

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2021, №2 Том 8 / 2021, No 2, Vol 8 <https://resources.today/issue-2-2021.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/06ECOR221.pdf>

DOI: 10.15862/06ECOR221 (<https://doi.org/10.15862/06ECOR221>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Массеров Д.А., Кустов М.В. Мировые достижения валоризации органических отходов для экологически устойчивого развития территорий // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2021 №2, <https://resources.today/PDF/06ECOR221.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/06ECOR221

For citation:

Masserov D.A., Kustov M.V. (2021). Global achievements in the valorization of organic waste for environmentally sustainable development of territories. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, [online] 2(8). Available at: <https://resources.today/PDF/06ECOR221.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/06ECOR221

Массеров Дмитрий Александрович¹

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», Саранск, Россия
Доцент кафедры «Экологии и природопользования»
Кандидат экономических наук, доцент
E-mail: masserow@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5076-2818>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=675663

Кустов Михаил Витальевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», Саранск, Россия
Доцент кафедры «Землеустройства и ландшафтного планирования»
Кандидат географических наук, доцент
E-mail: mvkustov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8580-3571>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=70898

Мировые достижения валоризации органических отходов для экологически устойчивого развития территорий

Аннотация. Все более жесткие экологические требования в отношении захоронения органических отходов в передовых странах мира, а также спрос на возобновляемые органические химические вещества и топливо подталкивают обрабатывающую промышленность к более высокой экологической устойчивости, чтобы повысить экономическую эффективность и удовлетворить потребительский спрос. Автором представлено, что валоризация пищевых отходов — это одно из современных направлений исследований, которое привлекло большое внимание в последние несколько лет в качестве потенциальной альтернативы захоронению широкого спектра отходов на свалках. В частности, показано, что разработка экологически обоснованных и инновационных стратегий переработки таких отходов является областью, приобретающей все большее значение в нашем современном обществе. Размещение на свалках, сжигание и компостирование отходов — это

¹ <https://vk.com/masserov>

распространенные и традиционные технологии утилизации отходов. Однако, они не подходят для обработки органических отходов из-за образования токсичного метана и неприятного запаха, высокого энергопотребления и медленной реакции разложения. Тем более в процессе разложения не образуется никакого ценного продукта. Вместо того, чтобы утилизировать и разлагать пищевые отходы, недавние исследования сосредоточились на их использовании в качестве источника энергии, например, производство биоэтанола и биодизеля. Органические отходы также полезны для производства полезных органических химических веществ (например, янтарной кислоты или биопластиков) с помощью биорефининга или биотехнологии.

Цель данной статьи — обобщить последние разработки стратегий валоризации отходов для устойчивого производства химических веществ, материалов и топлива на основе разработки стратегий экологичного производства.

Ключевые слова: отходы; окружающая среда; анаэробное сбраживание; устойчивое развитие; вещество; валоризация отходов; производство топлива

Введение

Изменение климата, энергетический кризис, нехватка ресурсов и загрязнение окружающей среды — основные проблемы, с которыми человечество сталкивается сегодня и столкнется в будущем. Устойчивое развитие стало для человечества одним из приоритетов влияния на окружающую среду в последнее столетие и значительно ускорило в связи с быстрым ростом населения и сопутствующим резким сокращением конечных природных ресурсов. Поиск альтернатив и более устойчивых способов жизни в целом — это наш долг перед будущими поколениями и одно из важных принципов рационального использования природных ресурсов.

Отходы различных видов, например, сельскохозяйственные, пищевые, промышленные образуются изо дня в день в огромных количествах, что создает значительные проблемы в их управлении и утилизации. В последние годы в нашем обществе повсеместно распространилось ощущение, что окружающая среда в опасности, которое, однако, еще не оформилось в общую концепцию сокращения производства отходов в нашей повседневной жизни. Многие методы могли бы обеспечить устойчивое развитие, которые могли бы не только улучшить управление отходами, но и привести к производству промышленно важных химических веществ, материалов и топлива, по сути ценных конечных продуктов из отходов.

Валоризация отходов — это процесс превращения отходов в более полезные продукты, включая химикаты, материалы и топливо. Такая концепция уже давно существует, в основном связанная с управлением отходами, но она стала еще более востребованной в настоящее время в связи с быстрым истощением природных и первичных ресурсов, увеличением образования отходов и их захоронения во всем мире и необходимостью разработки более устойчивых и экономически эффективных методов управления отходами [1].

Материалы и методы

Эта статья была задумана для того, чтобы дать обзор последних разработок стратегий валоризации отходов (с особым акцентом на пищевые отходы) для устойчивого производства химических веществ, материалов и топлива, выделив ключевые примеры из недавних исследований, проведенных учёными во всём мире.

Органические отходы: проблемы и возможности

В последние годы проблемы, связанные с захоронением пищевых отходов на свалках, приводят к росту интереса к поиску инновационных альтернатив из-за высокой доли органического вещества в твердых бытовых отходах (ТБО).

Различные методы валоризации в настоящее время демонстрируют многообещающие перспективы в удовлетворении потребностей промышленности. Одной из таких перспективных стратегий валоризации отходов является применение проточной химической технологии для переработки отходов в ценные продукты. Недавний обзор в работе [2; 3] выделил различные преимущества непрерывных проточных процессов, особенно для валоризации биомассы или пищевых отходов, которые включали контроль реакции, простоту масштабирования, эффективные реакционные циклы, дающие большой выход и отсутствие необходимого разделения катализатора.

Хотя известно, что химия потока используется в промышленности для других методов обработки, она все еще остается используемой при валоризации отходов биомассы. Ограничения по их использованию существуют, в связи с энергетическими затратами, необходимыми для разложения высокостабильных биополимеров и неразложимых соединений (например, лигнина). Разложение таких биополимеров в большинстве случаев требует экстремальных условий давления и температуры.

Такие условия, достигаются микроволновым нагревом, который является еще одной технологией зеленой валоризации. Эти требования нелегко удовлетворить и для успешного преобразования отходов, поэтому необходимо комбинировать различные методы (например, микроволновое облучение). Однако главная проблема для этой комбинации заключается в самом масштабировании. Как указано в [4] микроволновая печь и проточная химия могут быть соединены путем присоединения регуляторов обратного давления к проточным устройствам. Этот подход может революционизировать промышленную валоризацию, поскольку он позволит быстро синтезировать продукты (за счет микроволнового нагрева) в водном непрерывном цикле (проточном процессе).

Еще одна стратегия валоризации связана с использованием пиролиза в синтезе топлив. Это предполагает, нагрев биомассы при высоких температурах в отсутствие кислорода с получением продуктов разложения [5; 6]. Хотя пиролиз является довольно старым методом получения обуглившихся частиц, он был недавно получен для получения пригодных для использования небольших молекул из очень стабильных биополимеров. Этот метод особенно используется в производстве биомасла. В исследовании [7] было изучено несколько условий быстрого пиролиза отходов мебельных опилок и было установлено, что выход биомасла необязательно увеличивается с повышением температуры. Оптимальная температура пиролиза была установлена на уровне 450 °C (выход биомасла 57 %) с использованием реактора с псевдосжиженным слоем. Причиной нелинейной зависимости выхода температуры является возможное разложение малых молекул на более простые газы.

Помимо энергетических применений пиролиз также может быть использован для получения передовых материалов, включая углеродные нанотрубки и графеноподобные материалы, которые имеют широкий спектр применений. Эти исследования наряду со многими другими в литературе иллюстрируют потенциал пиролиза для превращения отходов в ценные химические вещества.

Третий зеленый метод валоризации может быть основан на использовании биологических микроорганизмов для разложения сложных отходов и получения топлива. Этот метод основан на использовании преимуществ разложения целлюлозы на ферменты (или любого биополимера) микроорганизмами, как продемонстрировал в своей работе [8].

В последние годы интенсивно изучается биоконверсия, и одним из наиболее значительных достижений в этой области является возможность синтетического контроля метаболических путей микроорганизмов для получения благоприятных метаболических процессов, которые, в свою очередь, увеличат выход продуктов. Примечательным примером является использование кишечной палочки для получения высших спиртов [9].

Три представленные стратегии (микроволновая печь, пиролиз и биоинженерия) представляют собой некоторые из наиболее важных методов валоризации. С быстрым развитием этих областей в области валоризации отходов ожидается, что большинство практик устойчивого развития промышленности будут иметь различную направленность в различных будущих сценариях.

Валоризация отходов в настоящее время ориентирована на три устойчивых пути: один из них будет заключаться в производстве топлива и энергии для замены обычных источников ископаемого топлива и параллельно в производстве высокоценных основных химикатов, а также полезных материалов. Запасы ископаемого топлива явно сокращаются, и это вызывает глобальную экологическую озабоченность в связи с быстрым ростом выбросов побочных продуктов использования ископаемого топлива (как для переработки, так для фактического использования). Из-за этого валоризация отходов для получения энергии ориентирована не только на устойчивый источник топлива, но и на её экологичность, пригодность для промышленного роста.

По данным нидерландского Агентства по экологической оценке окружающей среды, выбросы парниковых газов (ПГ) в мире достигли небывалого максимума в 2019 году — около 52,4 миллиардов тонн парниковых газов (ПГ) [10]. Почти 90 % этих выбросов происходит в результате сжигания ископаемого топлива. Другие токсичные газы, такие как летучие органические соединения, оксиды азота и твердые частицы, поступают вместе с ПГ. В более чем вероятном сценарии роста спроса на энергию, минимум на 2,5 % в год необходимо постепенно заменять ископаемое топливо более чистыми источниками топлива. Сжигание биомассы для производства электроэнергии и тепла, как сообщалось, было менее затратным, обеспечивая в то же время меньший выброс CO₂. Многие исследования также показали убедительные доказательства того, что использование биомассы для энергетических целей может стать весьма интересным решением и более чистой технологией в будущем [11–13].

Другое направление валоризации отходов направлено на получение высокоценных химических веществ из остатков, включая янтарную кислоту, фурфурола, фенольных соединений, и биопластика. Они могут быть получены с помощью химических, химико-ферментативных и биотехнологических подходов [14; 15].

Производство химических веществ, полученных из биомассы, является устойчивым подходом, поскольку оно максимизирует использование ресурсов и в то же время минимизирует образование отходов.

Главной силой биотехнологии является ее многовариантность. Среди широкого спектра технологий, способных достичь цели устойчивого развития, биотехнология может занять важное место, особенно в таких областях, как производство продовольствия, возобновляемое сырье и энергия, предотвращение загрязнения окружающей среды. В настоящее время основное применение биотехнологии, используемой в области охраны окружающей среды, заключается в использовании микроорганизмов для контроля состояния окружающей среды. Развитие биотехнологии могло бы стать решением проблем с утилизацией органических отходов.

Включение этих процессов в будущие биоочистные установки для производства продуктов с добавленной стоимостью и топлива станет важным вкладом в достижение самой приоритетной в мире цели — устойчивого развития.

В последние годы все большую озабоченность вызывает утилизация пищевых отходов. Количество пищевых отходов, образующихся во всем мире, составляет ошеломляющие 1,3 миллиарда тонн в год. Помимо потери потенциально ценного источника пищи или регенерированного ресурса, существуют проблемы, связанные с захоронением пищевых отходов на свалках. В связи с этой неизбежной проблемой обращения с отходами, пищевые отходы в обозримом будущем должны быть перенаправлены со свалок на перерабатывающие предприятия.

Технологии переработки пищевых отходов первого поколения включают переработку отходов в энергию (например, анаэробное сбраживание), компостирование и корм для животных [16]. Исходя из особенностей пищевых отходов, следует принять комплексный подход с акцентом на сокращение и разделение пищевых отходов, переработку коммерческих и промышленных пищевых отходов, сокращение объема бытовых пищевых отходов и рекуперацию энергии из пищевых отходов.

Источники, характеристика и состав отходов

Большое количество отходов, образующихся во всем мире, представляет собой привлекательный устойчивый источник для промышленно важных химических веществ. Пищевые отходы, включая мусор, помои и кухонные отходы — любые побочные продукты или отходы производства, переработки, распределения и потребления пищевых продуктов.

Однако в разных странах и городах определение понятия пищевых отходов различно. В Европейском Союзе пищевые отходы определяются как любое пищевое вещество, сырое или вареное, которое предназначено для удаления. Агентство по охране окружающей среды США, с другой стороны, определяет пищевые отходы как несъеденные пищевые отходы и отходы приготовления пищи от предприятий и коммерческих учреждений, таких как продуктовые магазины, рестораны и продуктовые киоски, кафе и кухни, а также промышленные источники, включая обеденные залы. В Организации Объединенных Наций различают «пищевые отходы» и «пищевые потери». Пищевые потери относятся к снижению количества или качества пищи, что делает ее непригодной для потребления человеком, в то время как пищевые отходы относятся к потерям пищи в конце пищевой цепочки из-за поведения розничных торговцев и потребителей.

Используя установленные технологии зеленой переработки, различные виды отходов могут быть преобразованы в ценные химические вещества и топливо, с целью минимизации объемов захоронения отходов и, в конечном итоге, защиты окружающей среды в целом.

Пищевые отходы, как правило, характеризуются высоким разнообразием и изменчивостью, высокой долей органического вещества и высокой влажностью.

В связи с тем, что содержание влаги в пищевых отходах составляет 74–90 %, утилизация пищевых отходов представляет собой значительную проблему из-за роста патогенов и быстрого окисления [15]. Поскольку в пищевых отходах уже имеется много различных микроорганизмов, высокая скорость микробной активности и количество питательных веществ в пищевых отходах способствуют росту патогенов, которые вызывают беспокойство по поводу неприятного запаха, санитарных проблем и даже могут привести к инфекционным заболеваниям. Высокое содержание влаги, также увеличивает стоимость транспортировки пищевых отходов. Пищевые отходы с высоким содержанием липидов также подвержены

быстрому окислению. Выделение дурнопахнущих жирных кислот также затрудняет процесс переработки пищевых отходов.

Согласно исследованию, проведенному по заказу продовольственной и сельскохозяйственной организацией объединенных наций (ФАО) [17], ежегодно образуется 1,3 миллиарда тонн пищевых отходов, и примерно треть продовольствия, производимого для потребления человеком, теряется или растрачивается впустую во всем мире. В докладе также отмечается, что пищевые отходы промышленно развитых и развивающихся стран имеют различные характеристики. Во-первых, в промышленно развитых странах происходит накопление все более значительных количеств пищевых отходов на душу населения по сравнению с объемами, наблюдаемыми в развивающихся странах.

В Республике Мордовия в год образуется около 265 тыс. т твердых бытовых отходов, 20 % (53 тыс. т) из которых составляют пищевые (органические) отходы (табл. 1). Ежедневно образуется почти 1 кг твердых отходов на душу населения. Это количество включает пищевые/кухонные отходы, бумагу, полиэтилен, бутылки, металлы и банки. В Мордовии не практикуют открытое сжигание отходов. Для удобства сбора отходов проводится необходимая сегрегация отходов на пластик, картон и прочие отходы (в т. ч. пищевые). Девяносто девять процентов (99 %), образующихся ТБО размещается на полигонах. Специалисты оценивают, что к 2025 году потенциал всех существующих полигонов в Республике Мордовия будет исчерпан.

Таблица 1

Состав твердых бытовых отходов в Республике Мордовия в 2019 г.

Виды отходов	Тыс. тонн
Органические отходы	53
Дерево, мебель	25
Макулатура (картон, бумага)	23
Строительный мусор (камень, керамика, бетон)	22
Стекло	13
Текстиль, кожа, ковры, обувь	7
Полимерные материалы	15
Прочие отходы	107
Итого	265

Хотя проблема пищевых отходов широко распространена во всем мире, системы переработки пищевых отходов могут быть сформулированы только на уровне местных сообществ с учетом специфики конкретного района. К ним относятся региональные особенности и состав отходов, наличие земельных участков, отношение населения и так далее. Однако из-за отсутствия местных исследований, касающихся пригодности технологий переработки пищевых отходов для Республики Мордовия, этот обзор важен для того, чтобы дать властям несколько предложений по разработке стратегии удаления пищевых отходов.

Хотя утилизация пищевых отходов на свалках была признана наиболее экономичным вариантом, она вызывает многочисленные проблемы. При захоронении на свалках они обычно закапываются и уплотняются, при разложении пищевых отходов образуется метан — парниковый газ, который в двадцать один раз опаснее углекислого газа (CO₂) в условиях анаэробной среды. Такая утилизация на самом деле может существенно повлиять на окружающую среду в регионе, поскольку некоторые сообщения указывают на то, что около 30 % ПГ, производимых в Мордовии, образуются на свалках [11]. Метан также легко воспламеняется и может привести к пожарам и взрывам при накоплении в определенных концентрациях. Кроме того, при разложении пищевых отходов развиваются неприятные запахи, а также происходит выщелачивание и образование органических солей, которые могут повредить основания свалок, выщелачивая тяжелые металлы и приводя к загрязнению грунтовых вод [14].

Исследования валоризации развивались на протяжении многих лет, и многие методы и разработки были достигнуты в последние десятилетия. В настоящее время изучаются вопросы получения химических веществ и топлива из отходов, включая хлеб, пшеницу, остатки фруктов, лигноцеллюлозные источники и т. д. В обзоре [18] было отмечено, что валоризация пищевых отходов в мелкодисперсные химические вещества является более выгодной и менее энергоемкой по сравнению с ее возможностями для производства топлива. В связи с этим соответствующие технологии переработки отходов, особенно связанные с производством топлива, также были предложены для решения проблемы энергоэффективности и рентабельности из целого ряда различных видов сырья [10].

Разработка наиболее экологичных стратегий валоризации

В мире существует множество вариантов переработки или вторичной переработки отходов. Компостирование, регенерированные корма для животных и подстилки, сжигание, анаэробное сбраживание и связанные с ними стратегии первого поколения были предложены и исследованы в течение длительного времени. Некоторые из этих методов оказались успешными на пути к коммерциализации. Учитывая проблему хранения и большое количество пищевых отходов, образующихся каждый день, предприятия по переработке пищевых отходов должны быть мегамасштабными и иметь достаточную очистную мощность, чтобы ежедневно обрабатывать многочисленные тонны пищевых отходов. Это определенно требует больших первоначальных инвестиций для создания объектов промышленного масштаба.

Кроме того, в случае внеплощадочной переработки большого объема и большой массы пищевых отходов возникают дополнительные трудности, так как сбор пищевых отходов значительно увеличивает затраты на транспортировку.

Примеры положительной практики внедрения системы переработки пищевых отходов имеются в Гонконге. Департамент охраны окружающей среды планирует развивать очистные сооружения органических отходов. На таких установках будут применяться биологические технологии — компостирование и анаэробное сбраживание для стабилизации органических отходов и превращения их в компост и биогаз для рекуперации. Первая очередь очистных сооружений органических отходов будет с суточной очистной мощностью 200 тонн исходных отделенных органических отходов. Вторая очередь будет с суточной мощностью переработки 300 тонн органических отходов [19].

Сокращение отходов в источнике должно быть главным приоритетом, чтобы уменьшить количество образующихся пищевых отходов.

Успешные примеры внедрения схемы взимания платы за ТБО в азиатских городах, таких как Тайбэй (Тайвань) и Сеул (Южная Корея) может эффективно сократить общее количество ТБО на 50 % за 10 лет [19]. Эти страны внедрили систему взимания платы на основе количества/объема, чтобы создать финансовые стимулы для изменения поведения населения, генерирующего пищевые отходы для сокращения отходов в источнике. Кроме того, они внедрили систему наполнения мешков только с пищевыми отходами для обеспечения разделения отходов. Пищевые отходы вместе с полиэтиленовыми пакетами могут подвергаться обработке без дополнительной стадии разделения в очистных сооружениях.

В последние годы широко используются технологии биологической очистки, включая анаэробное сбраживание и компостирование. При анаэробном сбраживании биогаз образуется в качестве основного продукта [20]. Сообщается, что из 1 тонны пищевых отходов производится 223 м³ биогаза. Однако выход биогаза может варьироваться в зависимости от состава отходов и наличия моющего средства. Многочисленные исследования показывают, что недостаток достаточного количества питательных веществ ограничивает способность

ферментов переваривать отходы жизнедеятельности [21]. Это может избежать попадания отходов от свалки и тем самым предотвратить выброс парниковых газов в окружающую среду. Также твердые остатки можно использовать в качестве компоста, что позволяет уменьшить количество используемых химических удобрений. Экономически анаэробный процесс разложения может генерировать электроэнергию на месте и может снизить затраты на электроэнергию. Также, его можно использовать в очистных сооружениях сточных вод, тем самым устранить транспортировку. Еще один способ оценки отходов — сжигание для рекуперации энергии.

Однако сжигание пищевых отходов является энергоемким процессом и может привести к удалению важных полезных компонентов из обработанного сырья [22].

Будущие перспективы и выводы

Повышение объёмов утилизации пищевых и пластмассовых отходов сдерживает проблему роста свалок во многих частях мира. Валоризация отходов — это привлекательная концепция, которая в настоящее время приобретает все большую популярность во многих странах в связи с быстрым увеличением образования таких отходов. Из-за этого исследователи не только разрабатывают стратегии валоризации, но и сосредотачиваются на разработке более экологичных материалов с использованием целого ряда зеленых технологий.

Конверсия ряда видов сырья в ценные продукты, включая химикаты, биоматериалы и топливо, была продемонстрирована в трех принципиально различных тематических исследованиях, чтобы подчеркнуть значительный потенциал передовых стратегий валоризации отходов.

Включение этих и аналогичных процессов в будущие биоочистные установки для производства продуктов с добавленной стоимостью и топлива станет важным вкладом в достижение самой приоритетной в мире цели — устойчивого развития. Но, возможно, главный и самый важный вопрос, который необходимо решить ради будущих поколений, в настоящее время упускается из виду, — это само общество. Наиболее широкое понимание отходов как проблемы, как остатков, как чего-то неценного должно уступить место общему пониманию обществом отходов как ценного ресурса. Ресурс, который очевидно, влечет за собой значительную сложность (из-за присущего ему разнообразия и изменчивости) может обеспечить одновременно бесконечное число инновационных решений и альтернатив конечных продуктов с помощью передовых стратегий валоризации. Для этого потребуются совместные усилия целого ряда наук — от инженерии до (био)химии, био(техно)логии, наук об окружающей среде, права и экономики, чтобы разработать инновационные альтернативы, которые, как мы надеемся, приведут к созданию более устойчивого общества и экономики, основанных на экологичной основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Массеров Д.А. К вопросу об индикаторах устойчивого развития территорий / Д.А. Массеров // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. — 2013. — № 1. — С. 147–150.
2. Гонопольский А.М. Технология пульповой переработки и удаления пищевых отходов из мест их образования / А.М. Гонопольский, Б.Г. Покусаев, Е.В. Зинякина, Д.П. Храмцов, Д.А. Некрасов // Экология и промышленность России. — 2014. — № 12. — С. 4–7.
3. Serrano-Ruiz, J.C., R. Luque, J.M. Campelo, and A.A. Romero. 2012. Continuous-flow processes in heterogeneously catalyzed transformations of biomass derivatives into fuels and chemicals. *Challenges* 3: 114–132. URL: <https://doi.org/10.3390/challe3020114> (дата обращения: 14.05.2021).
4. Glasnov T.N., and C.O. Kappe. 2011. The microwave-to-flow paradigm: translating high-temperature batch microwave chemistry to scalable continuous-flow processes. *Chem. Eur. J.* 17: 11956–11968. URL: <https://doi.org/10.1002/chem.201102065> (дата обращения: 14.05.2021).
5. Mohan, D., C.U. Pittman, and P.H. Steele. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels* 20: 848–889. URL: <https://doi.org/10.1021/ef0502397> (дата обращения: 14.05.2021).
6. Кузьмина Р.И. Высокотемпературная переработка пищевых отходов / Р.И. Кузьмина, С.Н. Штыков, К.Е. Панкин, Ю.В. Иванова, Т.Г. Панина // Пищевая промышленность. — 2010. — № 7. — С. 20–21.
7. Нео, H.S., H.J. Park, Y.-K. Park, C. Ryu, D.J. Suh, Y.-W. Suh, et al. 2010. Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed. *Bioresour. Technol.* Volume 101. P. S91–S96. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.003> (дата обращения: 14.05.2021).
8. Wulff, N., H. Carrer, and S. Pascholati. 2006. Expression and purification of cellulase Xf818 from *Xylella fastidiosa* in *Escherichia coli*. *Curr. Microbiol.* 53: 198–203. URL: <https://doi.org/10.1007/s00284-005-0475-2> (дата обращения: 14.05.2021).
9. Atsumi, S., T. Hanai, and J.C. Liao. 2008. Nonfermentative pathways for synthesis of branched-chain higher alcohols as biofuels. *Nature* 451: 86–89. URL: <https://doi.org/10.1038/nature06450> (дата обращения: 14.05.2021).
10. Тенденции глобальных выбросов CO₂ и общих выбросов парниковых газов. Отчет за 2020 год. URL: <https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2020-report> (дата обращения: 14.05.2021).
11. Массеров Д.А. Рациональное обращение с твёрдыми коммунальными отходами как фактор развития экономики и охраны окружающей среды / Д.А. Массеров, А.В. Ломакин // Современные проблемы территориального развития. — 2019. — № 2. — URL: <https://terjournal.ru/2019/id83/> (дата обращения: 14.05.2021).
12. Wang Y., Yu He Y., Yan B., a et al. 2012. Collaborative Emission Reduction of Greenhouse Gas Emissions and Municipal Solid Waste (msw) Management-Case Study of Tianjin. *Procedia Environmental Sciences.* Volume 16: 75–84. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.011> (дата обращения: 14.05.2021).

13. Rivera-Tinoco R., Bouallou C. 2010. Using biomass as an energy source with low CO₂ emissions. *Clean Technologies and Environmental Policy* 12: 175–178. URL: <https://doi.org/10.1007/s10098-009-0241-4>(дата обращения: 14.05.2021).
14. Юдин А.Г. Пути решения проблемы пищевых отходов в Московском регионе / А.Г. Юдин, П.О. Цапко // *Экология и промышленность России*. — 2014. — № 9. — С. 44–49.
15. Массеров Д.А. Использование экологически чистых технологий в утилизации городских пищевых отходов / Д.А. Массеров, А.В. Ломакин, Д.В. Черкасов // *Современные проблемы территориального развития*. — 2020. — № 1. — URL: <https://terjournal.ru/2020/id105/> (дата обращения: 14.05.2021).
16. Массеров Д.А. Перспективы использования отходов животноводства в сельском хозяйстве Республики Мордовия / Д.А. Массеров, И.С. Ушаков // *Структура, динамика и функционирование природно-социально-производственных систем: наука и практика: сб. науч. тр.* — Саранск, 2018. — С. 237–241.
17. Положение дел в области продовольствия и сельского хозяйства 2016: Изменение климата, сельское хозяйство и продовольственная безопасность ФАО. Продовольственная и сельскохозяйственная организация. URL: <http://www.fao.org/3/i6030r/I6030R.pdf> (дата обращения 03.06.2021).
18. Pfaltzgraff, L.A., M. De bruyn, E.C. Cooper, V. Budarin, and J.H. Clark. 2013. Food waste biomass: a resource for high-value chemicals. *Green Chem.* 15: 307–314. URL: <https://doi.org/10.1039/c2gc36978h> (дата обращения 03.06.2021).
19. Lee C.K.M., Kam K.H.Ng. und Kwong C.K. 2018. A system dynamics model for evaluating food waste management in Hong Kong, China. *Journal of Material Cycles and Waste Management.* 21(11). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-018-0804-8> (дата обращения 03.06.2021).
20. Takata, M., K. Fukushima, N. Kino-Kimata, N. Nagao, C. Niwa, and T. Toda. 2012. The effects of recycling loops in food waste management in Japan: based on the environmental and economic evaluation of food recycling. *Sci. Total Environ.* 432: 309–317. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.049> (дата обращения 03.06.2021).
21. Zhang, R., H.M. El-Mashad, K. Hartman, F. Wang, G. Liu, C. Choate, et al. 2007. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* 98: 929–935. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.039> (дата обращения 03.06.2021).
22. Массеров Д.А. Мусоросжигание как основной способ утилизации твёрдых коммунальных отходов / Д.А. Массеров, А.А. Волкова, А.В. Ломакин, А.И. Кучеренко // *Проблемы и перспективы развития промышленности России: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* — Москва. — 2019. — С. 491–495.

Masserov Dmitriy Alexandrovich

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia

E-mail: masserow@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5076-2818>

РИИЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=675663

Kustov Mikhail Vitalyevich

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia

E-mail: mvkustov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8580-3571>

РИИЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=70898

Global achievements in the valorization of organic waste for environmentally sustainable development of territories

Abstract. Increasingly stringent environmental regulations for landfill in the world's advanced economies, as well as the demand for renewable organic chemicals and fuels, are pushing the manufacturing industry towards greater environmental sustainability in order to improve economic efficiency and meet consumer demand. The author presents that the valorization of food waste is one of the current research areas that has received a lot of attention in the past few years as a potential alternative to the disposal of a wide range of waste in landfills. In particular, it is shown that the development of environmentally sound and innovative strategies for the treatment of such waste is an area of increasing importance in our modern society. Landfilling, incineration and composting of waste are common and traditional waste management technologies. However, they are not suitable for organic waste treatment due to the formation of toxic methane and unpleasant odors, high energy consumption and slow decomposition reaction. Moreover, in the process of decomposition, no valuable product is formed. Rather than recycle and degrade food waste, recent research has focused on its use as an energy source, such as the growing production of bioethanol and biodiesel. Organic waste is also useful for the production of useful organic chemicals (like succinic acid or bioplastics) through biorefining or biotechnology.

The purpose of this article is to summarize recent developments in waste valorization strategies for the sustainable production of chemicals, materials and fuels through the development of sustainable production strategies.

Keywords: waste; environment; anaerobic digestion; sustainable development; substance; waste valorization; fuel production