

Утилизация жома сахарной свёклы в России: текущая ситуация и перспективы (обзор)

© 2025. М. Л. Сазанова^{1,2}, к. б. н., доцент, н. с.,
А. В. Сазанов², к. б. н., и. о. зав. кафедрой, В. И. Кузнецов³, директор,
А. А. Кызин³, зам. директора по инновациям,
¹Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
²Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
³ООО «НВП Башинком»,
450015, Россия, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д. 37/4, офис 310,
e-mail: sazanova.m.l@ib.komisc.ru, usr11759@vyatsu.ru

Главной задачей экономики замкнутого цикла является минимизация отходов путём их вторичной переработки. В работе обобщены данные по традиционным и некоторым перспективным для России способам рециклинга жома сахарной свёклы (ЖСС) – крупнотоннажного отхода сахарной промышленности с потенциально высокой экологической нагрузкой. Основным потребителем ЖСС является сельское хозяйство, где он применяется в качестве кормовой добавки и удобрения. Однако до 50% ЖСС остаётся переработанным и при складировании оказывает негативное влияние на состояние окружающей среды: увеличивается выброс парниковых газов, загрязнение почвы и вод (в том числе снижение pH из-за образующихся в процессе брожения масляной и уксусной кислот), распространение патогенов и т. п. Рассматриваются альтернативные направления утилизации ЖСС. Благодаря наличию полисахаридов с большим количеством функциональных групп ЖСС может использоваться в качестве сорбента для очистки водоёмов и сточных вод от тяжёлых металлов и нефтепродуктов. Большое количество доступных для использования микроорганизмами компонентов открывает потенциал ЖСС как структуратора для рекультивации нефтезагрязнённых почв, а также как наполнителя биокмпозитов с сорбирующими свойствами для защиты окружающей среды от загрязнения. Обобщены данные о разработанных технологиях получения биоразлагаемых продуктов (бумага, упаковка, композиты), альтернативных видов топлива (биоэтанол, биогаз) из ЖСС. Предлагается комплекс мер, направленных на повышение эффективности переработки и расширение сфер применения ЖСС. Результаты анализа подтверждают потенциал ЖСС как важного ресурса для реализации концепции экономики замкнутого цикла, способствующей снижению объёмов перерабатываемых отходов и снижению экологических рисков.

Ключевые слова: жом сахарной свёклы, утилизация отходов, вторичная переработка, удобрение, корм для животных, сорбент, структуратор, биоразлагаемые продукты.

Sugar beet pulp recycling in Russia: current status and prospects: a review

© 2025. M. L. Sazanova^{1,2} ORCID: 0000-0003-3492-8395,
A. V. Sazanov² ORCID: 0000-0002-6934-3330,
V. I. Kuznetsov³ ORCID: 0009-0001-6490-5808,
A. A. Kyzin³ ORCID: 0009-0004-5538-0458

¹Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
²Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
³JSC “Bashinkom”,
37/4, Karl Marx St., Ufa, Russia, 450015,
e-mail: sazanova.m.l@ib.komisc.ru, usr11759@vyatsu.ru

The main objective of a circular economy is to minimize waste through recycling. The paper summarizes data on traditional and some promising methods for recycling sugar beet pulp (SBP), a large-tonnage waste from the sugar industry with a potentially high environmental burden. The main consumer of SBP is agriculture, where it is used as a forage additive and fertilizer. However, up to 50% of SBP remains unprocessed and, when stored, has a negatively affect the environment which is reflected in increased greenhouse gas emissions, soil and water pollution (including a decrease in pH due to butyric and acetic acids formed during fermentation), the spread of pathogens, etc. Alternative ways of SBP disposal are being considered. Due to the presence of polysaccharides with a large number of functional groups, SBP can be used as a sorbent for the purification of waterbodies and wastewater from heavy metals and petroleum products. A large number of components available for microorganisms opens up the SBP potential as a structurator for the oil-contaminated soil reclamation, and as a biocomposites' filler with sorbent properties to protect the environmental pollution. The data on the developed technologies for the production of biodegradable products (paper, packaging, composites) and alternative fuels (bioethanol, biogas) from SBP are summarized. A set of measures is proposed aimed at improving the efficiency of processing and expanding the scope of SBP applications. The results of the analysis confirm the potential of SBP as an important resource for the implementation of the concept of a circular economy, contributing to a reduction in the volume of non-recyclable waste and reducing environmental risks.

Keywords: sugar beet pulp, waste disposal, recycling, fertilizer, forage, sorbent, structurator, biodegradable products.

Сокращение количества отходов путём их повторного использования или переработки с получением продукции с добавленной стоимостью является главной задачей экономики замкнутого цикла [1]. Ввиду увеличения численности населения стремительно растёт производство пищевых продуктов, равно как и число отходов. Крупнотоннажными отходами пищевой промышленности считаются фруктовая кожура, рисовые и пшеничные отруби, жмых сахарного тростника и сахарной свёклы и др. При их несвоевременной и/или неадекватной утилизации растёт нагрузка на окружающую среду: увеличивается выброс парниковых газов, загрязнение почвы и вод, распространение патогенов [2].

Производство сахара считается одной из наиболее материалоемких отраслей перерабатывающей промышленности: на каждую тонну готового продукта образуется 9 т отходов [3]. Более 80% отходов производства сахара приходится на свекловичный жом (ЖСС) – обессахаренную стружку толщиной менее 2 мм [4, 5]. По разным оценкам, ежегодно в России образуется от 16 до 70 млн т сырого жома [3, 5–7]. В зависимости от содержания воды и сухого вещества (СВ) различают жом свежий/сырой (92–93% воды, 7–8% СВ), отжатый (12–14% СВ), кислый (получается при хранении свежего или отжатого жома в хранилищах), высушенный/прессованный (18–25% СВ), сухой (88% СВ); последний может быть в рассыпном или гранулированном виде, а также мелассированный [6, 7].

Свекловичный жом – лигноцеллюлозное сырьё, содержащее 17,6–56,0% целлюлозы, 21–23% гемицеллюлоз, 4% лигнина, 0,7–16,3% моносахаридов [6, 8–12]. Кроме того, в ЖСС идентифицированы аминокислоты (аланин, аргинин, аспарагиновая кислота, ва-

лин, гистидин, глицин, глутаминовая кислота, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, пролин, серин, тирозин, треонин, триптофан, фенилаланин), водорастворимые витамины (В1, В2, В3, В5, В6, В7, В9, В12, С), макро- и микроэлементы (Р, S, К, Са, Mg, Zn, I) [6, 7, 9–12]. Богатый химический состав, «натуральность», низкая себестоимость, большие объёмы производства делают ЖСС перспективным продуктом для вторичной переработки. В России ЖСС наиболее востребован в животноводстве, где составляет основу рационов крупного рогатого скота (КРС) и свиней [5–12]. Однако 40–50% жома остаётся невостребованным и попадает в отходы, причём при хранении изначально пятый класс опасности отхода «жом свекловичный свежий» возрастает до третьего, поскольку начинаются процессы брожения [3, 5, 6].

В связи с вышеизложенным, цель данной работы состояла в обобщении и систематизации перспективных методов утилизации жома сахарной свёклы, в том числе с получением продуктов с добавленной стоимостью.

Объекты и методы исследования

Для поиска источников научной и технической информации использовали сервисы eLIBRARY, КиберЛенинка, PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, Репозиторий платформ. Подбор публикаций за последние десять лет проводили по таким ключевым словам, как жом свекловичный, жом сахарной свёклы, **beet pulp, sugar beet pulp, лигноцеллюлозное сырьё**, отходы сахарной промышленности, **agricultural waste**. Особое внимание уделяли вопросам, связанным с экологическими аспектами утилизации крупнотоннажных отходов сахарного производства, а также

экономической целесообразности различных способов получения вторичной продукции.

Сельскохозяйственное производство

Кормовая добавка. Россия является крупнейшим в мире производителем (2023 г. – 1,87 млн т, 16,4% мирового производства) и экспортёром (2023 г. – 1,30 млн т, 27% мирового экспорта; прогноз на 2030 г. – 1,6 млн т) сушёного ЖСС, используемого на корм скоту [13].

Жом сахарной свёклы свежий, прессованный, сухой, мелассированный входит в состав комбикормов или кормовых добавок в рационы крупного [6–8, 10, 14–25] и мелкого рогатого скота [14, 26, 27], свиней [14, 28–31], лошадей [14, 32–35], кроликов [36–38], кур [14, 39–41], уток [42, 43], перепелов [44], собак [45–47] и кошек [48, 49].

Наиболее полно в данном направлении ЖСС используется в регионах, где выращивается и перерабатывается сахарная свёкла [50, 51]. В первую очередь это связано с низкой устойчивостью свежего ЖСС к окислению: уже на третьи сутки рН снижается до 5, что неблагоприятно сказывается на качестве кормов. Кислый ЖСС нейтрализуют раствором аммиака с получением аммонизированного жома [52]. Силосование травы, пострадавшей от засухи, с использованием ЖСС рекомендуется для улучшения сохранности и повышения кормовой ценности силоса [53].

Для эффективного сохранения питательности и транспортабельности ЖСС высушивается до влажности менее 13% [4, 53], на процессы обезвоживания и гранулирования приходится 30–40% общих энерготрат при переработке свёклы [51]. С целью снижения затрат тепловой энергии на высушивание рекомендуется гранулирование с последующим активным вентилированием [54], либо сушка методом ворошения [55], либо обработка ЖСС перед экстрагированием растворами сульфатов алюминия и аммония [56].

В рацион животных ЖСС вводится для обеспечения углеводно-протеинового баланса кормов, а также в качестве источника пищевых волокон, нормализующих обмен холестерина и оказывающих антиоксидантное действие [19, 28]. В 1 кг сухого ЖСС 0,85–0,98 кормовых единиц (для сравнения – в свежем жоме 0,06–0,09 корм. ед.) [4, 53]. Установлено, что включение в рационы КРС кормовых добавок с ЖСС оказывает положительное влияние на поедаемость и усвояемость кормов, фер-

ментацию в толстом кишечнике и состав бактерий, морфо-биохимический состав крови (рост концентрации кальция, фосфора, эритроцитов), способствует повышению молочной продуктивности [19, 20, 23–25], увеличивает долю ацетата в рубце и уровень циркулирующего инсулина [57]. Однако при использовании ЖСС с высокой концентрацией крахмала жирность молока снижается [23]. Позитивные эффекты введения ЖСС в рацион животных состоят в стимуляции образования и всасывания короткоцепочечных жирных кислот, формировании разнообразной микробной экосистемы (увеличение количества полезной микрофлоры, особенно *Lactobacillus*) в кишечнике, пребиотическом действии, снижении уровня триглицеридов в крови [28, 30, 31, 45, 58]. Доказана эффективность в борьбе с диареей у поросят-отъёмышей [30]. В отношении кроликов установлено, что высокое содержание в рационе растворимой клетчатки, которой богат ЖСС, с одной стороны, может способствовать снижению риска расстройств пищеварения, с другой – увеличивает вязкость химуса, затрудняет его переваривание и всасывание, увеличивает относительную массу содержимого слепой кишки и время пребывания химуса в слепой кишке, а затем приводит к накоплению токсинов в слепой кишке, нарушению её микрофлоры и аномальному росту *Escherichia coli*, и, как следствие, линейно снижает показатели роста и выход тушки [38, 59, 60].

При добавлении ЖСС в рацион животных следует учитывать возможность его контаминации патогенной микрофлорой и плесневыми грибами родов *Fusarium*, *Aspergillus* и *Penicillium*, а также микотоксинами: зеараленоном, микофеноловой кислотой, охратоксином А, рокфортином С [61]. По данным [62], инфицирование сухого ЖСС ниже, чем других побочных продуктов пищевой промышленности (ячменный солод, пивная дробина), но это не отменяет необходимость строгого контроля качества продукции. Другим решением проблемы стало применение консервирующих добавок на основе органических кислот (муравьиной и др.) [63].

Удобрения. Энергозатратность производства сухого ЖСС (сухой рассыпной, сухой гранулированный), недостаточные технологические мощности сахарных заводов по переработке свежего ЖСС с получением новой продукции (пектин, карбоксиметилцеллюлоза и т.п.), сезонность производства сахара (с августа по январь), а также недостаточное количество животноводческих хозяйств-

потребителей свежего ЖСС вынуждает производителей складировать его в ямах или на открытых площадках, а затем утилизировать как отход [51, 64, 65]. Свекловичный жом можно отнести к вторичным ресурсам, которые могут быть использованы в хозяйственной деятельности, в частности, в качестве органического удобрения. Рекомендуется запахивать его в течение двух суток после доставки на поле, а для снижения кислотности вносить с веществами, нейтрализующими кислотность [66, 67]. Так, показано [68, 69], что при выращивании яровой пшеницы и ярового ячменя внесение ЖСС+дефекат в дозах 100+5 и 150+15 т/га, соответственно, способствует повышению урожайности культур и увеличению показателей экономической эффективности (чистого дохода, рентабельности).

На основе лигноцеллюлозных отходов, к которым относится ЖСС, перспективна разработка технологии получения биоудобрений. Так, при ультразвуковой кавитации ЖСС в нём на 77% повышается содержание сухих веществ и на 80% – содержание редуцирующих сахаров, что необходимо для роста микроорганизмов при производстве удобрений [70].

В связи с неустойчивостью свежего ЖСС к окислению рекомендуется компостирование. Хорошо зарекомендовало себя вермикомпостирование [71], поскольку полученный биогукус характеризуется более высоким содержанием азота, фосфора, калия, кальция и магния по сравнению с исходным сырьём [72]. Вермикомпост, включающий субстрат из ЖСС, почвы и фильтрационного осадка, перерабатываемый калифорнийскими червями в течение 5 месяцев, позволяет эффективно утилизировать ЖСС в условиях сахарного завода, снижая нагрузку на окружающую среду, и уменьшить затраты на производство биогукуса [73]. Биокомпост, полученный путём смешивания ЖСС с биоактиватором, содержащим штаммы *Bacillus* sp. BR 1256, позволяет обогатить и улучшить структуру почвы, повысить плодородие [74].

Использование в качестве сорбента

Свекловичный жом содержит полисахариды, обладающие сорбирующими свойствами: пектин, целлюлозу, лигнин, гемицеллюлозу. За счёт реакций хемосорбции, комплексообразования, реакций ионного обмена, микроосаждения и т. п. осуществляется адсорбция веществ [75]. Центрами сорбции в молекулах

полисахаридов являются гидроксильные группы, гетероатомы глюкопиранозных колец, $\beta(1\rightarrow4)$ -гликозидные связи целлюлозы, карбоксильные, карбонильные, ацетильные группы гемицеллюлоз [75–77]. Относительно применения ЖСС в качестве сорбента можно выделить как положительные (дешевизна, экологичность, доступность, хорошая поглощающая способность, возможность повторного использования), так и отрицательные моменты (низкая устойчивость к разложению под действием температуры и влажности, закисление почвенного раствора, низкая маслоёмкость вследствие гидрофильности) [78–81]. Тем не менее, ряд авторов рассматривает ЖСС как эффективный энтеросорбент низкомолекулярных органических веществ и метаболитов белковой природы [82].

Защита окружающей среды. В лабораторных экспериментах установлено, что нативный и модифицированный (карбонизированный) ЖСС может использоваться для удаления красителей (метиленовый синий, реактивный чёрный 5, кислотный красный 1 и др.) и ионов тяжёлых металлов: цинка(II), хрома(III), хрома(VI), меди(II), марганца(II), свинца(II), урана(VI), железа(III), никеля(II), таллия(I), кадмия(II) из водных сред, в т. ч. шахтных вод [77, 83–88]. Адсорбция металлов согласуется с изотермой Ленгмюра по механизму ионного обмена, электростатического взаимодействия либо хелатирования [83]. Сорбирующие свойства материалов можно увеличить путём карбонизации сырья с последующей углекислотной или водно-паровой активацией, поскольку при этом увеличивается пористость и площадь поверхности сорбентов [81, 89–91]. Так, если эффективность извлечения металлов для нативного ЖСС составляет 55–80%, то для модифицированного – до 98% [88]. По данным [92, 93], сорбционная активность карбонизированного и активированного водяным паром ЖСС по очистке сточных вод полиграфического и нефтехимического производств сопоставима с эффективностью активированного угля, а стоимость – на 20–40% ниже. Кроме того, исследователи отмечают сорбционную активность гидро- и ксерогелей на базе пектина, полученного из ЖСС, в отношении ионов меди(II), свинца(II) и кадмия(II) [94].

Также ЖСС показал хорошие сорбирующие свойства в отношении разливов нефти и нефтепродуктов на воде [79, 81, 88, 95, 90]. Установлено, что для нативного высушенного ЖСС нефтеёмкость составляет 1,16–2,17 г/г, для обработанного СВЧ-излучением либо

органическим растворителем с последующим выжиганием – 3,5–16 г/г [79, 81, 88]. При этом маслоёмкость жома зависит от температуры (снижается при понижении температуры) и фракционного состава (средняя фракция ЖСС, размером 1,2–5 мм, имеет наилучшие сорбционные характеристики) [88, 95]. Для повышения эффективности нефтесорбентов разработаны биокомпозитные материалы на основе полимерной матрицы (например, сополимера акрилонитрила и метилметакрилата) с инкорпорированными биогенными компонентами (лигноцеллюлозный наполнитель, например, ЖСС) и иммобилизованной культурой или ассоциатами нефтеокисляющих бактерий (из родов *Rhodococcus*, *Leicobacter*, *Ochrobactrum*, *Deinococcus* и др.); данные биокомпозиты адсорбируют углеводороды и разлагают их до нетоксичных продуктов [90, 96].

Для ликвидации разливов нефти в водоёмах и рекультивации загрязнённых нефтью и нефтепродуктами почв и грунтов предпочтительна микробиологическая деструкция одновременно с внесением структураторов. Последние дренируют почвы, улучшают их водный режим, стабилизируют, снижают эрозию и деструкцию. Структуратором может быть различное лигноцеллюлозное сырьё, в том числе многотоннажные отходы производства – ЖСС, стержни кукурузных початков, рисовая и гречишная шелуха, лузга проса и подсолнечника, гидролизный лигнин, пивная дробина, активный ил, древесные опилки, кора хвойных и лиственных деревьев, хлопкосодержащие отходы прядильного производства и др., а также биочар, верховой и низинный торф, навоз, мох, вермикулит [89, 97–99]. Наличие доступных для микроорганизмов деструкторов аминокислот, органических кислот (яблочная и др.), витаминов, элементов минерального питания, а также образующихся в результате ферментативного и/или химического гидролиза моносахариды (глюкоза, ксилоза, арабиноза и др.), выгодно отличают ЖСС от других структураторов. Согласно [100], наличие пантотеновой, яблочной и аскорбиновой кислот (входят в состав ЖСС) благоприятно сказывается на метаболизме нефтеокисляющих бактерий. Эффективность очистки нефтезагрязнённых грунтов при использовании ЖСС в качестве структуратора может достигать 97% [91], при этом не происходит вымывания и перехода в почву веществ из структураторов под действием атмосферных осадков [101].

Биоразлагаемые продукты и продукты «зелёной» химии

По данным [51, 71, 102, 103], ЖСС может эффективно использоваться в производстве бумаги и упаковочных материалов в качестве частичной (15%) или полной замены древесных волокон. С 2020 г. голландская компания Crown Van Gelder производит бумагу, на 20% состоящую из свекловичного волокна: прочную, экологичную (экологический след на 16% меньше, а воздействие волокон на окружающую среду на 80% меньше, чем у древесных волокон), безопасную для пищевых продуктов, пригодную для печати офсетным и флексографским способом, а также вторичной переработки и компостирования [104]. В России разработаны композиции биоразлагаемых упаковочных материалов на основе смесей синтетических полимеров и модифицирующих волокнистых добавок, в том числе ЖСС [105, 106]. Линия производства биоразлагаемой упаковки может быть установлена на свёклосохарных заводах [107], что позволяет сэкономить на логистических расходах.

Свекловичный жом является биоразлагаемым наполнителем, на основе которого можно получить различные полимерные композиты [108–112]. В частности, синтезирован нанокомпозит из пектина и целлюлозных нановолокон ЖСС и экстракта граната, обладающий антибактериальными и антиоксидантными свойствами, который можно использовать для покрытий упаковочной бумаги [111]. Разработанные технологии позволяют получить плёночные материалы для упаковки с высокими упруго-прочностными характеристиками сниженной себестоимости за счёт использования агропромышленных отходов. Недостатком изготовления таких материалов считают невозможность получения стабильной по составу массы, а также необходимость длительного хранения ЖСС перед изготовлением композитов, дополнительные расходы на высушивание наполнителя [113, 114], высокую зависимость полученных ЖСС-пластмасс от влажности окружающей среды вследствие их гидрофильности [115]. Приводятся сведения о синтезированных термопластах из полисахаридов ЖСС путём прямой переэтерификации, позволившей добиться замещения до 96% гидроксигрупп ацильными цепями различной длины [116].

Альтернативное топливо – биоэтанол – производится из возобновляемых ресурсов

в результате сбраживания углеводов, например, с помощью *Saccharomyces carlsbergensis*, *S. cerevisiae*, *Zymomonas mobilis* и др. [71, 117–119]. Биотехнологическое производство биоэтанола имеет как преимущества (высокая селективность ферментов, щадящие условия реакции, не требуется предварительное высушивание), так и недостатки (высокая себестоимость, необходимость предварительной обработки лигноцеллюлозного сырья и постоянного удаления образующегося этанола) [71, 117]. Выход сбраживаемых моносахаридов из ЖСС можно увеличить путём предварительной обработки ультразвуком или нагреванием в сочетании с ферментативным гидролизом [120]. Согласно [119], широкому производству и применению биоэтанола в России препятствует отсутствие необходимой государственной поддержки, достаточного рынка сбыта, неразвитые инфраструктура и система технической эксплуатации транспортных двигателей на топливных смесях с ним.

Путём анаэробного сбраживания свежего или силосованного ЖСС можно получить биогаз (основной компонент – метан) [51, 71, 117, 118]. Подобные производства имеются в Польше, Германии, Великобритании, Молдове, Украине, России [51, 121]. Несмотря на ограничивающие выход биогаза факторы (лигнин и кристаллическая целлюлоза ограничивают доступ гидролизующих ферментов к целлюлозе и гемицеллюлозе), его выход настолько высок, что производство считается экономически выгодным [117]. Для производства биогаза в сезон производства сахара из свёклы (август – январь) используется свежий ЖСС, вне сезона – силосованный [51]. Прогнозные показатели ежегодной экономической эффективности использования биогазовой станции на сахарных заводах в России составляют 120–230 руб. на каждую тонну переработанного сырья сахарной свёклы, окупаемость – 10–12 лет [122–124].

Из других продуктов с добавленной стоимостью, изготовленных с использованием ЖСС, упоминаются биодизель [71], композитные строительные материалы [125, 126], биоуголь и пиролизный газ [127], электроды для суперконденсаторов [128], а также различные продукты биотехнологического синтеза [71, 117]. Таким образом, рециклинг позволяет снизить количество перерабатываемых отходов свёклосохарных предприятий с 9 т до 200 г на каждую тонну производимого сахара [129].

Заключение

В данной работе обсуждаются существующие и перспективные области применения крупнотоннажного отхода сахарной промышленности – свекловичного жома. Россия – крупнейший производитель и экспортёр сухого ЖСС, основным потребителем которого является животноводство. Однако отсутствие сушильных установок на ряде предприятий, высокая энергозатратность сушки жома, недостаток производственных мощностей для сушки не позволяют переработать весь объём жома в сушёный. Поэтому ряд российских предприятий использует ЖСС для производства в небольших объёмах пектина или биогаза. При этом объём перерабатываемых отходов сокращается. Тем не менее, возможен более глубокий рециклинг жома с получением сорбентов и/или структураторов для деконтаминации окружающей среды, а также биodeградируемых материалов и продуктов «зелёной» химии. К сожалению, в настоящее время данные направления остаются в России на уровне научных разработок без внедрения в практику.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка состояния трансформированных экосистем подзоны южной тайги, методические подходы к их биоремедиации», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 125021402208-5.

References

1. Kachanova L.S., Bondarenko A.M. Involvement of potential organic waste into the circular economy as a tool ensuring the economic security of the state // *Economic Security*. 2022. V. 5. No. 4. P. 1517–1530 (in Russian). doi: 10.18334/ecsec.5.4.115059
2. AlZahabi S., Mamdouh W. Valorization of citrus processing waste into high-performance bionanomaterials: green synthesis, biomedicine, and environmental remediation // *RSC Adv*. 2025. V. 15. No. 43. P. 36534–36595. doi: 10.1039/d5ra04307g
3. Vinogradova K.I. Reclamation of disturbed lands by agrarian industry wastes // *Natural sciences: current issues and social challenges: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Astrakhan: Izdatelskiy dom “Astrakhanskiy universitet”, 2021. P. 69–75 (in Russian).
4. Golubev I.G., Shvanskaya I.A., Konovalenko L.Yu., Lopatnikov M.V. Waste recycling in agriculture. Moskva: FGBNU “Rocinformagrotekh”, 2011. 296 p. (in Russian)
5. Zamotaev I. V., Gracheva R.G., Mikheev P.V., Konopliankova Yu.V. Formation and transformation of soils

in the areas of sugar industry waste disposal (review) // Pochvovedenie. 2022. No. 8. P. 949–961 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X22080159

6. Slavyansky A.A., Mitroshina D.P., Gribkova V.A., Ermolaev V.A., Bondarchuk O.N. Beet pulp of sugar production and prospects for its use // Vestnik of MSTU. 2023. V. 26. No. 3. P. 292–303 (in Russian). doi: 10.21443/1560-9278-2023-26-3-292-303

7. Starodubtsev D.A. Beet tops and beet pulp // Production and processing of agricultural products: materialy VIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. Imperatora Petra I, 2022. P. 198–203 (in Russian).

8. Dobruk E.A., Taras A.M., Verttinskaya O.V., Yarosh A.E. Efficiency of feed mix usage based on sugar beet pulp in the nutritient of cattle // Agriculture – problems and prospects: sbornik nauchnykh trudov. Grodno: Grodnenskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2017. P. 24–36 (in Russian).

9. Zobova S.N., Ostrikov A.N., Frolova L.N., Kopylov M.V., Bogomolov I.S. Influence of technological modes on changes in the composition of beet pulp during its processing at the Borinsky sugar plant // Vestnik VGUIT. 2021. V. 83. No. 1. P. 71–77 (in Russian). doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-71-77

10. Lesnov A.P. Processing of beet pulp into high-protein feed // Sugar. 2010. No. 8. P. 2–5 (in Russian).

11. Radchikov V.F., Tsay V.P., Gurin V.K., Kot A.N., Sapsaleva T.L. Beet pulp in cattle feeding // Sugar. 2010. No. 8. P. 2–5 (in Russian).

12. Schwab E.C., Schwab C.G., Shaver R.D., Girard C.L., Putnam D.E., Whitehouse N.L. Dietary forage and nonfiber carbohydrate contents influence B-vitamin intake, duodenal flow, and apparent ruminal synthesis in lactating dairy cows // J. Dairy Sci. 2006. V. 89. No. 1. P. 174–187. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72082-3

13. Beet pulp. Overview of foreign economic activity [Internet resource] https://aemcx.ru/wp-content/uploads/2024/06/obzor-ved_zhom-sveklovichnyj.pdf (Accessed: 21.05.2025)

14. Donchenko L.V., Lastkov D.O. On the relevance of deep processing of beet pulp in modern conditions // Sugar. 2023. No. 2. P. 40–45 (in Russian). doi: 10.24412/2413-5518-2023-2-40-45

15. Lemesh E.A., Gulakov A.N. Increasing the productivity and quality of milk from dairy cows through the use of probiotic feed additives in the diet // Vestnik Chuvash SAU. 2025. No. 1. P. 107–111 (in Russian). doi: 10.48612/vch/vxxd-vgnf-g2xd

16. Skrypka S.N., Shvetsov N.N., Chekhranova S.V., Nikolaev S.I., Vorontsova E.S., Ivanov A.V. The efficiency of using “Ultra” premix when feeding dairy cows // Proc. Lower Volga Agro-University Comp. 2025. No. 1(79). P. 348–355 (in Russian). doi: 10.32786/2071-9485-2025-01-36

17. Besarab G.V. The use of dry beet pulp, molasses, and defecate in the young cattle feeding // Aktualnye problemy intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva. 2025. No. 28-1. P. 151–159 (in Russian).

18. Radchikov V.F., Ganushchenko O.F. Beet pulp in cattle feeding // Nashe selskoe khozyaystvo. 2025. No. 16. P. 18–21 (in Russian).

19. Sapsaleva T.L., Radchikova G.N., Glivanskiy E.O., Slozhenkina M.I., Izmaylovich I.B., Sadomov A.N., Sintserova A.M., Skripin P.V., Kozlikin A.V. Efficiency of using secondary sugar production products in cow diets // Engineering: theory and practice: materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Pinsk: Poleskiy gosudarstvennyy universitet, 2024. P. 136–139 (in Russian).

20. Dudaev Sh.M. The influence of beet pulp on the dairy productivity of Montbilliard cows // Breakthrough scientific research as an engine of science in agriculture: materialy dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Groznyy: Chechenskiy gosudarstvennyy universitet imeni Akhmata Abdulkhamidovicha Kadyrova, 2024. P. 57–61 (in Russian). doi: 10.36684/140-1-2024-57-61

21. Azimova G.V., Yuferev R.A. Efficiency of using sugarbeet pulp in diets of highly productive cows // Agrarnaya Rossiya. 2024. No. 12. P. 6–8 (in Russian). doi: 10.30906/1999-5636-2024-12-6-8

22. Lamminen M., Halmemies-Beauchet-Filleau A., Pétursdóttir A.H., Qin N., Desnica N., Bell L., Gunnlaugsdóttir H., Honkanen A., Kokkonen T., Stergiadis S., Vanhatalo A. Effects of protein source and seaweed supplementation on mineral intake, milk mineral concentrations, and iodine transfer efficiency from feed to milk in lactating dairy cows // J. Dairy Sci. 2025. doi: 10.3168/jds.2025-26779

23. Malekkhahi M., Razzaghi A., Vyas D. Replacement of corn silage with shredded beet pulp and dietary starch concentration: Effects on performance, milk fat output, and body reserves of mid-lactation dairy cows // J. Dairy Sci. 2023. V. 106. No. 3. P. 1734–1745. doi: 10.3168/jds.2022-22415

24. Lyu J., Yang Z., Wang E., Liu G., Wang Y., Wang W., Li S. Possibility of using by-products with high NDF content to alter the fecal short chain fatty acid profiles, bacterial community, and digestibility of lactating dairy cows // Microorganisms. 2022. V. 10. No. 9. Article No. 1731. doi: 10.3390/microorganisms10091731

25. Mohsen M.K., Ali M.F., Gaafar H.M., Al-Sakka T.S., Aboelenin S.M., Soliman M.M., Dawood M.A.O. Impact of dry sugar beet pulp on milk production, digestibility traits, and blood constituents of dairy Holstein cows // Animals (Basel). 2021. V. 11. No. 12. Article No. 3496. doi: 10.3390/ani11123496

26. Peleki C., Kiosis E., Polizopoulou Z.S., Tsousis G., Fthenakis G.C., Giadinis N.D., Brozos C. Effect of sugar beet pulp and anionic salts on metabolic status and mineral homeostasis during the peri-parturient period of dairy sheep // Animals. 2023. V. 13. No. 2. Article No. 213. doi: 10.3390/ani13020213

27. Poli C.H.E.C., Thornton-Kurth K.J., Legako J.F., Bremm C., Hampel V.S., Hall J., Ipharraguerre I.R., Vilalba J.J. The effect of plant bioactive compounds on lamb performance, intake, gastrointestinal parasite burdens, and lipid peroxidation in muscle // *J. Anim. Sci.* 2021. V. 99. No. 1. Article No. skab009. doi: 10.1093/jas/skab009
28. Bai Y., Zhou X., Zhao J., Wang Z., Ye H., Pi Y., Che D., Han D., Zhang S., Wang J. Sources of dietary fiber affect the SCFA production and absorption in the hindgut of growing pigs // *Frontiers in Nutrition.* 2022. V. 8. Article No. 719935. doi: 10.3389/fnut.2021.719935
29. Feng L., Luo Z., Wang J., Wu K., Wang W., Liu Z., Wen J., Wang Z., Duns G.J., Ma X., Tan B. Effects of different ratios of soluble to insoluble dietary fiber on growth performance and intestinal health of piglets // *Anim. Nutr.* 2024. V. 18. P. 257–271. doi: 10.1016/j.aninu.2024.05.005
30. Huang S., Cui Z., Hao X., Cheng C., Chen J., Wu D., Luo H., Deng J., Tan C. Dietary fibers with low hydration properties exacerbate diarrhea and impair intestinal health and nutrient digestibility in weaned piglets // *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2022. V. 13. No. 1. Article No. 142. doi: 10.1186/s40104-022-00771-7
31. Badaras S., Ruzauskas M., Gruzauskas R., Zokaityte E., Starkute V., Klupsaite D., Mockus E., Klementaviciute J., Vadopalas L., Zokaityte G., Dauksiene A., Bartkevics V., Bartkiene E. Different creep compound feed formulations for new born piglets: influence on growth performance and health parameters // *Front. Vet. Sci.* 2022. V. 9. Article No. 971783. doi: 10.3389/fvets.2022.971783
32. Sharaskina O.G. Dietary feeding techniques for body weight control in horses with equine metabolic syndrome // *Veterinaria i kormlenie.* 2024. No. 6. P. 106–108 (in Russian). doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2024-6-24
33. Popova S.A., Skoptsova T.I. Modern approaches to horse feeding // *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii.* 2020. No. 1(30). P. 14–19 (in Russian).
34. Souza L.A., Hunka M.M., Rezende Júnior S.F., Silva C.J.F.L.D., Manso H.E.C.D.C.C., Simões J., Coelho C.S., Fazio F., Aragona F., Manso Filho H.C. Potential use of beet-pulp concentrate supplementation in athletic horse // *Heliyon.* 2024. V. 11. No. 1. Article No. e40961. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40961
35. Ford T., McAdams Z.L., Townsend K.S., Martin L.M., Johnson P.J., Ericsson A.C. Effect of sugar beet pulp on the composition and predicted function of equine fecal microbiota // *Biology (Basel).* 2023. V. 12. No. 9. Article No. 1254. doi: 10.3390/biology12091254
36. Degtyar A.S., Levandovskaya A.V. Meat productivity and meat quality of rabbits using vitamin-mineral complexes // *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2025. No. 2(56). P. 88–94 (in Russian).
37. Kvartnikova E.G., Kosovskiy G.Yu., Krovina E.V. Features of feeding young rabbits // *Agrarian Bulletin of the Urals.* 2023. V. 23. No. 12. P. 74–82 (in Russian). doi: 10.32417/1997-4868-2023-23-12-74-82
38. Arce O., Alagón G., Ródenas L., Martínez-Paredes E., Moya V.J., Cervera C., Pascual J.J. Effect of dietary level of beet pulp, with or without molasses, on health status, growth performance, and carcass and digestive tract traits of rabbits // *Animals.* 2022. V. 12. No. 23. Article No. 3441. doi: 10.3390/ani12233441
39. Shatskikh E.V., Latypova E.N. Additives containing different phytobiotics in diets for layers // *Ptitsvodstvo.* 2025. No. 1. P. 30–36 (in Russian). doi: 10.33845/0033-3239-2025-74-1-30-36
40. Dolgov E.P., Kuzminova E.V., Semenenko K.A., Abramov A.A. Influence of Sorbidedxyl on hematological blood parameters in broiler chickens with experimental mycotoxicosis // *Collection of Scientific Papers of KRCAHVM.* 2024. V. 13. No. 1. P. 284–288 (in Russian). doi: 10.48612/sbornik-2024-1-65
41. Kardel A.A., Kazemifard M., Rezaei M., Teimouri Yansari A. Broiler responses to dietary fibre sources at different ages: effects on growth performance, nutrient digestibility, blood parameters and intestinal morphology // *Vet. Med. Sci.* 2025. V. 11. No. 4. Article No. e70471. doi: 10.1002/vms3.70471
42. Khaustov V.N., Pilyukshina Ye.V. Use of dried beet chips in broiler-duckling nutrition // *Bulletin of Altai State Agricultural University.* 2014. No 1. P. 83–86 (in Russian).
43. Zaremba I., Grabowicz M., Biesek J. Effects of feeding silage of beet pulp or maize on the growth performance, meat quality, and production economics of broiler ducks // *Poult. Sci.* 2024. V. 103. No. 3. Article No. 103441. doi: 10.1016/j.psj.2024.103441
44. Bamedi A., Salari S., Baghban F. Changes in performance, cecal microflora counts and intestinal histology of Japanese quails fed diets containing different fibre sources // *Vet. Anim. Sci.* 2024. V. 25. Article No. 100386. doi: 10.1016/j.vas.2024.100386
45. Montserrat-Malagarriga M., Castillejos L., Salas-Mani A., Torre C., Martín-Orde S.M. The impact of fiber source on digestive function, fecal microbiota, and immune response in adult dogs // *Animals (Basel).* 2024. V. 14. No. 2. Article No. 196. doi: 10.3390/ani14020196
46. Le Bon M., Carvell-Miller L., Marshall-Jones Z., Watson P., Amos G. A novel prebiotic fibre blend supports the gastrointestinal health of senior dogs // *Animals (Basel).* 2023. V. 13. No. 20. Article No. 3291. doi: 10.3390/ani13203291
47. Finet S., He F., Clark L.V., de Godoy M.R.C. Functional properties of miscanthus fiber and prebiotic blends in extruded canine diets // *J. Anim. Sci.* 2022. V. 100. No. 4. Article No. skac078. doi: 10.1093/jas/skac078
48. Donadelli R.A., Dogan H., Aldrich C.G. The effects of fiber source on extrusion processing parameters and kibble characteristics of dry cat foods // *Transl. Anim. Sci.* 2020. V. 4. No. 4. Article No. txaa185. doi: 10.1093/tas/txaa185
49. Bayurov L.I., Mikheeva K.D. Comparative characteristics of dry foods of foreign production for adult

cats // Scientific Journal of KubSAU. 2023. No. 3(192). P. 174–180. doi: 10.36718/1819-4036-2023-3-174-180

50. Novikova A.V. Beet pulp as a possible source of inhibitory substances of the human food chain // Bulliten KrasSAU. 2023. No. 3. P. 174–180 (in Russian). doi: 10.36718/1819-4036-2023-3-174-180

51. Ptak M., Skowrońska A., Pińkowska H., Krzywonos M. Sugar beet pulp in the context of developing the concept of circular bioeconomy // Energies. 2021. V. 15. Article No. 175.

52. Buryakov N.P. The role of by-products of sugar beet production in carbohydrate nutrition of animals // Sugar. 2023. No. 12. P. 44–51 (in Russian). doi: 10.24412/2413-5518-2023-12-44-51

53. Gruber T., Fliegerová K., Terler G., Resch R., Zebeli Q., Hartinger T. Mixed ensiling of drought-impaired grass with agro-industrial by-products and silage additives improves the nutritive value and shapes the microbial community of silages // Grass and Forage Science 2024. V. 79. P. 179–197.

54. Chernikov A.M. Dried beet pulp production method // Patent RU 2542530. Application: 2013137985/13, 13.08.2013. Date of publication: 20.02.2015. Bull. 5 (in Russian).

55. Chernikov A.M. Method for production of dried beet pulp // Patent RU 2719156. Application: 2019110360, 08.04.2019. Date of publication: 17.04.2020. Bull. 11 (in Russian).

56. Kulneva N.G., Zhuravlev M.V., Zirka N.E. Study of the influence of thermochemical treatment of beet chips on the water-retaining capability of beet pulp // Innovative technologies in the food industry: science, education and production: VIII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet inzhenernykh tekhnologiy, 2023. P. 110–113 (in Russian).

57. Jeong I., Na S.W., Kang H.J., Park S.J., Jung D.J.S., Beak S.H., Lee J., Kim D.H., Kim H.J., Malekkhahi M., Ranaweera K.K.T.N., Baik M. Partial substitution of corn grain in the diet with beet pulp reveals increased ruminal acetate proportion and circulating insulin levels in Korean cattle steers // Animals (Basel). 2022. V. 12. No. 11. Article No. 1419. doi: 10.3390/ani12111419

58. Wilkowska A., Berłowska J., Nowak A., Motyl I., Antczak-Chrobot A., Wojtczak M., Kunicka-Styczyńska A., Binczarski M., Dziugan P. Combined yeast cultivation and pectin hydrolysis as an effective method of producing prebiotic animal feed from sugar beet pulp // Biomolecules. 2020. V. 10. No. 5. Article No. 724. doi: 10.3390/biom10050724

59. Liu B., Cui Y., Ali Q., Zhu X., Li D., Ma S., Wang Z., Wang C., Shi Y. Gut microbiota modulate rabbit meat quality in response to dietary fiber // Front. Nutr. 2022. V. 9. Article No. 849429. doi: 10.3389/fnut.2022.849429

60. Huang D., Wang J., Zhang L., Li Z., Liu Q. Effects of dietary fibers with different sources on cecal fermentation

parameters and microflora amount of Fujian yellow rabbits // Chinese Journal of Animal Nutrition. 2019. V. 31. No. 1. P. 236–242 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1006-267x.2019.01.029

61. Boudra H., Rouillé B., Lyan B., Morgavi D.P. Presence of mycotoxins in sugar beet pulp silage collected in France // Anim. Feed Sci. Technol. 2015. V. 205. P. 131–135. doi: 10.1016/j.anifeeds.2015.04.010

62. Lopes P., Sobral M.M.C., Lopes G.R., Martins Z.E., Passos C.P., Petronilho S., Ferreira I.M.P.L.V.O. Mycotoxins' prevalence in food industry by-products: a systematic review // Toxins (Basel). 2023. V. 15. No. 4. Article No. 249. doi: 10.3390/toxins15040249

63. Ignatiev B.Yu. Possibilities of reducing the risks of microbiological contamination in the supply of beet pulp using organic acids // Sugar. 2018. No. 1. P. 34–35 (in Russian).

64. Sabetova L.A., Levina M.V. Perspective directions of secondary waste utilization sugar beet production // Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex – healthy food products. 2017. No. 5. P. 132–141 (in Russian).

65. Balabanova M.Yu., Panov S.Yu., Marnov A.Yu. Research of technical solutions to environmental and energy problems during pyrolysis processing of large-tonnage solid organic waste // Vestnik VGUIT. 2025. V. 87. No. 1. P. 243–249 (in Russian). doi: 10.20914/2310-1202-2025-1-243-249

66. Borzenkov A.A. Problems of beet pulp use by sugar factories // Sugar. 2023. No. 11. P. 38–39 (in Russian). doi: 10.24412/2413-5518-2023-11-38-39

67. Ermolaev V.A. Secondary raw materials for sugar production and directions for its processing // Innovatsii i prodovolstvennaya bezopasnost. 2024. No. 1. P. 87–94 (in Russian). doi: 10.31677/2311-0651-2023-43-1-87-94

68. Gurin A.G., Rezvyakova S.V. Analysis of the economic efficiency of using sugar production waste in spring wheat crops // Innovations in agriculture: problems and prospects. 2020. No. 2. P. 162–168 (in Russian).

69. Kozhukhova T.S. Changes in yield and agrochemical properties of the soil when using unconventional organic fertilizers on spring barley crops // Bulletin of agrarian science. 2023. No. 2. P. 189–194 (in Russian). doi: 10.17238/issn2587-666X.2023.2.189

70. Makarkin A.A., Khamitov L.A., Gorkova I.V., Kostromicheva E.V., Popova A.Yu., Yakovleva I.V. Prospects for obtaining biofertilizers based on lignocellulose waste from the agro-industrial complex // Innovative technologies for the production of competitive, environmentally friendly livestock products: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Chita: ZabAI, 2024. P. 308–312 (in Russian).

71. Jiménez-Islas D., Pérez-Romero M.E., Ventura-Cruz I., Flores-Romero M.B. Sugar beet pulp and research efforts to diversify its use // Sugar beet cultivation, management and processing / Eds. V. Misra, S. Srivastava,

A.K. Mall. Singapore: Springer, 2022. doi: 10.1007/978-981-19-2730-0_47

72. Pączka G., Garczyńska M., Mazur-Pączka A., Podolak A., Szura R., Skoczko I., Kostecka J. Vermicomposting of sugar beet pulp using *Eisenia fetida* (Sav.) earthworms // Annual Set the Environment Protection. 2018. V. 20. P. 588–601.

73. Melnikova A.S., Kostriukova N.V., Elizarev A.N., Sultanova D.S. Method of producing vermicompost from sugar production wastes // Patent RU 2840004 C1. Application: 2024129971, 04.10.2024. Date of publication: 15.05.2025. Bull. 14 (in Russian).

74. Sultanova D.S., Kostriukova N.V., Nasyrova E.S., Melnikova A.S., Akhtiamova P.R. Method of producing biocompost from sugar production wastes // Patent RU 2842538 C1. Application: 2024139332, 25.12.2024. Date of publication: 30.06.2025. Bull. 19 (in Russian).

75. Nikiforova T.E., Gabrin V.A., Razgovorov P.B. Peculiarities of sorption of heavy-metal ions by polysaccharide and polyamide biopolymers // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. 2023. V. 59. No. 3. P. 313–324. doi: 10.1134/S2070205123700363

76. Vurasko A.V., Simonova I.E., Minakova A.R. Sorption materials on the basis of technical cellulose from straw and rice husk // Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2019. No. 226. P. 139–154 (in Russian).

77. Gérente C., du Mensil P.C., Andrès Y., Thibault J.F., Cloiree P.L. Removal of metal ions from aqueous solution on low cost natural polysaccharides: sorption mechanism approach // React. Funct. Polym. 2000. V. 46. P. 135–144. doi: 10.1016/S1381-5148(00)00047-X

78. Muratova A.R., Kostriukova N.V. Analysis of sorbents for oil spill response // Russia and the world community: problems of demography, ecology and public health: sbornik statey VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Penza: Penzenskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2024. P. 154–159 (in Russian).

79. Kostriukova N.V., Melnikova A.S., Platonova A.I. Analysis of sorbing characteristics of modified sugar production waste // Vestnik NTsBZhD. 2022. No. 3(53). P. 108–116 (in Russian).

80. Ulanova D.E., Zhitin Yu.I., Stekolnikova N.V. The effect of beet pulp and distillery stillage on the functioning of agrocoenosis in the central chernozem region // Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2015. No. 4. P. 27–33 (in Russian).

81. Meshcheryakov S.V., Eremin I.S., Sidorenko D.O., Kotelev M.S., Zaitseva E.A., Lavrentiev A.E. Obtaining of sorbing material based on sugar beet pulp // Environmental protection in oil and gas complex. 2019. No. 6. P. 10–16 (in Russian). doi: 10.33285/2411-7013-2019-6(291)-10-16

82. Ryabinina E.I., Andreeva N.A., Nikitina T.N., Zotova E.E. The evaluation of the dried beet pulp detoxic properties based on the model experiments // Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy. 2018. No. 2. P. 49–56 (in Russian).

83. Dronnet V.M., Renard C.M.G.C., Axelos M.A.V., Thibault J.-F. Binding of divalent metal cations by sugar-beet pulp // Carbohydr. Polym. 1997. V. 34. No. 1–2. P. 73–82. doi: 10.1016/S0144-8617(97)00055-6

84. Reddad Z., Gérente C., Andrès Y., Le Cloirec P. Lead removal by a natural polysaccharide in membrane reactors // Water Sci. Technol. 2004. V. 49. No. 1. P. 163–170.

85. Aksu Z., İsoğlu İ.A. Removal of copper(II) ions from aqueous solution by biosorption onto agricultural waste sugar beet pulp // Process Biochem. 2005. V. 40. P. 3031–3044

86. Pehlivan E., Yanik B.H., Ahmetli G., Pehlivan M. Equilibrium isotherm studies for the uptake of cadmium and lead ions onto sugar beet pulp // Bioresour. Technol. 2008. V. 99. No. 9. P. 3520–3527. doi: 10.1016/j.biortech.2007.07.052

87. Kuznetsova T.A., Pestov N.A., Revin V.V. Study of the adsorption properties of plant cellulose with respect to nickel ions // Chemistry of plant raw material. 2020. No. 2. P. 307–314 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.2020026573

88. Shaikhieva K.I., Stepanova S.V., Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V. Use of native and modified samples of sugar beet pulp (*Beta vulgaris*) as sorption materials to remove pollutants from water environments // Chemistry of plant raw material. 2024. No. 3. P. 49–70 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.20240313555

89. Lisichkin G.V., Kulakova I.I. Elimination of emergency oil spills: state of the art and problems // Russian Journal of Applied Chemistry. 2022. V. 95. No. 9. P. 1263–1289. doi: 10.1134/s1070427222090014

90. Dzhabrailova Kh.S., Aleskerova L.E., Shapiro T.N., Lobakova E.S., Dedov A.G. Biocomposite materials for oil spill response in the arctic conditions // Environmental protection in oil and gas complex. 2024. No. 5. P. 6–17 (in Russian).

91. Grosheva S.V., Tikhonova I.O. The potential of using large-tonnage organic waste in the bioremediation of oil-contaminated soils // II Lavyorov Readings. Arctic: current issues and challenges: sbornik nauchnykh materialov Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Arkhangelsk: JSC “Tipografiya No. 2”, 2023. P. 386–388 (in Russian).

92. Grosheva S.V., Shlapak S.A., Tikhonova I.O. New sorbents from large-tonnage agro-industrial waste // Waste processing technologies to produce new products: materialy VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kirov: Vyatka State University, 2024. P. 43–46 (in Russian).

93. Grosheva S.V., Tikhonova I.O. Method of producing sorbent from granulated beet pulp // Patent RU 2821395 C1. Application: 2023135150, 26.12.2023. Date of publication: 24.06.2024. Bull. 18 (in Russian).

94. Mata Y.N., Blázquez M.L., Ballester A., González F., Muñoz J.A. Sugar-beet pulp pectin gels as biosorbent for heavy metals: preparation and determination of biosorption

and desorption characteristics // Chem. Eng. J. 2009. V. 150. No. 2–3. P. 289–301. doi: 10.1016/j.cej.2009.01.001

95. Shaikhiev I.G., Stepanova S.V., Shaikhiya K.I., Mavlethaeva A.I. Investigation of waste from sugar beet processing as a sorption material of mineral oils // Herald of Technological University. 2015. V. 18. No. 17. P. 258–261 (in Russian).

96. Ivanova E.A., Lobakova E.S., Idiatulov R.K., Shapiro T.N., Sandzhieva D.A., Kuznetsova O.V., Zaitseva Yu.N., Dzhabrailova Kh.S., Dedov A.G. Biocomposite materials for purification of aqueous media contaminated with hydrocarbons // Pet. Chem. 2019. V. 59. P. 420–426. doi: 10.1134/S096554411904008X

97. Lazareva A.M., Grosheva S.V., Tikhonova I.O. Prospects for deriving carbonizates from large-tonnage organic wastes // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2023. V. 37. No. 12. P. 98–101 (in Russian).

98. Kulikova N.V., Grosheva S.V., Tikhonova I.O. Lysimetric characterization of potential structurators for bioremediation // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2022. V. 36. No. 12. P. 126–128 (in Russian).

99. Muratova A.Y., Panchenko L.V., Dubrovskaya E.V., Lyubun' E.V., Golubev S.N., Sungurtseva I.Yu., Zakharevich A.M., Biktasheva L.R., Galitskaya P.Yu., Turkovskaya O.V. Bioremediation potential of biochar-immobilized cells of *Azospirillum brasilense* // Microbiology. 2022. V. 91. P. 514–522. doi: 10.1134/S0026261722601336

100. Mu Y.Q., Song J.B., Zhao M., Ren P., Liu H.Y., Huang X. Integrative omics analysis of plant-microbe synergies in petroleum pollution remediation // PeerJ. 2025. V. 13. Article No. e19396. doi: 10.7717/peerj.19396

101. Grosheva S.V., Tikhonova I.O. Best environmental practices in bioremediation of oil-contaminated lands // Environmental problems of industrial cities: sbornik nauchnykh trudov 11 mezhdunarodnoy konferentsii. Saratov: Amirit JSC, 2023. P. 128–130 (in Russian).

102. Lundin T., Karisalmi K., Sojakka H. Method for production of paper or cardboard // Patent RU 2754187 C2. Application: 2019134418, 29.03.2018. Date of publication: 30.08.2021. Bull. 25 (in Russian).

103. Revin V.V., Pestov N.A. Method of producing pectin and cellulose from beet pulp // Patent RU 2580884 C1. Application: 2014154069/13, 29.12.2014. Date of publication: 10.04.2016. Bull. 10 (in Russian).

104. When sugar beets pack sugar [Internet resource] <https://packaging-journal.de/english-2022-07-crown-van-gelder/> (Accessed: 16.08.2025)

105. Nemenushchaya L.A., Manokhina A.A. Ecological technologies of recycling vegetable raw materials // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2023. No. 8(314). P. 30–35 (in Russian). doi: 10.33267/2072-9642-2023-8-30-35

106. Kuzmin A.M., Radaikina E.A. Biodegradable polymer composition for packaging purposes // Patent RU 2805927 C1. Application: 2023110651, 25.04.2023. Date of publication: 24.10.2023. Bull. 30 (in Russian).

107. Drannikov A.V., Shakhov S.V., Erofeevskaya M.O., Sukhanov P.M. Method for production of biodegradable package from secondary material resources of food production // Patent RU 2745895 C1. Application: 2020112260, 26.03.2020. Date of publication: 02.04.2021. Bull. 10 (in Russian).

108. Vodyakov V.N., Shabarin A.A., Shabarin A.A., Kuzmin A.M. Polymer composition for producing biodegradable articles // Patent RU 2714887 C1. Application: 2016124877, 21.06.2016. Date of publication: 31.08.2017. Bull. 25 (in Russian).

109. Kirsh I.A., Beznaeva O.V., Bannikova O.A., Ananov V.V., Korovikova I.A., Romanova V.A., Sdobnikova O.A., Tveritnikova I.S. Biologically degradable polymer composition // Patent RU 2714887 C1. Application: 2018141075, 22.11.2018. Date of publication: 20.02.2020. Bull. 5 (in Russian).

110. Pavlovskaya N.E., Gorkova I.V., Gavrilova A.Yu., Gagarina I.N. Study of the effect of composite fillers on the rheological properties of polymers to create a biodegradable film // Ecology and Industry of Russia. 2020. V. 24. No. 3. P. 29–33 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2020-3-29-33

111. Hassan E., Fadel S., Abou-Elseoud W., Mahmoud M., Hassan M. Cellulose nanofibers/pectin/pomegranate extract nanocomposite as antibacterial and antioxidant films and coating for paper // Polymers. 2022. V. 14. No. 21. Article No. 4605. doi: 10.3390/polym14214605

112. Liu L., Fishman M.L., Hicks K.B., Liu C.K. Biodegradable composites from sugar beet pulp and poly(lactic acid) // J. Agric. Food Chem. 2005. V. 53. No. 23. P. 9017–9022. doi: 10.1021/jf058083w

113. Nikiforova T.E., Guzenko O.A. Composition for producing biodegradable polymer material and biodegradable polymer material on its basis // Patent RU 2 796 732 C1. Application: 2022120925, 01.08.2022 Date of publication: 29.05.2023 Bull. 16 (in Russian).

114. Malinkina O.N., Papkina V.Yu., Shipovskaya A.B. Composition for obtaining biodegradable polymer material and biodegradable polymer material on its basis // Patent RU 2669865 C1. Application: 2017136410, 16.10.2017. Date of publication: 16.10.2018. Bull. 29 (in Russian).

115. Liu B., Zhang J., Liu L., Hotchkiss A.T. Preparation and properties of water and glycerol-plasticized sugar beet pulp plastics // J. Polym. Environ. 2011. V. 19. P. 559–567. doi: 10.1007/s10924-011-0322-4

116. Serizawa R., Milotskyi R., Iwata S., Fujie T., Wada N., Takahashi K. Synthesis and characterization of thermoplastic resin from sugar beet polysaccharides via one-step transesterification // Carbohydr. Polym. 2025. V. 15. No. 352. Article No. 123224. doi: 10.1016/j.carbpol.2025.123224

117. Tomaszewska J., Bieliński D., Binczarski M., Berłowska J., Dziugan P., Piotrowski J., Stanishevsky A., Witońska I.A. Products of sugar beet processing as raw materials for chemicals and biodegradable polymers //

RSC Adv. 2018. V. 8. No. 6. P. 3161–3177. doi: 10.1039/C7RA12782K

118. Usmani Z., Sharma M., Diwan D., Tripathi M., Whale E., Jayakody L.N., Moreau B., Thakur V.K., Tuohy M., Gupta V.K. Valorization of sugar beet pulp to value-added products: A review // *Bioresour. Technol.* 2022. V. 346. Article No. 126580. doi: 10.1016/j.biortech.2021.126580

119. Penkin A.L., Ruppel' Ye.A., Vorob'yov A.A., Sobolev A.A., Novoselsky I.Yu. On the influence of fuel bioethanol on the operational properties of transport engines // *Proceedings of Petersburg Transport University.* 2023. V. 20. No. 4. P. 1027–1033. doi: 10.20295/1815-588X-2023-4-1027-1033.

120. Rezić T., Oros D., Marković L., Kracher D., Ludwig R., Šantek B. Integrated hydrolyzation and fermentation of sugar beet pulp to bioethanol // *J. Microbiol. Biotechnol.* 2013. V. 23. P. 1244–1252. doi: 10.4014/jmb.1210.10013

121. Shvechikova A. Waste will find a way out [Internet resource] <https://www.kommersant.ru/doc/7958532?ysclid=mgz54ghk2t479353234> (Assessed: 20.08.2025)

122. Mansurov R.E. Capacity of sugar beet subcomplex for biogas production from beet pulp in Tula Region // *Agrarian science.* 2018. No. 9. P. 57–62 (in Russian).

123. Mansurov R.E. Feasibility study of biogas production in the sugar beet subcomplex of the Nizhny Novgorod Region // *Vestnik of Lobachevsky state university of Nizhni Novgorod. Series: Social sciences.* 2018. No. 4. P. 23–29 (in Russian).

124. Mansurov R.E., Zasedova A.A. Prospects for the development of the sugar beet sub-complex of the republic of Bashkortostan through the modernization of sugar production using biogas plants // *PNRPU sociology and economics bulletin.* 2019. № 1 P. 279–295 (in Russian). doi: 10.15593/2224-9354/2019.1.23

125. Harb E., Maalouf C., Bliard C., Tenpierik M., Lachi M., Bogard F., Polidori G. Thermal performance of starch/beet-pulp composite bricks for building insulation at a wall scale // *Case Studies in Construction Materials.* 2023. V. 18. Article No. e01851. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01851

126. Borysiuk P., Jencyk-Tolloczko I., Auriga R., Kordzikowski M. Sugar beet pulp as raw material for particleboard production. // *Ind. Crop. Prod.* 2019. V. 141. Article No. 111829. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111829

127. Chojnacki J., Kielar J., Kukiełka L., Najser T., Pachuta A., Berner B., Zdanowicz A., Frantík J., Najser J., Peer V. Batch pyrolysis and co-pyrolysis of beet pulp and wheat straw // *Materials.* 2022. V. 15. Article No. 1230. doi: 10.3390/ma15031230

128. Selinger J., Meinander K., Wilson B.P., Abbas Q., Hummel M., Spirk S. Sweet side streams: sugar beet pulp as source for high-performance supercapacitor electrodes // *ACS Omega.* 2024. V. 9. No. 4. P. 4733–4743. doi: 10.1021/acsomega.3c07976

129. Our processes result in almost zero waste [Internet resource] <https://www.britishsugar.co.uk/about-sugar/co-products> (Assessed: 20.08.2025)