

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 661.722
EDN: OCWINK
DOI: 10.21285/achb.1009



Летучие примеси биоэтанола-сырца из мискантуса гигантского

Е.А. Скиба[✉], Г.Ф. Миронова

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

Аннотация. Вопрос изучения летучих примесей биоэтанола-сырца имеет важное техническое значение для дальнейших катализитических превращений биоэтанола в продукты технической химии и товароведческое значение для предотвращения фальсификации пищевого спирта. В работе впервые исследованы летучие примеси биоэтанола-сырца, полученного из мискантуса гигантского с помощью авторских методов предобработки. Использованы три авторских метода, основанные на воздействии на сырье разбавленными растворами азотной кислоты при атмосферном давлении. В качестве арбитражного метода использован классический способ предобработки целлюлозосодержащего недревесного сырья – щелочная делигнификация с помощью гидроксида натрия. Полученные субстраты подвергались ферментативному гидролизу (препараты «Целлолюкс-А» и «Ультрафло Коре»), совмещенному со спиртовым брожением (продуцент *Saccharomyces cerevisiae* Y-3136). Компонентный состав биоэтанола-сырца определен с помощью метода газожидкостной хроматографии. Примененная методология получения биоэтанола позволила получить биоэтанол-сырец с содержанием метанола не более 0,009 об.%, что в 10 раз ниже регламентируемых отраслевых норм. На чистоту образцов биоэтанола-сырца влияют два параметра: во-первых, стадийность предобработки (двустадийная предобработка позволяет в 4–21 раз снизить общее количество примесей в биоэтаноле-сырце по сравнению с одностадийной предобработкой), во-вторых, конкретный способ одностадийной предобработки (так, предобработка с помощью азотной кислоты позволяет получить в 5 раз более чистый биоэтанол-сырец, чем классическая щелочная делигнификация).

Ключевые слова: биоэтанол, мискантус гигантский, летучие примеси, азотная кислота

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-00107-П, <https://rscf.ru/project/22-13-00107/>.

Для цитирования: Скиба Е.А., Миронова Г.Ф. Летучие примеси биоэтанола-сырца из мискантуса гигантского // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. № 4. С. 590–596. DOI: 10.21285/achb.1009. EDN: OCWINK.

BRIEF COMMUNICATION

Volatile impurities in crude bioethanol produced from giant miscanthus

Ekaterina A. Skiba[✉], Galina F. Mironova

*Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russian Federation*

Abstract. The study of volatile impurities in crude bioethanol is of great technical importance for further catalytic conversion of bioethanol to industrial chemicals, as well as of considerable significance in the prevention of potable alcohol adulteration. This study was the first to analyze volatile impurities in crude bioethanol obtained from giant miscanthus using three proprietary pretreatment methods. These methods are based on treating raw materials with dilute nitric acid solutions at atmospheric pressure. The classical method for the pretreatment of cellulose-containing non-wood raw materials – alkaline delignification with sodium hydroxide – was used as

the reference method. The resulting substrates were subjected to enzymatic hydrolysis (using Cellolux-A and Ultraflo Core preparations) together with alcoholic fermentation (using *Saccharomyces cerevisiae* Y-3136). The composition of crude bioethanol was determined using gas-liquid chromatography. The methodology used to produce bioethanol provided a means to obtain crude bioethanol with a methanol content of no more than 0.009 vol%, which is ten times lower than that regulated by industry codes. The purity of crude bioethanol samples is determined by two parameters: first, the number of pretreatment stages (two-stage pretreatment reduces the total amount of impurities in crude bioethanol by 4–21 times compared to single-stage pretreatment); second, a specific method of single-stage pretreatment (for example, pretreatment with nitric acid yields crude bioethanol with five times higher purity than in the case of the classical alkaline delignification).

Keywords: bioethanol, giant miscanthus, volatile impurities, nitric acid

Funding. The Russian Science Foundation supported the research (grant no. 22-13-00107-P, <https://rscof.ru/project/22-13-00107/>).

For citation: Skiba E.A., Mironova G.F. Volatile impurities in crude bioethanol produced from giant miscanthus. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2025;15(4):590–596. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1009. EDN: OCWINK.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время продолжается развитие технологий биоэтанола всех четырех поколений и можно говорить о новом витке востребованности биоэтанола. У каждого поколения есть критические проблемы, преодоление которых позволит достичь прорывных результатов и обеспечить мировую биоэкономику базовым продуктом – биоэтанолом [1, 2]. Биоэтанол второго поколения получают из целлюлозосодержащего сырья, то есть сырья с бесконечным потенциалом воспроизведения, поэтому это привлекательная и устойчивая технология [2].

В данной работе в качестве модельного целлюлозосодержащего сырья использована многолетняя культура мискантус гигантский (*Miscanthus × giganteus*). Это хорошо зарекомендовавшее себя для получения биоэтанола сырье с высоким содержанием целлюлозы [3–5]. Интродукция растения очень широка и включает регионы с климатом от тропического до умеренного [6]. Россия – самая северная страна, в которой выращивается мискантус гигантский [7], поэтому представленное исследование имеет не только региональное, но и общемировое значение.

При промышленном производстве важное значение имеет не только выход биоэтанола-сырца, но и его качество, то есть состав и содержание летучих примесей. Известно, что по качеству этанола специалисты могут определить его сырьевое происхождение, особенности технологии его получения или нарушения технологии [8–10]. В советский период качественному составу технического спирта уделялось большое внимание, что позволяло осуществлять жесткий контроль и получать продукцию постоянного качества, а также исключало использование технического спирта для фальсификации пищевых продуктов¹. В современной мировой литературе вопрос качества биоэтанола второго поколения (или технического спирта) обсуждается незаслуженно редко [11], вместе с тем этот вопрос имеет важное техническое значение для дальнейших каталитических превращений биоэтанола в продукты технической химии [12]. Имеются данные о влияние качества биоэтанола-сырца на паровой риформинг при его превращении в водород [13–15]. Получены прорывные результаты в технологии биоэтилена, а именно установлено, что общее содержание примесей

около 1% в биоэтаноле-сырце приводит к повышению выхода и улучшению качества биоэтилена, что позволяет использовать биоэтанол-сырец без очистки и ведет к повышению экономичности и экологичности процесса в целом [16]. Имеется и парадоксальная парадигма, когда оптимизация процесса направлена на получение биоэтанола с высоким содержанием летучих примесей [17].

Целью представленной работы являлось исследование летучих примесей биоэтанола-сырца, полученного из мискантуса гигантского с помощью авторских методов предобработки. Использованы три авторских метода, основанные на воздействии на сырье при атмосферном давлении разбавленными растворами азотной кислоты. В качестве арбитражного метода для сравнения результатов использован классический способ предобработки целлюлозосодержащего недревесного сырья – щелочная делигнификация с помощью гидроксида натрия [18, 19].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе впервые мискантус гигантский российской селекции (сорт КАМИС) использован как сырье для биотехнологической трансформации в биоэтанол. Мискантус с плантации возрастом 7 лет (д. Марушкино, Московская обл., Россия) любезно предоставлен ООО «Мастер Брэнд».

Предобработка сырья проводилась в лабораторных условиях при атмосферном давлении и температуре 90–96 °C авторскими способами в одну или две стадии с получением следующих продуктов химической предварительной обработки: 1) субстрат 1 получен в одну стадию обработкой мискантуса 4%-м раствором азотной кислоты; 2) субстрат 2 получен в одну стадию обработкой мискантуса раствором 4%-го гидроксида натрия; 3) субстрат 3 получен в две стадии путем обработки субстрата 14%-м раствором гидроксида натрия; 4) субстрат 4 получен в две стадии путем обработки субстрата 24%-м раствором азотной кислоты. Субстраты тщательно промывались водой.

Ферментативный гидролиз субстратов проводился с помощью композиции из ферментных препаратов «Целлолюкс-А» («Сиббиофарм», Россия, 0,1 г/г субстрата) и «Ультрафло Коре» («Novozymes A/S», Дания, 0,3 мл/г субстрата), начальная концентрация субстратов составляла 60 г/л, температура – (46±2) °C, скорость

¹Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств: учебник для вузов. М.: Лесная промышленность, 1989. 495 с.

перемешивания – 150 об/мин [20]. Через 24 ч температура опускалась до 28 °C, вносились 10 масс.% инокулята дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-3136 (Коллекция микроорганизмов для спиртовой, уксусной, ферментной и дрожжевой промышленности, руководитель В.А. Поляков, куратор коллекции Л.В. Римарева, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, г. Москва, Россия [21]) и проводились одновременные ферментативный гидролиз и спиртовое брожение в течение еще 72 ч. Процесс осуществлялся в колбах Эrlenmeyера объемом 2 л, установленных в шейкере-инкубаторе Unimax-1010 (Heidolph, США).

Концентрация биоэтанола в бражках устанавливалась ареометрически после процедуры прямого отгона. Компонентный состав биоэтанола-сырца определялся с помощью метода газожидкостной хроматографии [22]. Были использованы газовый хроматограф с пламенно-ионизационным детектором «Кристалл 2000М» (ЗАО «СКБ Хроматэк», Россия), а также колонка газохроматографическая капиллярная ZB-FFAP (Phenomenex, США).

Работа выполнена с использованием приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (г. Бийск, Россия).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Составы примесей в образцах биоэтанола-сырца сильно зависят от способа предобработки мискантуса гигантского (таблица).

В биоэтаноле-сырце из субстрата 1 основными примесями являются сивушные масла (изобутанол – 791 мг/дм³ > изоамилол – 285 мг/дм³ > 1-пропанол – 156 мг/дм³), основной примесью является также ацетальдегид – 510 мг/дм³. Общее содержание примесей составляет 1,34 масс.%.

Среди всех образцов биоэтанол-сырец из субстрата 2 характеризуется наибольшим количеством примесей. В образце много не только сивушных масел (1-пропанол – 1170 мг/дм³ > изоамилол – 983 мг/дм³ > изобу-

танол – 806 мг/дм³), но и ацетальдегида – 8850 мг/дм³, а также сложных эфиров (этилацетат – 2654 мг/дм³ > метилацетат – 728 мг/дм³). Общее содержание примесей составляет 6,43 масс.%, что в 5 раз больше, чем в биоэтаноле-сырце из субстрата 1.

Двустадийная предобработка, примененная при получении субстратов 3 и 4, позволила получить гораздо более чистые образцы биоэтанола-сырца, чем при одностадийной химической обработке. Так, содержание сивушных масел снизилось в 10 и 8 раз, содержание ацетальдегида – в 56 и 25 раз, содержание сложных эфиров – в 1990 раз и 1692 раза, общее содержание примесей – в 21 и 18 раз соответственно по сравнению с биоэтанолом-сырцом из субстрата 2, полученным классическим методом. Самый чистый биоэтанол-сырец получен из субстрата 3 (общее содержание примесей составляет всего 0,3%), и именно этот субстрат характеризовался максимальным удалением нецеллюлозных примесей [20].

Подытожив вышеупомянутое, можно сказать, что на чистоту образцов биоэтанола-сырца влияют два параметра. Во-первых, важна стадийность предобработки: двустадийная предобработка позволяет в 4–21 раз снизить общее количество примесей в биоэтаноле-сырце по сравнению с одностадийной предобработкой. Во-вторых, существенное значение имеет конкретный способ одностадийной предобработки: так, предобработка с помощью азотной кислоты позволяет получить в 5 раз более чистый биоэтанол-сырец, чем классическая щелочная делигнификация.

Вопрос количества и состава примесей в биоэтаноле-сырце редко обсуждается в литературе. С одной стороны, это вполне объяснимо, так как современные методы очистки позволяют легко освободить биоэтанол от сопутствующих примесей [23], а отделенные примеси находят самостоятельное широкое применение в химической промышленности [24]. С другой стороны, фундаментальный вопрос примесей в биоэтаноле-сырце необходим для ответа на вопрос о выборе технологии предварительной химической обработки. Количество и

Состав летучих примесей в образцах биоэтанола-сырца из мискантуса гигантского

Composition of volatile impurities in samples of raw bioethanol from *Miscanthus × giganteus*

| Образец | Показатель (в пересчете на безводный спирт) | | | |
|---|--|--|---|---------------------------|
| | Массовая концентрация альдегидов, мг/дм ³ | Массовая концентрация эфиров, мг/дм ³ | Массовая концентрация сивушного масла, мг/дм ³ | Содержание метанола, об.% |
| Опытные образцы из мискантуса гигантского, предварительно обработанного | | | | |
| одностадийно азотной кислотой | 550 | 40 | 1310 | 0,004 |
| одностадийно гидроксидом натрия | 8850 | 3400 | 3050 | 0,009 |
| двустадийно азотной кислотой и гидроксидом натрия | 160 | 10 | 300 | 0,001 |
| двустадийно гидроксидом натрия и азотной кислотой | 360 | 10 | 360 | 0,002 |
| Спирт этиловый технический ² | | | | |
| Марка А ОКП 91 8213 1100 | менее 200 | менее 80 | менее 500 | менее 0,1 |
| Марка Б ОКП 91 8213 1200 | менее 350 | менее 180 | менее 1000 | менее 0,1 |

²ГОСТ 17299-78. Спирт этиловый технический. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2006. 6 с.

состав примесей в биоэтаноле-сырце позволяют выявить нарушения в технологическом цикле и неблагоприятные условия для жизнедеятельности дрожжей [11, 13]. В нашем случае использование субстрата 2 привело к получению биологически недоброкачественной питательной среды и биоэтанола с высоким содержанием летучих примесей.

Обращает на себя внимание факт того, что в полученных в работе образцах биоэтанола-сырца отмечается крайне низкое содержание метанола: от 0,001 масс.% в самом чистом образце из субстрата 3 до 0,009 масс.% в образце из субстрата 2, полученном методом щелочной делигнификации. Это обусловлено использованием непищевого недревесного сырья, так как метанол образуется либо из пектиновых веществ пищевого сырья [8, 9], либо из глюкуроноксилана и арабиноглюкуроноксилана древесного сырья лиственных пород. Кроме того, метанол может образовываться из лигнина в жестких технологических режимах [13]. В нашем случае применены мягкие режимы предобработки при атмосферном давлении. Возможно, получение небольшого количества метанола из субстрата 2 обусловлено именно использованием щелочной делигнификации. В субстрате 1 лигнин подвергается окислительному нитрованию, поэтому метанол в образце из субстрата 1 практически отсутствует. Субстраты 3 и 4 очень чистые, поэтому образование метанола крайне низкое. Содержание метанола в представленных опытных образцах в тысячи раз меньше, чем в описанных в обзоре [11], и на порядок меньше, чем нормируется для спирта этилового технического².

Одним из важных маркеров качества биоэтанола является содержание сивушных спиртов (основные из них – 1-пропанол, 2-метил-1-пропанол и 3-метил-1-бутанол). В работе [15] содержание сивушных спиртов в образцах биоэтанола-сырца, полученных из целлюлозного остатка сахарного тростника, варьировало от 223 до 547 мг/дм³, что хорошо согласуется с результатами нашей работы для субстрата 1. При этом авторы делают вывод о приоритетности использования азотной кислоты в оптимальных условиях предобработки по сравнению с гидротермальной предобработкой. В работе [14] показано, что содержание биоэтанола и сивушных спиртов находится в прямо пропорциональной зависимости, но с применением метода проектирования Бокса – Бенкена удалось найти оптимальные режимы, позволившие снизить содержание примесей в биоэтаноле.

В данной работе не были обнаружены специфические примеси биоэтанола, которые позволили бы идентифицировать образцы как полученные именно из мискантуса.

В биоэтаноле-сырце из субстрата 1 общее содержание примесей в 5 раз меньше, чем в биоэтаноле-сырце из субстрата 2. Этот факт хорошо согласуется с данными работы [25], в которой при получении биоэтанола из шелухи овса наблюдалась аналогичная зависимость: общее количество примесей составило 0,49 масс.% при

обработке азотной кислотой и 3,66 масс.% при обработке методом щелочной делигнификации. Повышение количества примесей в образцах биоэтанола-сырца из мискантуса гигантского свидетельствует о наличии ингибиторов в самом мискантусе, что объясняется природой этого быстрорастущего вида сырья и хорошо описано в литературе [26, 27]. В то же время, как было показано в работе [16], наличие в биоэтаноле СЗ-примесей в количестве до 0,05 мол.% не только не снижает, но, наоборот, повышает выход биоэтилена из биоэтанола при использовании в качестве катализатора оксида алюминия. Таким образом, все образцы биоэтанола-сырца, полученные в результате двустадийной предобработки мискантуса, могут успешно использоваться для катализической дегидратации в биоэтилен.

Сравним показатели полученных образцов биоэтанола-сырца с требованиями ГОСТ 17299-78³ на спирт этиловый технический. Одностадийная предобработка мискантуса привела к получению образцов с высоким содержанием примесей, двустадийная предобработка позволила получить образцы биоэтанола-сырца, соответствующие по основным показателям спирту этиловому техническому марки Б. Эти опыты должны быть повторены в условиях опытно-промышленного производства. Если эффект будет многократно воспроизведен, то биоэтанол по данной технологии может производиться без ректификации, что приведет к серьезной экономии капитальных вложений и энергоресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Образцы биоэтанола-сырца, полученные из мискантуса гигантского через технологические стадии предварительной химической обработки, ферментативного гидролиза, спиртового брожения с помощью продуцента *Saccharomyces cerevisiae* Y-3136 и прямого отгона, характеризуются крайне низким содержанием метанола – не более 0,009%, что не характерно для технического биоэтанола и объясняется мягкими условиями получения полупродуктов.

Метод предварительной химической обработки мискантуса гигантского определяет состав и содержание летучих примесей в образцах биоэтанола-сырца. Наибольшее содержание летучих примесей зафиксировано в образце биоэтанола-сырца, полученного при использовании классической предварительной обработки с помощью гидроксида натрия: массовая концентрация альдегидов составляет 8850 мг/дм³, эфиров – 3400 мг/дм³, сивушных масел – 3050 мг/дм³. Авторские методы, основанные на воздействии на сырье разбавленными растворами азотной кислоты при атмосферном давлении, позволяют получить более чистый биоэтанол-сырец. При использовании двустадийных методов общее содержание примесей сокращается в 21 раз, а при использовании одностадийного метода предварительной обработки азотной кислотой – в 5 раз по сравнению с одностадийной обработкой гидроксидом натрия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1.** Kazmi A., Sultana T., Ali A., Nijabat A., Li G., Hou H. Innovations in bioethanol production: a comprehensive review of feedstock generations and technology advances //

Energy Strategy Reviews. 2025. Vol. 57. 101634.
DOI: 10.1016/j.esr.2024.101634.

- 2.** Jain S., Kumar S. A comprehensive review of bioethanol

³ГОСТ 17299-78. Спирт этиловый технический. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2006. 6 с.

production from diverse feedstocks: current advancements and economic perspectives // Energy. 2024. Vol. 296. P. 131130. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131130.

3. Zhang Y., Oates L.G., Serate J., Xie D., Pohlmann E., Bukhman Y.V., et al. Diverse lignocellulosic feedstocks can achieve high field-scale ethanol yields while providing flexibility for the biorefinery and landscape-level environmental benefits // GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy. 2018. Vol. 10, no. 11. P. 825–840. DOI: 10.1111/gcbb.12533.

4. 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. DOI: 10.3390/app11219949.

5. Osipov D.O., Dotsenko A.S., Semenova M.V., Rozhkova A.M., Sintysyn A.P. Comparative study of the convertibility of pretreated *Miscanthus* straw using enzyme preparations produced by different recombinant strains of *Penicillium verruculosum* // Agronomy. 2024. Vol. 14, no. 3. P. 499. DOI: 10.3390/agronomy14030499.

6. Zhang Z., Xu J., Jin S., Zhuang H., Li S., Wu X., et al. Considerable energy crop production potentials in the Russian Far East // Biomass and Bioenergy. 2024. Vol. 189. P. 107365. DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107365.

7. Gismatulina Y.A., Budayeva 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. DOI: 10.3390/plants11202791.

8. Шелехова Т.М., Абрамова И.М., Шелехова Н.В., Скворцова Л.И., Полтавская Н.В., Амелякина М.В. Сравнительный анализ химического состава невыдержаных зерновых дистиллятов российского и зарубежного производства // Пищевая промышленность. 2024. N 10. С. 110–114. DOI: 10.52653/PPI.2024.10.10.022. EDN: ZRUTEA.

9. Абрамова И.М., Туршатов М.В., Кривченко В.А., Соловьев А.О., Никитенко В.Д. Исследование биохимического состава топинамбура и получаемых на его основе этилового спирта и пищевых функциональных продуктов // Биотехнология. 2022. Т. 38. N 4. С. 56–61. DOI: 10.56304/S0234275822040020. EDN: DCDJRK.

10. Агеева Н.М., Тихонова А.Н., Бирюков А.П. Влияние ферментативных препаратов на ароматобразующие компоненты красных столовых вин // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. N 2. С. 251–260. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-2-251-260. EDN: GRPOPD.

11. Habe H., Shinbo T., Yamamoto T., Sato S., Shimada H., Sakaki K. Chemical analysis of impurities in diverse bioethanol samples // Journal of the Japan Petroleum Institute. 2013. Vol. 56, no. 6. P. 414–422. DOI: 10.1627/jpi.56.414.

12. Xiang H., Xin R., Prasongthum N., Natewong P., Sooknoi T., Wang J., et al. Catalytic conversion of bioethanol to value-added chemicals and fuels: a review // Resources Chemicals and Materials. 2022. Vol. 1, no. 1. P. 47–68. DOI: 10.1016/j.recm.2021.12.002.

13. Sanchez N., Ruiz R., Hacker V., Cobo M. Impact of bioethanol impurities on steam reforming for hydrogen production: a review // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45, no. 21. P. 11923–11942. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.159.

14. Sanchez N., Ruiz R., Plazas A., Vasquez J., Cobo M. Effect of pretreatment on the ethanol and fusel alcohol

production during fermentation of sugarcane press-mud // Biochemical Engineering Journal. 2020. Vol. 161. P. 107668. DOI: 10.1016/j.bej.2020.107668.

15. Sanchez N., Cobo M., Rodriguez-Fontalvo D., Uribe-Laverde M.Á., Ruiz-Pardo R.Y. Bioethanol production from sugarcane press-mud: assessment of the fermentation conditions to reduce fusel alcohol // Fermentation. 2021. Vol. 7, no. 3. P. 194. DOI: 10.3390/fermentation7030194.

16. Ovchinnikova E.V., Banzaraktsaeva S.P., Kovgan M.A., Chumachenko V.A. Effect of C3-alcohol impurities on alumina-catalyzed bioethanol dehydration to ethylene: experimental study and reactor modeling // Catalysts. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 509. DOI: 10.3390/catal13030509.

17. Tantayotai P., Krungkaew S., Fatriasari W., Chantarasiri A., Sriariyanun M., Panakkal E.J. A sustainable approach for the concurrent production of bioethanol and volatile compounds from agro residues using different yeast strains // Biomass and Bioenergy. 2025. Vol. 201. P. 108134. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.108134.

18. Kim J.S., Lee Y.Y., Kim T.H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass // Bioresource Technology. 2016. Vol. 199. P. 42–48. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.085.

19. 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. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122724.

20. Скиба Е.А., Кащеева Е.И., Золотухин В.Н., Кухленко А.А. Ферментативный гидролиз высококонцентрированных субстратов, полученных из мискантуса гигантского // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 3. С. 394–405. DOI: 10.21285/achb.933. EDN: YXAMLK.

21. Серба Е.М., Оверченко М.Б., Римарева Л.В. Биотехнологические основы микробной конверсии концентрированного зернового сусла в этанол: монография. М.: Издательский дом «Библио-Глобус», 2017. 120 с. DOI: 10.18334/9785950050169. EDN: YRYGRF.

22. Nassini D., Alvarez F.J., Bohé A.E., Olivier A.C. Multivariate optimization of a gas chromatographic method for the determination of organic impurities in ethanol // Microchemical Journal. 2023. Vol. 194. P. 109332. DOI: 10.1016/j.microc.2023.109332.

23. Li G.-B., Chen J., Song B.-Q., Zhang X., Zhang Z., Pan R.-K., et al. Efficient purification of bioethanol by an ethanol-trapping coordination network // Separation and Purification Technology. 2022. Vol. 293. P. 121097. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121097.

24. Tantayotai P., Krungkaew S., Fatriasari W., Chantarasiri A., Sriariyanun M., Panakkal E.J. A sustainable approach for the concurrent production of bioethanol and volatile compounds from agro residues using different yeast strains // Biomass and Bioenergy. 2025. Vol. 201. P. 108134. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.108134.

25. Ovchinnikova E.V., Mironova G.F., Banzaraktsaeva S.P., Skiba E.A., Budayeva V.V., Kovgan M.A., et al. Bioprocessing of oat hulls to ethylene: impact of dilute HNO_3 - or NaOH pretreatment on process efficiency and sustainability // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2021. Vol. 9, no. 49. P. 16588–16596. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c05112.

- 26.** Villaverde J.J., Li J., Ek M., Ligero P., de Vega A. Native lignin structure of *Miscanthus × giganteus* and its changes during acetic and formic acid fractionation // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2009. Vol. 57, no. 14. P. 6262–6270.
27. Li M., Si S., Hao B., Zha Y., Wan C., Hong S., et al.

Mild alkali-pretreatment efectively extracts guaiacyl-rich lignin for high lignocellulose digestibility coupled with largely diminishing yeast fermentation inhibitors in *Miscanthus* // Bioresource Technology. 2014. Vol. 169. P. 447–454. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.07.017.

REFERENCES

- 1.** Kazmi A., Sultana T., Ali A., Nijabat A., Li G., Hou H. Innovations in bioethanol production: a comprehensive review of feedstock generations and technology advances. *Energy Strategy Reviews*. 2025;57:101634. DOI: 10.1016/j.esr.2024.101634.
- 2.** Jain S., Kumar S. A comprehensive review of bioethanol production from diverse feedstocks: current advancements and economic perspectives. *Energy*. 2024;296:131130. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131130.
- 3.** Zhang Y., Oates L.G., Serate J., Xie D., Pohlmann E., Bakhman Y.V., et al. Diverse lignocellulosic feedstocks can achieve high field-scale ethanol yields while providing flexibility for the biorefinery and landscape-level environmental benefits. *GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy*. 2018;10(11):825-840. DOI: 10.1111/gcbb.12533.
- 4.** 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. DOI: 10.3390/app11219949.
- 5.** Osipov D.O., Dotsenko A.S., Semenova M.V., Rozhkova A.M., Sinitsyn A.P. Comparative study of the convertibility of pretreated *Miscanthus* straw using enzyme preparations produced by different recombinant strains of *Penicillium verruculosum*. *Agronomy*. 2024;14(3):499. DOI: 10.3390/agronomy14030499.
- 6.** Zhang Z., Xu J., Jin S., Zhuang H., Li S., Wu X., et al. Considerable energy crop production potentials in the Russian Far East. *Biomass and Bioenergy*. 2024;189:107365. DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107365.
- 7.** 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. DOI: 10.3390/plants11202791.
- 8.** Shelekhova T.M., Abramova I.M., Shelekhova N.V., Skvortsova L.I., Poltavskaya N.V., Amelyakina M.V. Comparative analysis of the chemical composition of grain distillates of Russian and foreign production. *Food Industry*. 2024;10:110-114. (In Russian). DOI: 10.52653/PPI.2024.10.10.022. EDN: ZRUTEA.
- 9.** Abramova I.M., Turshatov M.V., Krivchenko V.A., Soloviev A.O., Nikitenko V.D. Study of the biochemical composition of Jerusalem artichoke, as well as ethyl alcohol and food functional products obtained on its basis. *Biotehnologiya*. 2022;38(4):56-61. (In Russian). DOI: 10.56304/S0234275822040020. EDN: DCDJRK.
- 10.** Ageeva N.M., Tichonova A.N., Biryukov A.P. Effect of enzyme preparations on the aroma-forming components of red table wines. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(2):251-260. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-2-251-260. EDN: GRPOPD.
- 11.** Habe H., Shinbo T., Yamamoto T., Sato S., Shimada H., Sakaki K. Chemical analysis of impurities in diverse bioethanol samples. *Journal of the Japan Petroleum Institute*. 2013;56(6):414-422. DOI: 10.1627/jpi.56.414.
- 12.** Xiang H., Xin R., Prasongthum N., Natewong P., Sooknoi T., Wang J., et al. Catalytic conversion of bioethanol to value-added chemicals and fuels: a review. *Resources Chemicals and Materials*. 2022;1(1):47-68. DOI: 10.1016/j.recm.2021.12.002.
- 13.** Sanchez N., Ruiz R., Hacker V., Cobo M. Impact of bioethanol impurities on steam reforming for hydrogen production: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(21):11923-11942. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.159.
- 14.** Sanchez N., Ruiz R., Plazas A., Vasquez J., Cobo M. Effect of pretreatment on the ethanol and fusel alcohol production during fermentation of sugarcane press-mud. *Biochemical Engineering Journal*. 2020;161:107668. DOI: 10.1016/j.bej.2020.107668.
- 15.** Sanchez N., Cobo M., Rodriguez-Fontalvo D., Uribe-Laverde M.A., Ruiz-Pardo R.Y. Bioethanol production from sugarcane press-mud: assessment of the fermentation conditions to reduce fusel alcohol. *Fermentation*. 2021;7(3):194. DOI: 10.3390/fermentation7030194.
- 16.** Ovchinnikova E.V., Banzaraktsaeva S.P., Kovgan M.A., Chumachenko V.A. Effect of C3-alcohol impurities on alumina-catalyzed bioethanol dehydration to ethylene: experimental study and reactor modeling. *Catalysts*. 2023;13(3):509. DOI: 10.3390/catal13030509.
- 17.** Tantayotai P., Krungkaew S., Fatriasari W., Chantarasiri A., Sriariyanun M., Panakkal E.J. A sustainable approach for the concurrent production of bioethanol and volatile compounds from agro residues using different yeast strains. *Biomass and Bioenergy*. 2025;201:108134. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.108134.
- 18.** Kim J.S., Lee Y.Y., Kim T.H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 2016;199:42-48. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.085.
- 19.** 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. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122724.
- 20.** Skiba E.A., Kashcheyeva E.I., Zolotukhin V.N., Kukhlenko A.A. Enzymatic hydrolysis of highly concentrated substrates obtained from *Miscanthus giganteus*. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(3):394-405. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.933. EDN: YXAMLK.
- 21.** Serba E.M., Overchenko M.B., Rimareva L.V. *Biotechnological foundations of microbial conversion of concentrated grain wort to ethanol*. Moscow: Biblio-Globus; 2017, 120 p. (In Russian). DOI: 10.18334/9785950050169.
- 22.** Nassini D., Alvarez F.J., Bohé A.E., Olivieri A.C. Multivariate optimization of a gas chromatographic method for the determination of organic impurities in ethanol. *Microchemical Journal*. 2023;194:109332. DOI: 10.1016/j.microc.2023.109332.

- 23.** Li G.-B., Chen J., Song B.-Q., Zhang X., Zhang Z., Pan R.-K., et al. Efficient purification of bioethanol by an ethanol-trapping coordination network. *Separation and Purification Technology*. 2022;293:121097. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121097.
- 24.** Tantayotai P., Krungkaew S., Fatriasari W., Chantarasiri A., Sriariyanun M., Panakkal E.J. A sustainable approach for the concurrent production of bioethanol and volatile compounds from agro residues using different yeast strains. *Biomass and Bioenergy*. 2025;201:108134. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.108134.
- 25.** Ovchinnikova E.V., Mironova G.F., Banzaraktsaeva S.P., Skiba E.A., Budaeva V.V., Kovgan M.A., et al. Bioprocessing of oat hulls to ethylene: impact of dilute HNO₃- or NaOH pretreatment on process efficiency and sustainability. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2021;9(49):16588-16596. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c05112.
- 26.** Villaverde J.J., Li J., Ek M., Ligero P., de Vega A. Native lignin structure of *Miscanthus × giganteus* and its changes during acetic and formic acid fractionation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2009;57(14):6262-6270.
- 27.** Li M., Si S., Hao B., Zha Y., Wan C., Hong S., et al. Mild alkali-pretreatment effectively extracts guaiacyl-rich lignin for high lignocellulose digestibility coupled with largely diminishing yeast fermentation inhibitors in *Miscanthus*. *Bioresource Technology*. 2014;169:447-454. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.07.017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Скиба Екатерина Анатольевна,
д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник,
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>

Миронова Галина Федоровна,
к.т.н., научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
✉ yur_galina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4677-9200>

Вклад авторов

Е.А. Скиба – разработка концепции,
разработка методологии, формальный анализ,
валидация результатов, научное руководство,
редактирование рукописи.
Г.Ф. Миронова – проведение исследования,
визуализация, написание черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.08.2025.
Одобрена после рецензирования 25.10.2025.
Принята к публикации 24.11.2025.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ekaterina A. Skiba,
Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Leading Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies, Siberian Branch
of the Russian Academy of Science,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
✉ eas08988@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8897-347X>

Galina F. Mironova,
Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies, Siberian Branch
of the Russian Academy of Science,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
✉ yur_galina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4677-9200>

Contribution of the authors

Ekaterina A. Skiba – conceptualization,
methodology, formal analysis, validation,
supervision, editing.
Galina F. Mironova – investigation, visualization,
writing – original draft.

Conflict of interest

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 27.08.2025.
Approved after reviewing 25.10.2025.
Accepted for publication 24.11.2025.