе почвы значимое количество углерода. В работах [22, 23] представлены экспериментальные данные об увеличении гумуса в верхнем слое почвы при выращивании мискантуса и высоком соотношении энергии, содержащейся в наземной биомассе с суммарными затратами технической энергии на возделывание и уборку урожая, что свидетельствует о высокой агрономической, энергетической и экологической эффективности возделывания мискантуса. По оценке авторов [24], выращивание мискантуса приведет к компенсации выбросов парниковых газов до 4,08 т CO_{2-экв} на гектар в год, что благоприятно отразится на мировой экологической обстановке.

Виды *Miscanthus giganteus* и *Miscanthus sinensis* характеризуются высоким уровнем производства биомассы на гектар. Виды *Miscanthus giganteus* и *Miscanthus sacchariflorus*, для которых характерно высокое содержание лигнина, представляются более подходящими для процессов термохимического

преобразования. Напротив, виды *M. sinensis* и *некоторые подвиды M. giganteus* с низким содержанием лигнина представляют интерес для процессов биохимической конверсии. *M. sacchariflorus* из-за его низкой зольности интересен как исходный вариант для селекционных программ, позволяющих получить биомассу различного состава, в зависимости от запроса, и реализовать всевозможные процессы преобразования биоэнергии [25]. *M. sacchariflorus* сорта Сорановский способен накапливать биомассу в краткосрочную вегетативную фазу в суровом континентальном климате Сибири с коротким засушливым летом, он морозоустойчив, устойчив к вредителям и заболеваниям, не нуждается в удобрении плантации во время вегетативной фазы – все это обещывает перспективность мискантуса в качестве легковозобновляемого лигноцеллюлозного сырья для переработки в суровых условиях сибирского климата [13, 26, 27]. Кроме того, проведенные в условиях лесостепи Западной Сибири исследования показывают, что освещенность местности произрастания не оказывает существенного влияния на качественный и количественный состав биомассы *M. sacchariflorus*: число побегов зависит не от экологических условий, а от возраста плантации, растения на полутенистых участках образовывали до 89,34% побегов в сравнении с растениями на освещенных участках, что не оказывало существенного влияния на величину надземной массы и содержание в ней целлюлозы [28].

Уже на сегодняшний день в мировой научной литературе описано множество способов приложения биомассы мискантуса как в качестве биоэнергоресурса, так и в качестве исходного сырья для получения широкого спектра продуктов, при этом предполагается использование либо нативной биомассы, либо подвергнутой предобработке различными способами.

В самом простом варианте мискантус высаживают на очистных сооружениях, вокруг промышленных предприятий и свалок, где они собирают загрязняющие вещества и тем самым делают более эффективным процесс очистки сточных вод, способствуют удалению из почвы загрязняющих веществ, например, тяжелых металлов [29]. В работе [30] приведены данные об эффективной ремедиации почвы, загрязненной нефтью, при выращивании на ней культуры *M. giganteus*. Солома мискантуса отличается хорошей впитывающей способностью, поэтому ее используют в качестве подстилки для сельскохозяйственных животных [31].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИСКАНТУСА В БИОЭНЕРГЕТИКЕ

Если рассматривать энергетическое приложение мискантуса, то наиболее простым способом является производство топливных пеллет из мискантуса. Результаты исследований показывают, что пеллеты из мискантуса оказывают меньшее воздействие на окружающую среду по сравнению с древесными, в основном из-за меньшего потребления энергии во время гранулирования. В част-

ности, 1 т пеллет из мискантуса дает углеродный след 121,6 кг $\text{CO}_2\text{-экв}$, что примерно на 8% ниже по сравнению с древесными пеллетами [32]. Описан способ получения биоугля из мискантуса методом медленного пиролиза с последующей грануляцией [33]. В результате по расчетам общий углеродный след снизился на 737 кг $\text{CO}_2\text{-экв}$ /т высушенного сырья. При этом указывается, что полученный биоуголь, используемый в качестве добавки к почве, может значительно повысить ее характеристики: улучшается здоровье и плодородие, структура почвы, доступность питательных веществ, способность почвы удерживать воду, а также такая обработка способствует длительной сохранности углерода в почве. Связывание углерода в почвах можно рассматривать не только как стратегию смягчения глобального изменения климата, но и как источник прибыли для компаний через применение углеродных квот.

Еще одним перспективным направлением трансформации мискантуса в биотопливо является предварительная предобработка его биомассы с последующим метановым сбраживанием и, соответственно, получением биогаза на выходе [34]. Кроме того, поскольку биомасса мискантуса содержит значительное количество целлюлозы (порядка 50%), после предварительной обработки ее можно гидролизовать до раствора простых сахаров и посредством спиртового брожения получить биоэтанол [14, 35], который может быть использован в качестве энергосилователя либо как прекурсор для дальнейших трансформаций, например, в этилен [36].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОМАССЫ МИСКАНТУСА В СОСТАВЕ КОМПОЗИТОВ

Интересным и перспективным подходом к проблеме энергосбережения является разработка легких и прочных композитов для обеспечения теплоизоляции зданий и сооружений, поскольку значительное количество энергии расходуется на их отопление. Известно, что приблизительно 45% глобальных выбросов парниковых газов вызваны строительством и эксплуатацией зданий. Теплоизоляция зданий в современных условиях изменения климата является хорошо известной стратегией повышения их энергоэффективности. Разработка возобновляемого изоляционного материала может преодолеть недостатки широко используемых изоляционных систем на основе полистирола или минеральной ваты. В исследованиях [37] анализируется устойчивость и теплопроводность новых изоляционных материалов, изготовленных из волокон *M. giganteus*, пенообразователей и связующего вещества, активируемого щелочью. По результатам, опубликованным в последние годы, величина углеродного следа колеблется в широком диапазоне от 300 до 3300 кг $\text{CO}_2\text{-экв}$ /т. Общий углеродный след изоляционной системы на основе волокон мискантуса со свойствами, соответствующими действующим нормам теплоизоляции, достигает до 95% экономии выбросов CO_2 по срав-

нению с обычными системами. В другом исследовании предлагается использовать солому мискантуса в производстве легких бетонных блоков для применения в стеновых конструкциях [38]. Еще одной интересной разработкой является получение саморастущего биокомпозитного строительного изоляционного материала на основе *M. giganteus* и грибного мицелия [39]. Наилучшими свойствами характеризовалась композиция 0,3:1:0,1, состоящая из мицелия гриба *Ganoderma resinaceum*, волокон *M. giganteus* и картофельного крахмала. Установлено, что полученный новый композит обладает сравнительно лучшими свойствами, чем традиционные изоляционные материалы, и удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к применению внутри помещений.

ФРАКЦИОННАЯ ПЕРЕРАБОТКА МИСКАНТУСА

Мискантус относится к целлюлозосодержащим сырьевым ресурсам, поэтому выделенная из него целлюлоза может быть использована для различных приложений. Целлюлозу мискантуса успешно используют в качестве компонента определенных видов бумаги для замены древесной целлюлозы [14, 40]. Наноцеллюлозу, полученную из целлюлозы мискантуса, вводят в состав бумаги для улучшения ее характеристик [41]. Целлюлоза, полученная из мискантуса, может быть использована в качестве прекурсора востребованных нитратов целлюлозы [1, 42].

Широчайшие перспективы представляет ферментативный гидролиз предварительно обработанной биомассы мискантуса для получения сахаросодержащих питательных сред с целью последующей микробной трансформации в высокоценные продукты, такие, например, как бактериальная целлюлоза [27, 43–45], или с целью извлечения из культуральной жидкости различных ферментов [46], в частности разработан способ непрерывной подачи лигноцеллюлозной биомассы, подвергнутой паровому взрыву, для индукции и производства целлюлазы из *Trichoderma reesei* RUT C30. Результаты экспериментов показали, что непрерывное введение лигноцеллюлозных индукторов приводило к более высокой активности продукции целлюлазы, чем периодическая и прерывисто-периодическая подкормка.

Кроме того, существуют исследования, позволяющие оценить не только перспективы использования продуктов ферментативного гидролиза мискантуса, но и варочных растворов, которые образуются после предварительной обработки биомассы: после обработки мискантуса разбавленными растворами азотной кислоты отработанный раствор, нейтрализованный гидратом аммония, применялся в качестве комбинированного лигногуминового удобрения. Была исследована рострегулирующая активность препарата на примере семян гороха посевного: установлено, что в диапазоне степени разведения от 1:100 до 1:10 000 наблюдается повышение энергии прорастания и

всхожести на 2–6% по сравнению с контролем и стимулируется рост корней на 21–29%, т. е. проявляется ауксиноподобное ростстимулирующее действие [47].

Мискантус также может быть вовлечен в различные проекты в рамках концепции глубокой переработки биомассы для получения ценных химических веществ, таких как гидроксиметилфурфурол, фурфурол, фенолы [48], этиленгликоль [49].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сказать, что на сегодняшний день мискантус является одним из наиболее перспективных растительных объектов, который можно использовать в качестве исходного сырья для всевозможных хозяйственных приложений с тенденцией существенного сокращения углеродного следа:

– уже само выращивание данной культуры способно значительно повлиять на экологию местности произрастания – усиленный C_4 механизм фотосинтеза позволяет поглощать из атмосферы более высокие концентрации CO_2 по сравнению с растениями, в которых реализуется C_3 -фотосинтез. Для культивирования мискантуса подойдут бросовые земли, которые непригодны для выращивания других культурных растений. При этом мискантус не требует специальных агротехнических мероприятий, дает высокий урожай, который можно снимать много лет подряд, способствует накоплению органического вещества в почве, значительно уменьшая эмиссию CO_2 . Немаловажным свойством культуры является ее способность восстанавливать загрязненные тяжелыми металлами или нефтяными выбросами почвы;

– реализация потенциала мискантуса в энергетике в различных формах (от сжигания в виде топливных пеллет и биоугля до биотрансформации в биогаз и биоэтанол) приведет к значительному сокращению углеродного следа;

– чрезвычайно широки перспективы использования биомассы мискантуса в составе строительных композитов: полученные составы более легкие с пониженной теплопроводностью, что позволит сократить энергозатраты на отопление зданий и сооружений;

– биомассу мискантуса можно использовать в качестве исходного сырья для получения широкого круга высокоценных веществ: целлюлозы и ее нитратов, бумаги, этилена, гидроксиметилфурфурола, фурфурола, фенолов. Гидролизаты целлюлозной части биомассы мискантуса можно применять в биотехнологиях как основу питательных сред для биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы и всевозможных ферментов.

Таким образом, целенаправленное культивирование и глубокая переработка биомассы мискантуса позволят достичь значительного сокращения углеродного следа, при этом существенно улучшить экологию планеты и снять напряженность в энергетической сфере.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tang R., Xie M. Y., Li M., Cao L., Feng S., Li Z., et al. Nitrocellulose membrane for paper-based biosensor // *Applied Materials Today*. 2022. Vol. 26. P. 101305. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101305>.
2. Gross R., Leach M., Bauen A. Progress in renewable energy // *Environment International*. 2003. Vol. 29, no. 1. P. 105–122. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00130-7).
3. Holmatov B., Hoekstra A. Y., Krol M. S. Land, water and carbon footprints of circular bioenergy production systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 111. P. 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.085>.
4. Vieira I. R. S., de Carvalho A. P. A., Conte-Junior C. A. Recent advances in biobased and biodegradable polymer nanocomposites, nanoparticles, and natural antioxidants for antibacterial and antioxidant food packaging applications // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022. Vol. 21, no. 4. P. 3673–3716. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12990>.
5. Hassain A., Arif S. M., Aslam M. Emerging renewable energy technologies: state of the art // *Renewable and Sustainable Reviews*. 2017. Vol. 71. P. 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.033>.
6. Cintas O., Berndes G., Cowie A. L., Egnell G., Holmström H., Marland G., et al. Carbon balances of bioenergy systems using biomass from forests managed with long rotations: bridging the gap between stand and landscape assessments // *GCB Bioenergy*. 2017. Vol. 9, no. 7. P. 1238–1251. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12425>.
7. Kuna E., Behling R., Valange S., Chatel G., Colmenares J. C. Sonocatalysis: a potential sustainable pathway for the valorization of lignocellulosic biomass and derivatives // *Chemistry and Chemical Technologies in Waste Valorization*. 2017. P. 1–20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90653-9_1.
8. Vanneste J., Ennaert T., Vanhulsel A., Sels B. Unconventional pretreatment of lignocellulose with low-temperature plasma // *ChemSusChem*. 2017. Vol. 10, no. 1. P. 14–31. <https://doi.org/10.1002/cssc.201601381>.
9. Djordjevic L., Peric M., Dzoljic J. Carbon footprint of miscanthus biomass // *KNOWLEDGE-International Journal*. 2021. Vol. 49, no. 3. P. 481–485.
10. Tekin K., Karagöz S., Bektas S. A review of hydrothermal biomass processing // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 40. P. 673–687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.216>.
11. Gunnarsson I. B., Svensson S. E., Johansson E., Karakashev D., Angelidaki I. Potential of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) as a biorefinery crop // *Industrial Crops and Products*. 2014. Vol. 56. P. 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.024>.
12. Blätke M. A., Bräutigam A. Evolution of C₄ photosynthesis predicted by constraint-based modelling // *Elife*. 2019. Vol. 8. P. 49305. <https://doi.org/10.7554/eLife.49305>.
13. Капустянич С. Ю., Якименко В. Н. Мискантус – перспективная сырьевая, энергетическая и фитомелиоративная культура (литературный обзор) // *Почвы и окружающая среда*. 2020. Т. 3. N 3. С. 38–51. <https://doi.org/10.31251/pos.v3i3.126>.
14. Капустянич С. Ю., Якименко В. Н., Гисматулина Ю. А., Будаева В. В. Мискантус – перспективная энергетическая культура для промышленной переработки // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. N 3. С. 66–71. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-3-66-71>.
15. Lobell D. B., Burke M. B., Tebaldi C., Mastandrea M. D., Falcon W. P., Naylor R. L. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030 // *Science*. 2008. Vol. 319, no. 5863. P. 607–610. <https://doi.org/10.1126/science.1152339>.
16. Turner W., Greetham D., Mos M., Squance M., Kam J., Du C. Exploring the bioethanol production potential of Miscanthus Cultivars // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 21. P. 9949. <https://doi.org/10.3390/app11219949>.
17. Chandel H., Kumar P., Chandel A. K., Verma M. L. Biotechnological advances in biomass pretreatment for bio-renewable production through nanotechnological intervention // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2022. P. 1–23. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02746-0>.
18. Heaton E. A., Long S. P., Voigt T. B., Jones M. B., Clifton-Brown J. Miscanthus for renewable energy generation: European union experience and projections for Illinois // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2004. Vol. 9, no. 4. P. 433–451. <https://doi.org/10.1023/B:MITI.0000038848.94134.be>.
19. Heaton E., Voigt T., Long S. P. A quantitative review comparing the yields of two candidate C₄ perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water // *Biomass and Bioenergy*. 2004. Vol. 27, no. 1. P. 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.10.005>.
20. Lewandowski J., Clifton-Brown J., Trindade L. M., vanderLinden G. C., Schwarz K.-U., Müller-Sämann K., et al. Progress on optimizing miscanthus biomass production for the European bioeconomy: results of the EU FP7 project OPTIMISC // *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. P. 1620. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01620>.
21. Анисимов А. А., Хохлов Н. Ф., Тараканов И. Г. Мискантус (*Miscanthus* spp.) в России: возможности и перспективы // *Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования*. 2016. N 12. С. 3–5.
22. Булаткин Г. А., Митенко Г. В., Гурьев И. Д. Энергетическая и экологическая эффективность выращивания растительной биомассы мискантуса китайского в ЦФО России // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. 2015. N 6. С. 39–45.
23. Капустянич С. Ю., Лихенко И. Е., Данилова А. А. Продуктивность мискантуса сорта Сорановский первого года вегетации и дыхательная активность почвы // *Пермский аграрный вестник*. 2016. N 4. С. 82–87.

24. Wang C., Kong Y., Hu R., Zhou G. *Miscanthus*: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production // GCB Bioenergy. 2021. Vol. 13, no. 1. P. 58–69. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12761>.
25. Arnoult S., Brancourt-Hulmel M. A review on *Miscanthus* biomass production and composition for bioenergy use: genotypic and environmental variability and implications for breeding // BioEnergy Research. 2015. Vol. 8, no. 2. P. 502–526. <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9524-7>.
26. Гисматулина Ю. А., Будаева В. В., Сакович Г. В., Васильева О. Ю., Зуева Г. А., Гусар А. С. [и др.]. Особенности ресурсного вида *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Hack. при интродукции в Западной Сибири // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019. Т. 23. N 7. С. 933–940. <https://doi.org/10.18699/VJ19.569>.
27. Капустянчик С. Ю., Поцелуев О. М., Галицын Г. Ю., Лихенко И. Е., Будаева В. В., Гисматулина Ю. А. [и др.]. Эколого-биологическая оценка перспективной технической культуры *Miscanthus sacchariflorus* // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. N 1. С. 42–46. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10108>.
28. Дорогина О. В., Нуждина Н. С., Зуева Г. А., Гисматулина Ю. А., Васильева О. Ю. Особенности побегообразования в популяциях *Miscanthus Sacchariflorus* (Poaceae) под влиянием экологических факторов и паспортизация с помощью ISSR-маркеров // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2022. Т. 26. N 1. P. 22–29. <https://doi.org/10.18699/VJGB-22-04>.
29. Kowalczyk-Juško A., Mazur A., Pochwatka P., Janczak D., Dach J. Evaluation of the effects of using the giant *Miscanthus (Miscanthus giganteus)* biomass in various energy conversion processes // Energies. 2022. Vol. 15, no. 10. P. 3486. <https://doi.org/10.3390/en15103486>.
30. Nebeska D., Trögl J., Ševců A., Špánek R., Marková K., Davis L., et al. *Miscanthus giganteus* role in phytodegradation and changes in bacterial community of soil contaminated by petroleum industry // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021. Vol. 224. P. 112630. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112630>.
31. Wolfzorn J., Harding D., Davis A., Santiago M., Porr C. *Miscanthus* and hemp as alternative bedding material for horses. In: Proceedings of the conference of the National Association of Equine Academics and the symposium of the Society for the Scientific Research of Equine. Asheville, North Carolina, 2019. Vol. 76. P. 97–98. <https://digitalcommons.murraystate.edu/orcagrants/45>.
32. Fusi A., Bacenetti J., Proto A. R., Tedesco D. E., Pessina D., Facchinetti D. Pellet production from *Miscanthus*: energy and environmental assessment // Energies. 2020. Vol. 14, no. 1. P. 73. <https://doi.org/10.3390/en14010073>.
33. Bartocci P., Bidini G., Saputo P., Fantozzi F. Biochar pellet carbon footprint // Chemical Engineering Transactions. 2016. Vol. 50. P. 217–222. <https://doi.org/10.3303/CET1650037>.
34. Thomas H. L., Arnoult S., Brancourt-Hulmel M., Carrère H. Methane production variability according to *Miscanthus* genotype and alkaline pretreatments at high solid content // BioEnergy Research. 2019. Vol. 12, no. 2. P. 325–337. <https://doi.org/10.1007/s12155-018-9957-5>.
35. Скиба Е. А., Миронова Г. Ф. Преимущества совмещения биокаталических стадий в синтезе биоэтанола из целлюлозосодержащего сырья // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. Т. 6. N 4. С. 53–60. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-4-53-60>.
36. Skiba E. A., Ovchinnikova E. V., Budaeva V. V., Banzaraksyaeva S. P., Kovgan M. A., Chumachenko V. A., et al. *Miscanthus* bioprocessing using HNO₃-pretreatment to improve productivity and quality of bioethanol and downstream ethylene // Industrial Crops and Products. 2022. Vol. 177. P. 114448. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114448>.
37. Witzleben S. Minimizing the global warming potential with geopolymer-based insulation material with *Miscanthus* fiber // Polymers. 2022. Vol. 14, no. 15. P. 3191. <https://doi.org/10.3390/polym14153191>.
38. Ntimugura F., Vinai R., Harper A. B., Walker P. Environmental performance of *Miscanthus*-lime lightweight concrete using life cycle assessment: application in external wall assemblies // Sustainable Materials and Technologies. 2021. Vol. 28. P. e00253. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00253>.
39. Dias P. P., Jayasinghe L. B., Waldmann D. Investigation of Mycelium-*Miscanthus* composites as building insulation material // Results in Materials. 2021. Vol. 10. P. 100189. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100189>.
40. Tsalagkas D., Börcsök Z., Pásztor Z., Gogate P., Csóka L. Assessment of the papermaking potential of processed *Miscanthus giganteus* stalks using alkaline pre-treatment and hydrodynamic cavitation for delignification // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 72. P. 105462. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105462>.
41. Barbash V. A., Yashchenko O. V., Vasylieva O. A. Preparation and application of nanocellulose from *Miscanthus giganteus* to improve the quality of paper for bags // SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2, no. 4. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2529-2>.
42. Gismatulina Y. A., Budaeva V. V. Chemical composition of five *Miscanthus sinensis* harvests and nitric-acid cellulose therefrom // Industrial Crops and Products. 2017. Vol. 109. P. 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.026>.
43. Skiba E. A., Gladysheva E. K., Golubev D. S., Budaeva V. V., Aleshina L. A., Sakovich G. V. Self-standardization of quality of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* in nutrient media derived from *Miscanthus* biomass // Carbohydrate Polymers. 2021. Vol. 252. P. 117178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117178>.
44. 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>.

45. Гладышева Е. К., Голубев Д. С., Скиба Е. А. Исследование биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы продуцентом *Medusomyces gisevii* Sa-12 на ферментативном гидролизате продукта щелочной делигнификации мискантуса // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. N 2. С. 260–269. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-2-260-269>.

46. Xiang J., Wang X., Sang T. Cellulase production from *Trichoderma reesei* RUT C30 induced by continuous feeding of steam-exploded *Miscanthus lutarioriparius* // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 160. P. 113129. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113129>.

47. Скиба Е. А., Скиба М. А., Пятунина О. И. Рас-твор азотной кислоты после обработки мисканту-са как регулятор роста гороха посевного (*Pisum sativum* L.) // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 3. С. 413–420. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-413-420>.

48. Götz M., Rudi A., Heck R., Schultmann F., Kruse A. Processing Miscanthus to high-value chemicals: a techno-economic analysis based on process simulation // GCB Bioenergy. 2022. Vol. 14, no. 4. P. 447–462. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12923>.

49. Pang J., Zheng M., Wang A., Sun R., Wang H., Jiang Y., et al. Catalytic conversion of concentrated miscanthus in water for ethylene glycol production // AIChE Journal. 2014. Vol. 60, no. 6. P. 2254–2262. <https://doi.org/10.1002/aic.14406>.

REFERENCES

1. Tang R., Xie M. Y., Li M., Cao L., Feng S., Li Z., et al. Nitrocellulose membrane for paper-based bio-sensor. *Applied Materials Today*. 2022;26:101305. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101305>.

2. Gross R., Leach M., Bauen A. Progress in renewable energy. *Environment International*. 2003;29(1):105-122. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00130-7).

3. Holmatov B., Hoekstra A. Y., Krol M. S. Land, water and carbon footprints of circular bioenergy production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;111:224-235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.085>.

4. Vieira I. R. S., de Carvalho A. P. A., Conte-Junior C. A. Recent advances in biobased and biodegradable polymer nanocomposites, nanoparticles, and natural antioxidants for antibacterial and anti-oxidant food packaging applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022;21(4):3673-3716. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12990>.

5. Hassain A., Arif S. M., Aslam M. Emerging renewable energy technologies: state of the art. *Renewable and Sustainable Reviews*. 2017;71:12-28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.033>.

6. Cintas O., Berndes G., Cowie A. L., Egnell G., Holmström H., Marland G., et al. Carbon balances of bioenergy systems using biomass from forests managed with long rotations: bridging the gap between stand and landscape assessments. *GCB Bioenergy*. 2017;9(7):1238-1251. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12425>.

7. Kuna E., Behling R., Valange S., Chatel G., Colmenares J. C. Sonocatalysis: a potential sustainable pathway for the valorization of lignocellulosic biomass and derivatives. *Chemistry and Chemical Technologies in Waste Valorization*. 2017;1-20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90653-9_1.

8. Vanneste J., Ennaert T., Vanhulsel A., Sels B. Unconventional pretreatment of lignocellulose with low-temperature plasma. *ChemSusChem*. 2017;10(1):14-31. <https://doi.org/10.1002/cssc.201601381>.

9. Djordjevic L., Peric M., Dzoljic J. Carbon foot-

print of miscanthus biomass. *KNOWLEDGE-International Journal*. 2021;49(3):481-485.

10. Tekin K., Karagöz S., Bektas S. A review of hydrothermal biomass processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;40:673-687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.216>.

11. Gunnarsson I. B., Svensson S. E., Johansson E., Karakashev D., Angelidaki I. Potential of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) as a biorefinery crop. *Industrial Crops and Products*. 2014;56:231-240. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.024>.

12. Blätke M. A., Bräutigam A. Evolution of C₄ photosynthesis predicted by constraint-based modelling. *Elife*. 2019;8:49305. <https://doi.org/10.7554/eLife.49305>.

13. Kapustyanchik S. Yu., Yakimenko V. N. Miscanthus is a promising raw material, energy and phytomeliorative crop (literature review). *Pochvy i okruzhayushchaya sreda = Soils and Environment*. 2020;3(3):38-51. (In Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v3i3.126>.

14. Kapustyanchik S. Yu., Yakimenko V. N., Gismatulina Yu. A., Budaeva V. V. Miscanthus is a promising energy crop for industrial processing. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2021;25(3):66-71. (In Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-3-66-71>.

15. Lobell D. B., Burke M. B., Tebaldi C., Mas-trandrea M. D., Falcon W. P., Naylor R. L. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*. 2008;319(5863):607-610. <https://doi.org/10.1126/science.1152339>.

16. Turner W., Greetham D., Mos M., Squance M., Kam J., Du C. Exploring the bioethanol production potential of Miscanthus Cultivars. *Applied Sciences*. 2021;11(21):9949. <https://doi.org/10.3390/app11219949>.

17. Chandel H., Kumar P., Chandel A. K., Verma M. L. Biotechnological advances in biomass pretreatment for bio-renewable production through nanotechnological intervention. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2022;1-23. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02746-0>.

18. Heaton E. A., Long S. P., Voigt T. B., Jones M. B., Clifton-Brown J. Miscanthus for renewable energy generation: European union experience and projections for Illinois. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2004;9(4):433-451. <https://doi.org/10.1023/B:MITI.0000038848.94134.be>.
19. Heaton E., Voigt T., Long S. P. A quantitative review comparing the yields of two candidate C₄ perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water. *Biomass and Bioenergy*. 2004;27(1):21-30. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.10.005>.
20. Lewandowski L., Clifton-Brown J., Trindade L. M., van der Linden G. C., Schwarz K.-U., Müller-Sämann K., et al. Progress on optimizing miscanthus biomass production for the European bioeconomy: results of the EU FP7 project OPTIMISC. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1620. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01620>.
21. Anisimov A. A., Hohlov N. F., Tarakanov I. G. Miscanthus (*Miscanthus* spp.) in Russia: opportunities and prospects. *Novye i netradicionnye rasteniya i perspektivy ih ispol'zovaniya*. 2016;(12):3-5. (In Russian).
22. Bulatkin G. A., Mitenko G. V., Gur'ev I. D. Energy and ecological efficiency of growing plant biomass of chinese Miscanthus in the Central Federal District of Russia. *Ispol'zovanie i ohrana prirodnih resursov v Rossii*. 2015;(6):39-45. (In Russian).
23. Kapustyanchik S. Yu., Lihenko I. E., Danilova A. A. Productivity of Miscanthus cultivar Soranovsky in the first year of vegetation and soil respiration activity. *Permskiy agrarniy vestnik = Perm Agrarian Journal*. 2016;(4):82-87. (In Russian).
24. Wang C., Kong Y., Hu R., Zhou G. *Miscanthus*: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production. *GCB Bioenergy*. 2021;13(1):58-69. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12761>.
25. Arnoult S., Brancourt-Hulmel M. A review on Miscanthus biomass production and composition for bioenergy use: genotypic and environmental variability and implications for breeding. *BioEnergy Research*. 2015;8(2):502-526. <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9524-7>.
26. Gismatulina Yu. A., Budaeva V. V., Sakovich G. V., Vasil'eva O. Yu., Zueva G. A., Gusar A. S., et al. Features of the resource species *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Hack. when introduced in Western Siberia. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selekcii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(7):933-940. (In Russian). <https://doi.org/10.18699/VJ19.569>.
27. Kapustyanchik S. Yu., Pocoluev O. M., Galicyng G. Yu., Lihenko I. E., Budaeva V. V., Gismatulina Yu. A., et al. Ecological and biological assessment of a promising industrial crop *Miscanthus sacchariflorus*. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*. 2020;34(1):42-46. (In Russian). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10108>.
28. Dorogina O. V., Nuzhdina N. S., Zueva G. A., Gismatulina Yu. A., Vasil'eva O. Yu. Features of shoot formation in populations of *Miscanthus Sacchariflorus* (Poaceae) under the influence of environmental factors and certification using ISSR markers. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selekcii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(1):22-29. (In Russian). <https://doi.org/10.18699/VJGB-22-04>.
29. Kowalczyk-Juško A., Mazur A., Pochwatka P., Janczak D., Dach J. Evaluation of the effects of using the giant Miscanthus (*Miscanthus giganteus*) biomass in various energy conversion processes. *Energies*. 2022;15(10):3486. <https://doi.org/10.3390/en15103486>.
30. Nebeska D., Trögl J., Ševců A., Špánek R., Marková K., Davis L., et al. *Miscanthus giganteus* role in phytodegradation and changes in bacterial community of soil contaminated by petroleum industry. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;224:112630. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112630>.
31. Wolfzorn J., Harding D., Davis A., Santiago M., Porr C. Miscanthus and hemp as alternative bedding material for horses. In: *Proceedings of the conference of the National Association of Equine Academics and the symposium of the Society for the Scientific Research of Equine*. Asheville, North Carolina; 2019, vol. 76, p. 97-98. <https://digitalcommons.murraystate.edu/orcagrants/45>.
32. Fusi A., Bacenetti J., Proto A. R., Tedesco D. E., Pessina D., Facchinetti D. Pellet production from Miscanthus: energy and environmental assessment. *Energies*. 2020;14(1):73. <https://doi.org/10.3390/en14010073>.
33. Bartocci P., Bidini G., Saputo P., Fantozzi F. Biochar pellet carbon footprint. *Chemical Engineering Transactions*. 2016;50:217-222. <https://doi.org/10.3303/CET1650037>.
34. Thomas H. L., Arnoult S., Brancourt-Hulmel M., Carrère H. Methane production variability according to miscanthus genotype and alkaline pretreatments at high solid content. *BioEnergy Research*. 2019;12(2):325-337. <https://doi.org/10.1007/s12155-018-9957-5>.
35. Skiba E. A., Mironova G. F. Advantages of combining biocatalytic stages in the synthesis of bioethanol from cellulose-containing raw materials. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2016;6(4):53-60. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-4-53-60>.
36. Skiba E. A., Ovchinnikova E. V., Budaeva V. V., Banzaraksaeva S. P., Kovgan M. A., Chumachenko V. A., et al. Miscanthus bioprocessing using HNO₃-pretreatment to improve productivity and quality of bioethanol and downstream ethylene. *Industrial Crops and Products*. 2022;177:114448. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114448>.
37. Witzleben S. Minimizing the global warming potential with geopolymer-based insulation material with Miscanthus fiber. *Polymers*. 2022;14(15):3191. <https://doi.org/10.3390/polym14153191>.
38. Ntimugura F., Vinai R., Harper A. B., Walker P. Environmental performance of miscanthus-lime lightweight concrete using life cycle assessment: application in external wall assemblies. *Sustainable Materials and Technologies*. 2021;28:e00253. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00253>.

39. Dias P. P., Jayasinghe L. B., Waldmann D. Investigation of Mycelium-Miscanthus composites as building insulation material. *Results in Materials*. 2021;10:100189. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100189>.
40. Tsalagkas D., Börcsök Z., Pásztor Z., Gógate P., Csóka L. Assessment of the papermaking potential of processed *Miscanthus giganteus* stalks using alkaline pre-treatment and hydrodynamic cavitation for delignification. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;72:105462. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105462>.
41. Barbash V. A., Yashchenko O. V., Vasylieva O. A. Preparation and application of nanocellulose from *Miscanthus giganteus* to improve the quality of paper for bags. *SN Applied Sciences*. 2020;2(4):1-12. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2529-2>.
42. Gismatulina Y. A., Budaeva V. V. Chemical composition of five *Miscanthus sinensis* harvests and nitric-acid cellulose therefrom. *Industrial Crops and Products*. 2017;109:227-232. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.026>.
43. Skiba E. A., Gladysheva E. K., Golubev D. S., Budaeva V. V., Aleshina L. A., Sakovich G. V. Self-standardization of quality of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* in nutrient media derived from Miscanthus biomass. *Carbohydrate Polymers*. 2021;252:117178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117178>.
44. 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>.
45. Gladysheva E. K., Golubev D. S., Skiba E. A. Investigation of bacterial nanocellulose biosynthesis by *Medusomyces gisevii* Sa-12 from enzymatic hydrolyzate obtained by alkaline delignification of miscanthus. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2019;9(2):260-269. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-2-260-269>.
46. Xiang J., Wang X., Sang T. Cellulase production from *Trichoderma reesei* RUT C30 induced by continuous feeding of steam-exploded *Miscanthus lutarioriparius*. *Industrial Crops and Products*. 2021;160:113129. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113129>.
47. Skiba E. A., Skiba M. A., Pyatunina O. I. Nitric acid solution after treating miscanthus as a growth regulator of seed peas (*Pisum sativum* L.). *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(3):413-420. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-413-420>.
48. Götz M., Rudi A., Heck R., Schultmann F., Kruse A. Processing Miscanthus to high-value chemicals: a techno-economic analysis based on process simulation. *GCB Bioenergy*. 2022;14(4):447-462. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12923>.
49. Pang J., Zheng M., Wang A., Sun R., Wang H., Jiang Y., et al. Catalytic conversion of concentrated miscanthus in water for ethylene glycol production. *AIChE Journal*. 2014;60(6):2254-2262. <https://doi.org/10.1002/aic.14406>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Н. А. Шавыркина,
к.т.н., доцент, старший научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
32nadina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5572-1476>

Ю. А. Гисматулина,
к.т.н., старший научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
julja.gismatulina@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5480-7449>

В. В. Будаева,
к.х.н., доцент, ведущий научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda A. Shavyrkina,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Senior Researcher,
Institute for Problems of Chemical and Energetic
Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., 659322, Biysk,
Russian Federation,
32nadina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5572-1476>

Yuliya A. Gismatulina,
Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher,
Institute for Problems of Chemical and Energetic
Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., 659322, Biysk,
Russian Federation,
julja.gismatulina@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5480-7449>

Vera V. Budaeva,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Leading Researcher,
Institute for Problems of Chemical and Energetic

659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
budaeva@ipcet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1628-0815>

Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., 659322, Biysk,
Russian Federation,
budaeva@ipcet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1628-0815>

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 15.06.2022.
Одобрена после рецензирования 14.09.2022.
Принята к публикации 15.09.2022.*

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 15.06.2022.
Approved after reviewing 14.09.2022.
Accepted for publication 15.09.2022.*