

Serik Tokaev – Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer of the department «Technology of food and processing industries», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: s.tokaev@kazatu.edu.kz.

Galiya Abdilova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Technological Equipment», Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: abdilova1979@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6647-6314>.

Boris Lobasenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Industrial Design Department, Kemerovo State University, Russian Federation; e-mail: lobasenko@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0245-7904>.

Редакцияға енуі 02.12.2024
Өңдеуден кейін түсуі 07.12.2024
Жариялауға қабылданды 09.12.2024

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4\(16\)-32](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-32)



MPHTI: 62.13.27

А.У. Исаева, С.С. Каримова*, А.И. Жумадулаева, Р.Б. Аралбаева, С.Б. Аширбаева

Шымкентский Университет,

160031, Республика Казахстан, г. Шымкент, Каратауский район, ул. Жибек жолы,
земельный участок № 6

*e-mail: saulet_ka@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ПРИМЕНЕНИИ ЦЕЛЛЮЛОЗОЛИТИЧЕСКИХ МИКРООРГАНИЗМОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ БИОМАССЫ

Аннотация: Лигноцеллюлозная биомасса (ЛЦБ) представляет собой важный ресурс для получения биотоплива и других высокоценных продуктов. Основными компонентами ЛЦБ являются целлюлоза и лигнин, которые сложно разлагаются. Исследования последних лет сосредоточились на применении целлюлозолитических микроорганизмов, таких как бактерии *Bacillus subtilis*, грибы *Trichoderma reesei* и *Penicillium oxalicum*, для эффективного расщепления этих компонентов. В статье представлен обзор современных достижений, включая применение глубоких эвтектических растворителей (DES), что показало улучшение доступности целлюлозы и повышение выхода сахаров до 80%. Применение агропромышленных отходов, таких как рисовая солома, в качестве субстрата для производства ферментов, способствует снижению стоимости производства и поддерживает циркулярную биоэкономику.

Описаны стратегии повышения эффективности ферментативной переработки, включая разработку мультиферментных комплексов и генетически модифицированных штаммов микроорганизмов. Например, использование многофункциональных ферментов из *Clostridium cellulosi* позволило увеличить выход сахаров на 30%. Рассмотрены возможности интеграции ко-культур грибов и гидротермальных методов обработки, которые обеспечивают синергетический эффект в переработке ЛЦБ.

Особое внимание уделено ключевым ферментам, таким как целлюлазы, гемицеллюлазы и лигниназы, и их роли в расщеплении растительных полимеров. Обсуждаются перспективы дальнейших исследований, включая разработку термостабильных ферментов, внедрение экологически чистых методов обработки и интеграцию новых технологий в промышленные биорефинерии.

Ключевые слова: Целлюлозолитические микроорганизмы, лигноцеллюлозная биомасса, биоконверсия, микробные консорциумы, деградация целлюлозы.

Введение

Лигноцеллюлозная биомасса (ЛЦБ), состоящая преимущественно из целлюлозы (40-50%), гемицеллюлозы (20-30%) и лигнина (15-25%), является одним из самых распространенных и доступных возобновляемых ресурсов на Земле [1]. Ежегодное

производство ЛЦБ достигает 181,5 млрд тонн, что делает её значимым сырьём для биоэнергетики и биопродукции [6].

Использование ЛЦБ активно развивается благодаря её доступности и экологическим преимуществам. Она может служить сырьём для производства биотоплива второго поколения, химикатов и других ценных продуктов, что снижает зависимость от ископаемых ресурсов и уменьшает выбросы парниковых газов. Например, переработка сельскохозяйственных отходов, таких как рисовая солома и кукурузные стебли, позволяет сократить выбросы парниковых газов на 20-30% [3].

Однако сложная структура ЛЦБ, обусловленная наличием плотных связей между лигнином, целлюлозой и гемицеллюлозой, ограничивает её переработку [13]. Лигнин образует барьер, препятствующий эффективному гидролизу и ферментативному расщеплению целлюлозы. Для решения этой проблемы разработаны методы предварительной обработки, включая использование химических реагентов, глубоких эвтектических растворителей и других технологий, которые позволяют разрушать лигнин и увеличивать доступность целлюлозных волокон. Например, использование глубоких эвтектических растворителей увеличивает выход сахаров до 85% [25].

Целлюлозолитические микроорганизмы играют ключевую роль в преобразовании ЛЦБ в простые сахара и другие ценные продукты. Эти микроорганизмы синтезируют ферменты, способные разлагать полисахариды, и используются в различных биотехнологических процессах, включая получение биоэтанола, биогаза и продуктов с высокой добавленной стоимостью. Особое внимание уделяется генетически модифицированным штаммам, таким как *Trichoderma reesei*, которые демонстрируют повышенную активность и стабильность ферментов [42].

Актуальность изучения ЛЦБ обусловлена несколькими факторами. Во-первых, необходимость перехода на устойчивые источники энергии требует разработки эффективных технологий переработки биомассы. Во-вторых, проблема утилизации агроиндустриальных отходов и биомассы лесного и сельскохозяйственного происхождения остаётся значимой. В-третьих, интеграция принципов циркулярной экономики делает ЛЦБ важным элементом биоэкономики будущего.

Переработка ЛЦБ с использованием целлюлозолитических микроорганизмов представляет собой более экологически чистую и эффективную альтернативу традиционным химическим методам. Это способствует снижению затрат, уменьшению воздействия на окружающую среду и повышению устойчивости технологий. В данном исследовании рассматриваются достижения и вызовы в области применения целлюлозолитических микроорганизмов для переработки ЛЦБ.

Материалы и методы

Для подготовки данного обзора преимущественно были использованы литературные источники, опубликованные в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Основное внимание уделялось работам, опубликованным за последние 10 лет.

При написании настоящего обзора поиск литературных источников осуществлялся по следующим ключевым словам: *cellulolytic microorganisms* (целлюлозолитические микроорганизмы), *lignocellulosic biomass degradation* (разложение лигноцеллюлозной биомассы), *bioconversion of lignocellulose* (биоконверсия лигноцеллюлозы), *enzymatic hydrolysis of cellulose* (ферментативный гидролиз целлюлозы), *bioprocessing of lignocellulosic materials* (биопереработка лигноцеллюлозных материалов), *microbial cellulose degradation* (микробиологическое разложение целлюлозы), *lignocellulosic waste valorization* (утилизация и переработка лигноцеллюлозных отходов), *cellulase production* (продукция целлюлаз), *industrial applications of cellulolytic enzymes* (промышленные применения целлюлолитических ферментов), *sustainable biomass conversion* (устойчивая конверсия биомассы). В результате были изучены 59 статей.

Результаты исследований и их обсуждение

Использование лигноцеллюлозной биомассы в качестве возобновляемого сырья для производства биоэнергии и биохимических продуктов активно развивается в последние годы благодаря её доступности и экологическим преимуществам. Важную роль в этом процессе играют целлюлолитические микроорганизмы, способные разрушать сложные полимеры,

такие как целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин, в более простые компоненты, которые могут быть использованы для производства различных ценных продуктов. Недавние исследования демонстрируют значительный прогресс в применении целлюлозолитических микроорганизмов и технологий для переработки лигноцеллюлозы.

Одним из ключевых этапов переработки лигноцеллюлозной биомассы является её предварительная обработка, которая улучшает доступность целлюлозы и гемицеллюлозы для дальнейшей ферментации. Исследование ученых указывает на высокий потенциал глубоких эутектических растворителей (DES) в качестве эффективных агентов для предварительной обработки биомассы [1]. DES демонстрируют способность разрушать лигнин и увеличивать выход сахаров, что делает их перспективными для использования в биорефинериях. Такие растворители являются экологически безопасными и устойчивыми альтернативами традиционным химическим методам. Параллельно с развитием новых методов предварительной обработки биомассы активно исследуются возможности использования агропромышленных отходов в качестве субстрата для производства ферментов. В обзоре авторов рассматриваются различные виды отходов агропромышленности, такие как рисовая солома и кукурузные стебли, которые могут быть эффективно использованы для получения целлюлолитических ферментов [2]. Это не только снижает стоимость производства, но и способствует развитию циркулярной биоэкономики, где отходы превращаются в ресурс для получения высокоценных продуктов. Современные исследования подчеркивают важность создания интегрированных биорефинерий, которые позволяют максимально эффективно использовать лигноцеллюлозную биомассу. Авторы отмечают, что переработка сельскохозяйственных отходов в биорефинериях может значительно повысить устойчивость производства биоэнергии и биоразлагаемых материалов, что играет важную роль в развитии циркулярной биоэкономики [3]. Ученые также подчеркивают ценность рисовой соломы как доступного сырья для получения ценных углеродсодержащих материалов, что ещё больше расширяет возможности её применения [6]. Эффективная переработка лигноцеллюлозы невозможна без участия ферментов, которые расщепляют целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин. Авторы выделяют важную роль грибных лигноцеллюлолитических ферментов в мультипродуктовых биорефинериях [8]. Эти ферменты способны разрушать сложные структуры лигноцеллюлозы, открывая путь к созданию различных биопродуктов, включая биоэтанол. В исследовании ученых подчеркивается важность системной биологии для разработки методов биорафинирования лигноцеллюлозных остатков, где особое внимание уделяется микроорганизмам, таким как *Bacillus subtilis*, способным эффективно продуцировать ферменты для гидролиза биомассы [9].

Лигноцеллюлозная биомасса, представляющая собой основное сырьё для производства биоэнергии и биопродуктов, имеет значительный потенциал для использования в устойчивых технологиях переработки. В последние годы наблюдается активный рост интереса к целлюлозолитическим микроорганизмам и их ферментам, которые способны эффективно разлагать целлюлозу и гемицеллюлозу, что открывает новые горизонты для переработки этой биомассы.

Современные достижения в области ферментативной переработки лигноцеллюлозной биомассы связаны с использованием различных подходов, направленных на улучшение производительности ферментов. Исследователи подчеркивают значимость индустриальных приложений ферментов, где внимание уделяется новым методам и техникам, способствующим повышению их активности и стабильности [11]. Разработка многомодульных ферментных комплексов, таких как многофункциональные эндоглюканазы, открывает новые возможности для повышения эффективности гидролиза целлюлозы. Например, исследование ученых демонстрирует, что синергетическая гидролиз целлюлозы, осуществляемая многофункциональными ферментами из *Clostridium cellulosi*, приводит к значительному увеличению выхода ферментируемых сахаров [13]. Использование генетических модификаций также является важным направлением в улучшении производства целлюлолитических ферментов. Авторы изучают, как изменение генетических характеристик микроорганизмов, таких как *Penicillium oxalicum*, позволяет производить высокоэффективные целулазы, включая β -глюкозидазу, которая играет ключевую роль в расщеплении целлюлозы до сахаров, подходящих для ферментации [15]. Это подчеркивает значимость

биотехнологического подхода для повышения выхода биоэнергии из лигноцеллюлозной биомассы. Различные технологии, такие как твердая ферментация, также активно исследуются для производства целлюлолитических ферментов. Исследователи описывают недавние достижения в области твердой ферментации, которые позволяют эффективно производить микробные целулазы с использованием разнообразных субстратов [16]. Это направление обещает не только экономическую целесообразность, но и улучшение общей эффективности процесса переработки биомассы.

Среди методов предварительной обработки лигноцеллюлозной биомассы, привлекающих внимание исследователей, особую роль играют ионные жидкости и поверхностно-активные вещества. Исследование Nargotra et al. показывает, что использование поверхностно-активных веществ в сочетании с ионными жидкостями значительно увеличивает эффективность производства биоэтанола из таких видов биомассы, как *Parthenium hysterophorus* [18]. Эти методы позволяют улучшить доступность целлюлозы для ферментации, что подтверждается результатами исследования Houfani et al., посвященного ферментативному разложению целлюлозы и гемицеллюлозы [19]. Современные исследования в области переработки лигноцеллюлозной биомассы подчеркивают важность интеграции различных технологий для достижения максимальной эффективности. Ostby et al. акцентируют внимание на принципах и последних достижениях в области ферментативной переработки, что позволяет разработать более устойчивые и высокоэффективные процессы [20]. Это включает в себя использование идеального сырья и усовершенствование процессов ферментации для производства лигноцеллюлолитических ферментов, как упоминается в работе Iram et al. [21].

Различные лигноцеллюлолитические ферменты, такие как целулазы и гемицеллюлазы, расщепляют целлюлозу и гемицеллюлозу до простых сахаров, которые затем могут быть преобразованы в различные продукты. Лигнинолитические ферменты, в свою очередь, разрушают лигнин, образуя различные ароматические соединения. Вспомогательные ферменты, такие как глюкозооксидаза, арилалкогоксидаза, глиоксальоксидаза и глюкоолигосахаридоксидаза, усиливают активность пероксидаз, способствуя разрушению лигнина. Кроме того, литические полисахаридмонооксигеназы играют ключевую роль в деградации кристаллической целлюлозы, которые представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Виды лигноцеллюлолитических ферментов, участвующих в деградации лигноцеллюлозной биомассы

Лигноцеллюлозная биомасса, содержащая целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин, представляет собой важный ресурс для производства биоэнергии и биопродуктов. Однако, чтобы эффективно использовать этот ресурс, необходимо преодолеть сложные структуры клеточной стенки растений. В последние годы достигнуты значительные успехи в использовании целлюлозолитических микроорганизмов и их ферментов для улучшения переработки лигноцеллюлозной биомассы, что открывает новые горизонты в области биотехнологии. Целлюлозолитические микроорганизмы, такие как бактерии и грибы, играют ключевую роль в разложении лигноцеллюлозной биомассы благодаря их способности производить специфические ферменты. De Gonzalo et al. выделяют различные бактериальные ферменты, участвующие в деградации лигнина, таких как лакказы и пероксидазы, которые могут трансформировать сложные структуры лигнина в более простые ароматические соединения [22]. Это процесс особенно важен, так как лигнин часто препятствует доступу целлюлозолитических ферментов к целлюлозе и гемицеллюлозе. Plácido et al. подчеркивают, что лигнинолитические ферменты, такие как лигиназы, могут быть использованы как биотехнологическая альтернатива для производства биоэтанола, так как они позволяют улучшить доступность целлюлозы, расщепляя защитные структуры, что в свою очередь облегчает работу целлюлозолитических ферментов [23].

Одним из ключевых направлений в повышении эффективности переработки лигноцеллюлозной биомассы является разработка экологически чистых методов предварительной обработки. Sharma et al. исследуют различные подходы к предварительной обработке, включая использование водных экстрактов и природных реагентов, которые позволяют снизить использование химических веществ и повысить выход конечных продуктов [24]. Эти подходы могут быть особенно полезными в контексте устойчивой биоконверсии. Дополнительные исследования, проведенные Tauyab et al., показывают, что применение экологически чистых методов предварительной обработки, таких как паровая обработка, может значительно повысить выход биоэтанола из лигноцеллюлозной биомассы [26]. Этот процесс позволяет разрушить клеточные стенки и облегчить доступ к целлюлозе для ферментов.

Среди новых методов, применяемых в переработке лигноцеллюлозной биомассы, особое внимание уделяется ко-культурам грибов. Sperandio et al. отмечают, что использование культур грибов позволяет синергетически увеличить выход целлюлозолитических ферментов, что значительно улучшает эффективность переработки [28]. Комбинированное действие различных видов грибов может привести к созданию высокоэффективных ферментных комплексов, способствующих более глубокому расщеплению лигноцеллюлозной структуры. Кроме того, работа Rai et al демонстрирует, что добавление рекомбинантных лакказ в процессы ферментации может повысить термостабильность и эффективность гидролиза лигноцеллюлозной биомассы [29]. Это открывает новые перспективы для использования генетически модифицированных микроорганизмов в производственных процессах.

Совсем недавно также уделено внимание интеграции гидротермальных и биологических методов переработки. Работа Song et al. демонстрирует, что использование гидротермальной обработки в сочетании с ферментативными методами может значительно увеличить выход ферментов и конечных продуктов, что позволяет более эффективно использовать лигноцеллюлозную биомассу [30]. С недавними достижениями в области микробиологии и биотехнологии, особенно в использовании целлюлозолитических микроорганизмов, открываются новые возможности для эффективной переработки этого ресурса.

Исследования, проведенные Thapa et al., подчеркивают возможность получения этанола из муниципальных твердых отходов в Индии и Непале [31]. Используя целлюлозолитические микроорганизмы, ученые достигли значительных результатов в повышении выхода этанола. Эти результаты подтверждают важность биомассы как источника для производства возобновляемого топлива и указывают на необходимость дальнейших исследований в этой области. Tsegaye et al. также исследовали алькилирование лигнина и использование бактерий *Bacillus sp.* BMP01 для гидролиза рисовой и пшеничной соломы [32], [33]. В результате было установлено, что предварительная обработка, основанная на щелочах, значительно улучшает эффективность гидролиза и увеличивает выход биоэтанола. Это открывает новые горизонты для переработки различных видов лигноцеллюлозной биомассы.

Работа Tiwari et al. акцентирует внимание на биопроцессе функциональных целлюлаз, извлеченных из метагеномов, для производства второго поколения биотоплива [34]. Такой подход может значительно повысить выход целлюлозолитических ферментов, что является критически важным для эффективной переработки лигноцеллюлозной биомассы. Кроме того, Vasić et al в своем исследовании описывают различные источники лигноцеллюлозной биомассы и их применение для производства биоэтанола с использованием ферментативного гидролиза [36]. Эта работа подтверждает, что выбор исходного материала может существенно влиять на эффективность конечного продукта.

Совсем недавно, Valles et al. провели оптимизацию щелочной предварительной обработки для повышения конверсии рисовой соломы в бутанол [37]. Их результаты показывают, что предварительная обработка не только улучшает доступность целлюлозы, но и значительно увеличивает выход конечных продуктов. Этот подход является критически важным для реализации эффективной переработки лигноцеллюлозной биомассы. Исследования Vasaki et al. показали возможность производства биодизеля из лигноцеллюлозной биомассы с использованием *Yarrowia lipolytica* [38]. Это открытие подчеркивает многообразие применения целлюлозолитических микроорганизмов в

производстве не только биоэтанола, но и других видов топлива. В своей работе Wang et al. рассматривают лигноцеллюлозную биомассу как устойчивое сырье для производства энергии и хранения [40]. Они подчеркивают, что переработка лигноцеллюлозной биомассы может не только способствовать производству топлива, но и служить источником энергии для промышленных процессов. Работы, такие как исследования Wonoputri et al., подчеркивают важность параметров твердой ферментации для повышения выхода целлюлазы из пустых фруктовых гроздей [41]. Авторы выявили, что оптимизация условий ферментации может значительно увеличить производство целлюлазных ферментов, что, в свою очередь, способствует более эффективному гидролизу лигноцеллюлозной биомассы.

Дальнейшие исследования, проведенные Xiang et al., продемонстрировали, что непрерывное кормление паром обработанного *Miscanthus lutarioriparius* привело к увеличению производства целлюлазы *Trichoderma reesei* RUT C30 [42]. Эти находки подчеркивают значение использования эффективных субстратов для улучшения ферментативной активности. Работы Yan et al. описывают использование бактерий для улучшения предварительной обработки лигноцеллюлозной биомассы с разбавленной кислотой [43]. Этот подход значительно улучшил доступность целлюлозы для последующего ферментативного гидролиза, подчеркивая важность синергии между микробами и традиционными методами обработки. Исследование, проведенное Xia et al., предлагает новый подход с использованием био-вдохновленной двухступенчатой микрореакторной системы для повышения эффективности сахаризации лигноцеллюлозной биомассы [44]. Интеграция сложных ферментов в этот процесс позволила достигнуть значительных результатов в повышении выхода сахаров. Недавние работы, такие как исследование Zafar et al., сосредоточились на использовании термотолерантной рекомбинантной ксилозидазы из *Clostridium clariflavum* для гидролиза лигноцеллюлозной биомассы [46]. Эти новые ферменты демонстрируют большой потенциал в биотопливной отрасли и подчеркивают необходимость поиска и разработки новых ферментов для улучшения переработки лигноцеллюлозной биомассы. В своих работах Zhang et al. акцентируют внимание на важности оптимизации процессов предварительной обработки, адсорбции ферментов и ферментативного гидролиза [47, 48]. Комплексный подход, сочетающий экспериментальные и моделирующие исследования, позволяет выявить оптимальные условия для достижения максимальной конверсии лигноцеллюлозной биомассы в сахара. Также работа Zhuo et al. показывает, как использование бактерий для улучшения биорафинирования лигноцеллюлозы может повысить эффективность процессов переработки [50]. Участие микробов в процессе предварительной обработки создает благоприятные условия для ферментации и дальнейшего получения ценностных продуктов. Исследование Ziaei-Rad et al. рассматривает использование низкочастотного ионного раствора для предварительной обработки лигноцеллюлозной биомассы [51]. Эта методология не только повышает эффективность, но и делает процесс производства биоэтанола более экономически целесообразным.

Исследования показали, что целлюлозолитические микроорганизмы, такие как *Trichoderma reesei* и *Clostridium thermocellum*, обладают высоким потенциалом для переработки лигноцеллюлозной биомассы [53]. Эти микроорганизмы способны производить целлюлазы и гемицеллюлазы, которые эффективно разлагают клеточные стенки растений, содержащие целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин. Одним из последних достижений является разработка мультиферментных комплексов, которые способны действовать на различные компоненты лигноцеллюлозы одновременно, что ускоряет процесс переработки [55]. Важным результатом также является возможность использования генетически модифицированных микроорганизмов для увеличения их ферментативной активности, что было продемонстрировано на примере модификации штаммов бактерий *Clostridium* и *Bacillus* [56].

Одной из главных проблем в переработке лигноцеллюлозной биомассы с помощью микроорганизмов остаётся сложная и прочная структура лигнина, который ограничивает доступ к целлюлозе и гемицеллюлозе. Однако последние исследования показали, что использование комбинаций целлюлозолитических микроорганизмов и предварительных биологических обработок позволяет существенно повысить эффективность процессов [57]. Например, ферментативная активность микроорганизмов возрастает при использовании совместной культивации различных штаммов, таких как *Thermophilic fungi* и *Cellulolytic bacteria* [58]. Достижения в области метаболической инженерии также открывают новые возможности

для разработки высокопродуктивных штаммов, способных перерабатывать лигноцеллюлозную биомассу при минимальных затратах энергии и химических реагентов.

Заключение

Целлюлозолитические микроорганизмы играют ключевую роль в эффективной переработке лигноцеллюлозной биомассы, что является важным направлением для развития устойчивой биоэкономики и решения энергетических и экологических проблем. В последние годы был достигнут значительный прогресс в понимании процессов ферментации, разработки новых методов предобработки и совершенствования энзимных коктейлей для повышения эффективности гидролиза лигноцеллюлозы. Применение различных типов микроорганизмов, таких как бактерии, грибы и дрожжи, открывает новые возможности для повышения продуктивности биоконверсии, что подтверждается многочисленными исследованиями.

Особое внимание заслуживают современные методы предобработки биомассы с использованием экологически чистых растворителей, таких как глубокие эвтектические смеси, и биологическая обработка с помощью бактериальных и грибковых культур. Эти подходы позволяют улучшить доступность субстрата для ферментативного расщепления, снижая при этом энергетические затраты и негативное воздействие на окружающую среду. Кроме того, перспективным направлением является генетическая модификация микроорганизмов для увеличения их ферментативной активности и устойчивости к неблагоприятным условиям процесса. Такие технологии, как CRISPR/Cas и методы метагеномики, уже показывают впечатляющие результаты в повышении продуктивности ферментов, таких как целлюлозы и гликозидазы, что в перспективе может существенно снизить стоимость производства биотоплива.

Применение целлюлозолитических микроорганизмов открывает широкие возможности не только для производства биотоплива, но и для создания биохимических продуктов с высокой добавленной стоимостью, таких как биопластики, органические кислоты и биополимеры. Таким образом, внедрение современных биотехнологий переработки лигноцеллюлозы способствует развитию циркулярной биоэкономики, что обеспечивает рациональное использование возобновляемых ресурсов и минимизацию отходов. Последние достижения в области использования целлюлозолитических микроорганизмов показывают огромный потенциал для эффективной переработки лигноцеллюлозной биомассы. Современные методы позволяют не только повысить эффективность разложения биомассы, но и значительно снизить затраты на процесс за счет использования биотехнологических подходов. В дальнейшем необходимо сосредоточить усилия на масштабировании данных процессов и интеграции микроорганизмов в промышленные биорафинеры для массового производства биоосновных продуктов. Применение этих технологий способствует достижению экологической устойчивости и уменьшению зависимости от ископаемых источников энергии.

В заключение следует отметить, что дальнейшие исследования в области ферментативной переработки лигноцеллюлозной биомассы и оптимизация биотехнологических процессов откроют новые горизонты для создания устойчивых и экологически безопасных методов производства энергии и ценных химических соединений.

Список литературы

1. Deep eutectic solvents as promising pretreatment agents for sustainable lignocellulosic biorefineries: a review / V. Sharma et al // *Bioresour. Technol.* – 2022. – Vol. 360. – P. 127631. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127631>.
2. Agro-industrial food waste as a low-cost substrate for sustainable production of industrial enzymes: a critical review / V. Sharma et al // *Catalysts.* – 2022. – Vol. 12. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/catal12111373>.
3. Agricultural waste biorefinery development towards circular bioeconomy / M.K. Awasthi et al // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2022. – Vol. 158. – P. 112122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112122>.
4. Rojas L.F. Agro-industrial waste enzymes: perspectives in circular economy / L.F. Rojas, P. Zapata, L. Ruiz-Tirado // *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* – 2022. – Vol. 34. – P. 100585. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100585>.

5. Lignocellulosic biomass valorization for bioethanol production: a circular bioeconomy approach / A. Devi et al // *Bioenergy Res.* – 2022. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10401-9>.
6. Devi M.M. Rice straw: a major renewable lignocellulosic biomass for value-added carbonaceous materials. / M.M. Devi, N. Aggarwal, S. Saravanamurugan // *Curr. Green Chem.* – 2020. – Vol. 7. – P. 290-303. <https://doi.org/10.2174/2213346106666191127120259>.
7. Review on neoteric biorefinery systems from detritus lignocellulosic biomass: a profitable approach / N. Kaur et al // *J. Clean. Prod.* – 2020. – Vol. 256. – P. 120607. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120607>.
8. Saini S. Fungal lignocellulolytic enzymes and lignocellulose: a critical review on their contribution to multiproduct biorefinery and global biofuel research / S. Saini, K.K. Sharma // *Int. J. Biol. Macromol.* – 2021. – Vol. 193. – P. 2304-2319. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.063>.
9. Role of systematic biology in biorefining of lignocellulosic residues for biofuels and chemicals production / V. Sharma et al // *Sustainable Biotechnology: Enzymatic Resources of Renewable Energy.* – 2018. – P. 5-55. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95480-6_2.
10. Nargotra P. Cellulase production from *Bacillus subtilis* SV1 and its application potential for saccharification of ionic liquid pretreated pine needle biomass under one-pot consolidated bioprocess / P. Nargotra, S. Vaid, B.K. Bajaj // *Fermentation.* – 2016. – Vol. 2. – P. 19. <https://doi.org/10.3390/fermentation2040019>.
11. Chapman J. Industrial applications of enzymes: recent advances, techniques, and outlooks / J. Chapman, A.E. Ismail, C.Z. Dinu // *Catalysts.* – 2018. – Vol. 8. – P. 238. <https://doi.org/10.3390/catal8060238>.
12. The carbohydrate-active enzymes database (CAZy) // V. Lombard et al // *Nucleic Acids Res.* – 2014. – Vol. 42. – P. D490-D495. <https://doi.org/10.1093/nar/gkt1178>.
13. Synergistic cellulose hydrolysis dominated by a multi-modular processive endoglucanase from *Clostridium cellulosi* / M. Yang et al // *Front. Microbiol.* – 2016. – Vol. 7. – P. 932. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00932>.
14. Production of a high-efficiency cellulase complex via β -glucosidase engineering in *Penicillium oxalicum* / G. Yao et al // *Biotechnol. Biofuels.* – 2016. – Vol. 9. – P. 78. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0491-4>.
15. Genetic modification: a tool for enhancing beta-glucosidase production for biofuel application / R.R. Singhania et al // *Bioresour. Technol.* – 2017. – Vol. 245. – P. 1352-1361. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.126>.
16. Behera S.S. Solid-state fermentation for production of microbial cellulases: recent advances and improvement strategies / S.S. Behera, R.C. Ray // *Int. J. Biol. Macromol.* – 2016. – Vol. 86. – P. 656-669. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.10.090>.
17. Designing a cellulolytic enzyme cocktail for the efficient and economical conversion of lignocellulosic biomass to biofuels. *Enzym* / M. Adsul et al // *Microb. Technol.* – 2020. – Vol. 133. – P. 109442. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2019.109442>.
18. Nargotra P. Consolidated bioprocessing of surfactant-assisted ionic liquid-pretreated *Parthenium hysterophorus* biomass for bioethanol production / P. Nargotra, V. Sharma, B.K. Bajaj // *Bioresour. Technol.* – 2019. – Vol. 289. – P. 121611. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121611>.
19. Insights from enzymatic degradation of cellulose and hemicellulose to fermentable sugars: a review / A.A. Houfani et al // *Biomass Bioenergy.* – 2020. – Vol. 134. – P. 105481. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105481>.
20. Enzymatic processing of lignocellulosic biomass: principles, recent advances and perspectives / H. Ostby et al // *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* – 2020. – Vol. 47. – P. 623-657. <https://doi.org/10.1007/s10295-020-02301-8>.
21. Iram A. Ideal feedstock and fermentation process improvements for the production of lignocellulolytic enzymes / A. Iram, D. Cekmecelioglu, A. Demirci // *Processes.* – 2021. – Vol. 9. – P. 38. <https://doi.org/10.3390/pr9010038>.
22. Bacterial enzymes involved in lignin degradation / G. De Gonzalo et al // *J. Biotechnol.* – 2016. – Vol. 236. – P. 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.08.011>.
23. Plácido J. Ligninolytic enzymes: a biotechnological alternative for bioethanol production / J. Plácido, S. Capareda // *Bioresour. Bioprocess.* – 2015. – Vol. 2. – P. 23. <https://doi.org/10.1186/s40643-015-0049-5>.

24. Environment friendly pretreatment approaches for the bioconversion of lignocellulosic biomass into biofuels and value-added products / S. Sharma et al // *Environments*. – 2023. – Vol. 10. – P. 6. <https://doi.org/10.3390/environments10010006>.
25. Cellulolytic and xylanolytic enzymes from yeasts: properties and industrial applications / M. Sohail et al // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27. <https://doi.org/10.3390/molecules27123783>.
26. Bioethanol production from lignocellulosic biomass by environment-friendly pretreatment methods: a review / M. Tayyab et al // *Appl. Ecol. Environ. Res.* – 2017. – Vol. 16. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1601_225249.
27. Optimization of steam explosion parameters for improved biotechnological use of wheat straw / D. Sulzenbacher et al // *Biomass Convers. Biorefinery*. – 2023. – Vol. 13. – P. 1035-1046. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01266-z>.
28. Sperandio G.B. Fungal co-cultures in the lignocellulosic biorefinery context: a review / G.B. Sperandio, E.X. Ferreira Filho // *Int. Biodeterioration Biodegrad.* – 2019. – Vol. 142. – P. 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.05.014>.
29. Enhanced hydrolysis of lignocellulosic biomass with doping of a highly thermostable recombinant laccase / R. Rai et al // *Int. J. Biol. Macromol.* – 2019. – Vol. 137. – P. 232-237. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.221>.
30. Recent advances and challenges of inter-disciplinary biomass valorization by integrating hydrothermal and biological techniques / B. Song et al // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2021. – Vol. 135. – P. 110370. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110370>.
31. Production of ethanol from municipal solid waste of India and Nepal. In: Ghosh S.K. (Ed.) / B. Thapa et al // *Waste Valorisation and Recycling*, Springer Singapore, Singapore. – 2019. – P. 47-58. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2784-1_5.
32. Tsegaye B. Alkali delignification and *Bacillus* sp. BMP01 hydrolysis of rice straw for enhancing biofuel yields / B. Tsegaye, C. Balomajumder, P. Roy // *Bull. Natl. Res. Centre.* – 2019. – Vol. 43. – P. 136. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0175-x>.
- Tsegaye B. Alkali pretreatment of wheat straw followed by microbial hydrolysis for bioethanol production / B. Tsegaye, C. Balomajumder, P. Roy // *Environ. Technol.* – 2019. – Vol. 40. – P. 1203-1211. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1418911>.
34. Bioprospecting of functional cellulases from metagenome for second-generation biofuel production: a review / R. Tiwari et al // *Crit. Rev. Microbiol.* – 2018. – Vol. 44. – P. 244-257. – <https://doi.org/10.1080/1040841X.2017.1337713>.
35. Tushar M. Efficiency analysis of crude versus pure cellulase in industry / M. Tushar, A. Dutta // *Biomass Bioenergy*. – 2020. – P. 283-298. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8637-4_10.
36. Vasić K., Ž, Knez, Leitgeb M. Bioethanol production by enzymatic hydrolysis from different lignocellulosic sources. *Molecules*, 2021, vol. 26. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26030753>
37. Optimization of alkali pretreatment to enhance rice straw conversion to butanol / A. Valles et al // *Biomass Bioenergy*. – 2021. – Vol. 150. – P. 106131. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106131>.
38. Biodiesel production from lignocellulosic biomass using *Yarrowia lipolytica* / M. Vasaki et al // *Energy Convers. Manage.*: X. – 2022. – Vol. 13. – P. 100167. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100167>.
39. A comprehensive review on the framework to valorise lignocellulosic biomass as biorefinery feedstocks / H.P. Vu et al // *Sci. Total Environ.* – 2020. – Vol. 743. – P. 140630. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140630>.
40. Lignocellulosic biomass as sustainable feedstock and materials for power generation and energy storage / F. Wang et al // *J. Energy Chem.* – 2021. – Vol. 57. – P. 247-280. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.08.060>.
41. Solid-state fermentation parameters effect on cellulase production from empty fruit bunch / V. Wonoputri et al // *Bull. Chem. React. Eng. Catal.* – 2018. – Vol. 13. – P. 553-559. <https://doi.org/10.9767/bcrec.13.3.1964.553-559>.
42. Xiang J. Cellulase production from *Trichoderma reesei* RUT C30 induced by continuous feeding of steam-exploded *Miscanthus lutarioriparius*. / J. Xiang, X. Wang, T. Sang // *Ind. Crops Prod.* – 2021. – Vol. 160. – P. 113129. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113129>.
43. Bacteria-enhanced dilute acid pretreatment of lignocellulosic biomass / X. Yan et al // *Bioresour. Technol.* – 2017. – Vol. 245. – P. 419-425. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.037>.

44. Improving the saccharification efficiency of lignocellulosic biomass using a bio-inspired two-stage microreactor system loaded with complex enzymes / A. Xia et al // *Green Chem.* – 2022. – Vol. 24. – P. 9519-9529. <https://doi.org/10.1039/D2GC02965K>.
45. Changes of chemical composition and hemicelluloses structure in differently aged bamboo (*Neosinocalamus affinis*) culms / P.-P. Yue et al // *J. Agricult. Food Chem.* – 2018. – Vol. 66. – P. 9199-9208. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03516>.
46. Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass using a novel, thermotolerant recombinant xylosidase enzyme from *Clostridium clariflavum*: a potential addition for biofuel industry / A. Zafar et al // *RSC Adv.* – 2022. – Vol. 12. – P. 14917-14931. <https://doi.org/10.1039/D2RA00304J>.
47. Zhang H. An insight to pretreatment, enzyme adsorption and enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: experimental and modeling studies / H. Zhang, L. Han, H. Dong // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2021. – Vol. 140. – P. 110758. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110758>.
48. Zhang F. Improvement of cellulase production in *Trichoderma reesei* rut-C30 by overexpression of a novel regulatory gene *Trvib-1* / F. Zhang, X. Zhao, F. Bai // *Bioresour. Technol.* – 2018. – Vol. 247. – P. 676-683. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.126>.
49. Integrated process to produce biohydrogen from wheat straw by enzymatic saccharification and dark fermentation / J. Zhu et al // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.056>.
50. Use of bacteria for improving the lignocellulose biorefinery process: importance of pre-erosion / S. Zhuo et al // *Biotechnol. Biofuels.* – 2018. – Vol. 11. – P. 146. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1146-4>.
51. Lignocellulosic biomass pre-treatment using low-cost ionic liquid for bioethanol production: an economically viable method for wheat straw fractionation / Z. Ziaei-Rad et al // *Biomass Bioenergy.* – 2021. – Vol. 151. – P. 106140. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106140>.
52. Bashir N. Enzyme immobilization and its applications in food processing: a review / N. Bashir, M. Sood, J.D. Bandral // *Int. J. Chem. Stud.* – 2020. – Vol. 8. – P. 254-261. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i2d.8779>.
53. Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.): a versatile and sustainable crop for renewable energy production in Europe / F. Rossini et al // *Agronomy.* – 2019. – Vol. 9. – P. 528. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090528>.
54. Biotransformation of lignocellulosic biomass to value-added bioproducts: insights into bio-saccharification strategies and potential topics in catalysis / M. Jahangeer et al // *Topics in Catalysis.* – 2024. <https://doi.org/10.1007/s11244-024-01941-9>.
55. Xylitol: production strategies with emphasis on biotechnological approach, scale up, and market trends / S. Mathur et al // *Sustainable Chemistry and Pharmacy.* – 2023. – Vol. 35. – P. 101203. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101203>.
56. Utilization of agricultural wastes for co-production of xylitol, ethanol, and phenylacetylcarbinol: a review / J. Feng et al // *Bioresource Technology.* – 2024. – Vol. 392. – P. 129926. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129926>.
57. Xylitol: bioproduction and applications-a review / D. Umai et al // *Frontiers in Sustainability.* – 2022. – Vol. 3. – P. 826190. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.826190>.
58. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass: an environment-benign and sustainable approach for conversion of solid waste into value-added products / R.C. Kuhad et al // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology.* – 2023. – Vol. 54. – № 10. <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2277670>.
59. Получение биогаза отходов сельского хозяйства / Б. Бахтияр и др. // *Вестник КАЗАТК. Энергетика.* – 2023. – Том 128, № 5. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-128-5-399-409>.

А.У. Исаева, С.С. Каримова*, А.И. Жұмадулаева, Р.Б. Аралбаева, С.Б. Әширбаева
Шымкент Университеті,
160031, Қазақстан Республикасы, Шымкент қаласы, Қаратау ауданы, Жібек жолы көшесі,
№ 6 жер учаскесі
*e-mail: saulet_ka@mail.ru

ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗА БИОМАССАСЫН ӨНДЕУ ҮШІН ЦЕЛЛЮЛОЗОЛИТИКАЛЫҚ МИКРООРГАНИЗМДЕРДІ ҚОЛДАНУДАҒЫ ЗАМАНАУИ ЖЕТИСТІКТЕР

Лигноцеллюлоза биомассасы (ЛСВ) биоотын және басқа да жоғары құнды өнімдерді алу үшін маңызды ресурс болып табылады. ЛСВ негізгі компоненттері целлюлоза мен лигнин болып

табылады, олар ыдырауы қиын. Соңғы жылдардағы зерттеулер осы компоненттерді тиімді ыдырату үшін *Bacillus subtilis* бактериялары, *Trichoderma reesei* саңырауқұлақтары және *Penicillium oxalicum* сияқты целлюлозолитикалық микроорганизмдерді қолдануға бағытталған. Мақалада терең эвтектикалық еріткіштерді (DES) қолдануды қоса алғанда, заманауи жетістіктерге шолу жасалады, бұл целлюлозаның қол жетімділігінің жақсарғанын және қанттың 80%-ға дейін көтерілгенін көрсетті. Күріш сабаны сияқты агроөнеркәсіптік қалдықтарды ферменттер өндірісінің субстраты ретінде пайдалану өндіріс құнын төмендетуге көмектеседі және айналмалы биоэкономиканы қолдайды.

Мультиферментті кешендер мен микроорганизмдердің генетикалық түрлендірілген штамдарының дамуын қоса алғанда, ферментативті өңдеудің тиімділігін арттыру стратегиялары сипатталған. Мысалы, *Clostridium cellulosi*-ден көпфункционалды ферменттерді қолдану қанттың өнімділігін 30%-ға арттыруға мүмкіндік берді. LCB өңдеуде синергетикалық әсерді қамтамасыз ететін саңырауқұлақ дақылдары мен гидротермиялық өңдеу әдістерін біріктіру мүмкіндіктері қарастырылады.

Целлюлазалар, гемицеллюлазалар және лигниназалар сияқты негізгі ферменттерге және олардың өсімдік полимерлерін ыдыратудағы рөліне ерекше назар аударылады. Термостабильді ферменттерді өзірлеуді, экологиялық таза өңдеу әдістерін енгізуді және жаңа технологияларды өнеркәсіптік биорефинерияға біріктіруді қоса алғанда, қосымша зерттеулердің болашағы талқыланады.

Түйін сөздер: целлюлозолитикалық микроорганизмдер, лигноцеллюлоза биомассасы, биоконверсия, микробтық консорциумдар, целлюлозаның деградациясы.

A.U. Issayeva, S.S. Karimova*, A.I. Zhumadulaeva, R.B. Aralbayeva, S.B. Ashirbayeva

Shymkent University,

160031, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Karatau district, Zhibek Zholy street, land plot № 6

*e-mail: saulet_ka@mail.ru

MODERN ACHIEVEMENTS IN THE USE OF CELLULOLYTIC MICROORGANISMS FOR PROCESSING LIGNOCELLULOSE BIOMASS

*Lignocellulose biomass (LCB) is an important resource for the production of biofuels and other high-value products. The main components of LCB are cellulose and lignin, which are difficult to decompose. Recent research has focused on the use of cellulolytic microorganisms, such as *Bacillus subtilis* bacteria, *Trichoderma reesei* fungi and *Penicillium oxalicum*, to effectively break down these components. The article provides an overview of modern achievements, including the use of deep eutectic solvents (DES), which showed an improvement in the availability of cellulose and an increase in sugar yield up to 80%. The use of agro-industrial waste, such as rice straw, as a substrate for the production of enzymes, helps to reduce the cost of production and supports circular bioeconomics.*

*Strategies to increase the efficiency of enzymatic processing are described, including the development of multi-enzyme complexes and genetically modified strains of microorganisms. For example, the use of multifunctional enzymes from *Clostridium cellulosi* allowed to increase the yield of sugars by 30%. The possibilities of integrating mushroom co-cultures and hydrothermal processing methods that provide a synergistic effect in the processing of LCB are considered.*

Special attention is paid to key enzymes such as cellulases, hemicellulases and ligninases and their role in the breakdown of plant polymers. Prospects for further research are discussed, including the development of thermostable enzymes, the introduction of environmentally friendly processing methods and the integration of new technologies into industrial biorefineries.

Key words: cellulolytic microorganisms, lignocellulose biomass, bioconversion, microbial consortia, cellulose degradation.

Сведения об авторах

Акмарал Умурбековна Исаева – доктор биологических наук, профессор, директор НИИ Экологии и биологии; Шымкентский Университет, Республика Казахстан; e-mail: akissayeva@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8323-3982>.

Саулет Сабитхановна Каримова* – постдокторант, старший научный сотрудник НИИ Экологии и биологии; Шымкентский Университет, Республика Казахстан; e-mail: saulet_ka@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8231-1982>.

Алиса Исаевна Жумадулаева – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры естественных наук; Шымкентский Университет, Республика Казахстан; e-mail: alisa195858@mail.ru.

Райхан Бурахановна Аралбаева – магистр, старший преподаватель кафедры естественных наук; Шымкентский Университет, Республика Казахстан; e-mail: raihan-14.88@mail.ru.

Салтанат Бибатровна Аширбаева – магистр, старший преподаватель кафедры естественных наук; Шымкентский Университет Республика Казахстан; e-mail:salta_12.58@mail.ru.

Авторлар туралы мәліметтер

Ақмарал Умурбековна Исаева – биология ғылымдарының докторы, профессор. Экология және биология ҒЗИ директоры; Шымкент университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail:akissayeva@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8323-3982>.

Саулет Сабитхановна Каримова* – постдокторант, Экология және биология ҒЗИ аға ғылыми қызметкері; Шымкент университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail:saulet_ka@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8231-1982>.

Алиса Исаевна Жұмадулаева – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, жаратылыстану ғылымдары кафедрасының аға оқытушысы; Шымкент университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: alisa195858@mail.ru.

Райхан Бурахановна Аралбаева – жаратылыстану ғылымдары кафедрасының магистрі, аға оқытушысы; Шымкент университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: raihan-14.88@mail.ru.

Салтанат Бибатровна Әширбаева – жаратылыстану ғылымдары кафедрасының магистрі, аға оқытушысы; Шымкент университеті Қазақстан Республикасы; e-mail: salta_12.58@mail.ru.

Information about the authors

Akmara Umurbekovna Issayeva – Doctor of Biological Sciences, Professor. Director of the Research Institute of Ecology and Biology; Shymkent University, Republic of Kazakhstan; e-mail: akissayeva@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8323-3982>.

Saulet Sabitkhanovna Karimova* – postdoctoral fellow, Senior Researcher at the Research Institute of Ecology and Biology; Shymkent University, Republic of Kazakhstan; e-mail:saulet_ka@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8231-1982>.

Alisa Issayevna Zhumadulayeva – Candidate of Agricultural Sciences, Senior Lecturer at the Department of Natural Sciences; Shymkent University, Republic of Kazakhstan; e-mail: alisa195858@mail.ru.

Raykhan Burakhanovna Aralbayeva – Master's degree, Senior Lecturer at the Department of Natural Sciences; Shymkent University, Republic of Kazakhstan; e-mail: raihan-14.88@mail.ru.

Saltanat Bibatrovna Ashirbayeva – Master's degree, Senior Lecturer at the Department of Natural Sciences; Shymkent University, Republic of Kazakhstan; e-mail:salta_12.58@mail.ru.

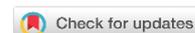
Поступила в редакцию 07.10.2024

Поступила после доработки 04.12.2024

Принята к публикации 05.12.2024

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4\(16\)-33](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-33)

FTAXP: 65.09.05



Н. Мұратжанқызы*, Ә.Л. Қасенов², М.Т. Мурсалыкова², Г.А. Кокаева², С.Д. Токаев²

¹Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А

²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,

010011, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жеңіс даңғылы, 62

*e-mail: nazerkemuratzhankyzy1990@gmail.com

ШЫРҒАНАҚ ШИКІЗАТЫНЫҢ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада зерттеу жұмысының мақсатына байланысты престау процесін сипаттауда процестің мазмұнын ашатын – шырғанақ шикізатының сапалық көрсеткіштерін зерттеу нәтижесі сипатталады.

Шырғанақ бірқатар маңызды биологиялық белсенді қосылыстардың құнды көзі болып табылады. Шырғанақты өңдеу өнеркәсібі жайлы сұрақтың қойылуы тағам өнімдерін және дәрілік препараттарды алудағы көзі бұл поливитаминді дақылдардың құнды қасиеттеріне байланысты.

Жабайы шырғанақ шырынын алу процесін зерттеу барысында тәжірибелік шырынсыққыш жабдығы сипатталды. Техникалық нәтижеге жеткізетін, шнекті пресс құрылымына жұмыс аймағында жабдықталған, қысымды өздігінен реттеу механизміне сипаттама берілді. Жұмыс аймағында қысымды өздігінен реттеу механизмі арқылы, қол