

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ЛИГНИНА ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ



¹Е.В. Попцова, ¹И.А. Суханов, ¹И.М. Потравный, ¹В.С. Кондрев

¹Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва

Представлены результаты исследований по утилизации отходов лигнина, образующегося на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности, при производстве резинотехнических изделий. Приведены данные по объемам образования отходов лигнина в разрезе крупнейших ЦБК страны. На примере АО "Архангельский ЦБК" в г. Новодвинске выполнена потенциальная оценка ущерба от размещения отходов лигнина. Показаны направления повторного использования отходов лигнина в экономике страны, в том числе для изготовления пеллет, добавок в битум. Выявлены негативные последствия захоронения и сжигания отходов лигнина. С учетом особенностей лигнина вступать в химические реакции с компонентами резиновой крошки, обосновано развитие технологий и производств по его утилизации при изготовлении резинотехнических изделий с лигниновым наполнителем, что может найти применение при оборудовании спортивных площадок, уличных территорий, в транспортной сфере. Сделан вывод о том, что предлагаемый подход представляет собой экологическую альтернативу использования технического углерода в резиновой промышленности. Обоснованы перспективы утилизации отходов лигнина данным способом и дана оценка потребности в такой продукции.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажное производство, лигнин, утилизация отходов, загрязнение окружающей среды, технологии переработки и вторичного использования лигнина, Архангельский ЦБК, резинотехнические изделия

Статья поступила в редакцию 15.11.2025, доработана 24.01.2026, принята к публикации 28.01.2026

Utilization of Lignin Waste from the Pulp and Paper Industry in the Production of Rubber Products

¹E.V. Poptsova, ¹I.A. Sukhanov, ¹I.M. Potravny, ¹V.S. Kondrev

¹Plekhanov Russian University of Economics, 115054 Moscow, Russia

The results of studies on the disposal of lignin waste generated at pulp and paper industry enterprises during the production of rubber and technical products are presented. Data on the volume of lignin waste generation at the country's largest pulp and paper mills are assessed. Using the example of Arkhangel'sk Pulp and Paper Mill JSC in Novodvinsk, a potential damage caused assessment was performed from the disposal of lignin waste. The negative consequences of lignin waste disposal and incineration are identified. Given the ability of lignin to react chemically with rubber crumb components, the article justifies the development of technology and production processes for the utilization of lignin in the production of rubber products with lignin filler, which can be used in the construction of sports facilities, outdoor areas, and transportation systems. It is concluded that the proposed approach represents an environmental alternative to the use of technical carbon in the rubber industry. The prospects for the utilization of lignin waste using this method are substantiated, and the need for such products in the country is assessed.

Keywords: pulp and paper production, lignin, waste disposal, environmental pollution, technologies for processing and recycling lignin, Arkhangel'sk PPM, rubber products

Received 15.11.2025, revised 24.01.2026, accepted for publication 28.01.2026

DOI: 10.18412/1816-0395-2026-4-4-9

В настоящее время на территории России действует много предприятий по производству и переработке целлюлозы, из которых полным циклом производства целлюлозы из древесины обладают немногим более десятка. Поскольку более 80 % целлюлозы в России производится по сульфатной технологии, основной отход

на ЦБК — так называемый сульфатный лигнин, объем образования которого, по оценкам, составляет порядка 20 млн т в год. Основная его часть сжигается для получения энергии, а также используется для регенерации реагентов (сульфида, карбоната и гидроксида натрия или калия). Значительные объемы накопленных отходов лигнина

(в целом по стране порядка 200 млн т) представляют существенную экологическую угрозу. В этих условиях разработка технологий переработки сульфатного лигнина представляется важной и актуальной задачей с экологической и экономической точки зрения.

Цель статьи — обоснование технологии утилизации отходов

сульфатного лигнина в качестве наполнителя при производстве резинотехнических изделий, включая оценку ресурсной базы, потенциала рынка готовой продукции, а также экологических и экономических эффектов от её применения.

Лигнин — важный вторичный ресурс, который активно используется во многих странах с небогатым лесным фондом [1, 2]. Из него изготавливают пеллеты, его добавляют в битум или сжигают, повышая энергоэффективность предприятия [3, 4]. В то же время захоронение, а также сжигание лигнина вызывает негативные экологические последствия. Сульфатный лигнин, выделяемый в качестве отхода при варке, представляет собой мелкую пыль, которая может разноситься ветром на большие расстояния. Кроме того, при попадании в почву лигнин за счет своих комплексобразующих свойств значительно уменьшает биодоступность микроэлементов в почве, обедняя ее.

При сжигании сульфатного лигнина образуются опасные для окружающей среды и здоровья человека загрязняющие вещества. Сброс золы после сжигания лигнина в водоемы может привести к фенольному загрязнению водных экосистем [5].

Оценка образования отходов лигнина

В рамках исследования выполнена оценка образования отходов лигнина в целом по стране, а также на примере АО "Архангельский ЦБК" (г. Новодвинск). Расчеты объемов древесины проводилась исходя из объемов готовой бумажной/картонной продукции. При производстве бумаги и картона доля целлюлозы составляет 85–98 %. Выработка целлюлозы из древесины составляет 45–55 %, при этом содержание лигнина в древесине — 27–32 % для хвойных пород и 18–24 % для лиственных. Доля чистого лигнина в отработанном сульфатном лигнине в виде отхода деятельности ЦБК

порядка 70–85 %. При этом за чистый лигнин принимается теоретическое значение содержания лигнина в древесине.

Рассмотрим расчет количества вырабатываемых отходов сульфированного лигнина на Архангельском ЦБК. Объем образования сульфатного лигнина можно определить по формуле (в скобках обозначены реальные величины показателей для расчетов):

$$V_{\text{лигн.}} = V_{\text{древ.}} \times D_{\text{древ.}} \times P_{\text{лигн. масс.}} / P_{\text{лигн. средн.}},$$

где $V_{\text{лигн.}}$ — объем образования сульфатного лигнина, т /год (919,4 тыс. т в год); $V_{\text{древ.}}$ — количество обрабатываемой древесины, тыс. м³/год (4750 тыс. м³/год); $D_{\text{древ.}}$ — плотность древесины, т/м³ (0,6 т/м³); $P_{\text{лигн. масс.}}$ — массовая доля содержания чистого лигнина в древесине, % (25 %); $P_{\text{лигн. средн.}}$ — средний процент содержания чистого лигнина в сульфированном лигнине, % (77,5 %).

Согласно "Сборнику о промышленном производстве в 2024 году" за год было произведено 8 538 тыс. т целлюлозы и 10 658 тыс. т бумаги и картона. Для расчета количества обрабатываемой древесины проведем обратный расчет исходя из объема готовой целлюлозы и бумажной продукции по формуле:

$$W_{\text{древ. обр.}} = W_{\text{цел.}} / P_{\text{цел.}} + W_{\text{бум. и карт.}} / P_{\text{цел. в бум.}},$$

где $W_{\text{древ. обр.}}$ — количество обработанной древесины, т (38827 тыс. т); $W_{\text{цел.}}$ — количество целлюлозы, т (8 538 тыс. т); $P_{\text{цел.}}$ — доля содержания целлюлозы в древесине (50 %); $W_{\text{бум. и карт.}}$ — количество бумаги в картоне, т (10 658 тыс. т); $P_{\text{цел. в бум.}}$ — доля целлюлозы в бумаге и картоне, % (98 %).

Масса образованных отходов сульфатного лигнина определяется по формуле:

$$M_{\text{лигн.}} = O_{\text{древ.}} \times P_{\text{лигн. масс.}} / P_{\text{ср. лигн.}},$$

где $M_{\text{лигн.}}$ — масса образованных отходов сульфатного лигнина, т; $O_{\text{древ.}}$ — количество обработанной древесины, т (38 827 тыс. т); $P_{\text{лигн. масс.}}$ — массовая доля содержания чистого лигнина в древесине, % (25 %); $P_{\text{ср. лигн.}}$ — сред-

ний процент содержания чистого лигнина в сульфированном лигнине, % (77,5 %).

Таким образом, в стране образуется отходов сульфатного лигнина 12 524 тыс. т ежегодно.

Для обоснования технологического вторичного использования и переработки отходов лигнина выполнена оценка потенциального ущерба от размещения отходов сульфатного лигнина при производстве на Архангельском ЦБК (г. Новодвинск). Расчет базировался на нормативах платы за размещение отходов лигнина, которые относятся к IV классу опасности. Ущерб от размещения отходов сульфатного лигнина может определяться по формуле:

$$U_{\text{разм. отх. лигн.}} = M_{\text{лигн.}} \times H_{\text{пл. лигн.}} \times K_{\text{экол. сит.}},$$

где $U_{\text{разм. отх. лигн.}}$ — ущерб от размещения отходов сульфатного лигнина, руб.; $H_{\text{пл. лигн.}}$ — норматив платы за размещение отходов лигнина, руб./т; $K_{\text{экол. сит.}}$ — коэффициент экологической ситуации при размещении отходов на территории (почве) в Архангельской области (1,4).

С учетом массы образования отходов лигнина на Архангельском ЦБК (919,4 тыс. т в год), ставки платы за негативное воздействие на окружающую среду для данного вида отходов, которая определена распоряжением Правительства Российской Федерации от 10 июля 2025 года №1852-р (редакция от 1 сентября 2025 г.) "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду в 2025 году" и составляет 1083,24 руб. за тонну, а также коэффициента экологической ситуации для рассматриваемой территории, ущерб от размещения данных отходов может быть порядка 1,4 млрд руб. ежегодно. Отметим, что в реальности данное предприятие сжигает лигнин для получения энергии.

Учитывая потребность страны в резинотехнических изделиях около 640 тыс. т, содержание модифицированной сульфатной лигниновой добавки в

Таблица 1. Физические свойства лигнина и резиновой крошки

Table 1. Physical properties of lignin and rubber crumb

Свойство	Лигнин	Резиновая крошка	Технический углерод
Агрегатное состояние	Твердое, аморфное порошкообразное вещество	Твердые, гранулированные частицы (крошка)	Мелкодисперсный порошок, пыль
Плотность	Средняя (~1200–1400 кг/м³)	Низкая (~400–1200 кг/м³, зависит от размера и состава)	150–250 (насыпная), 1800–1900 (истинная), кг/м³
Прочность	Высокая на сжатие, но хрупкость, низкая на удар и растяжение	Низкая на сжатие, высокая эластическая прочность и устойчивость к деформациям	Не исследовалось
Эластичность / пластичность	Жесткий и хрупкий, не обладает эластичностью, при нагрузке ломается	Высокоэластичная, способна к обратимым деформациям	Не обладает, инертный наполнитель.
Твердость	Высокая	Низкая (частицы легко сжимаются)	Высокая (абразивные частицы)
Теплопроводность	Низкая (как у древесины)	Очень низкая (теплоизолятор)	Относительно высокая (для полимеров)
Водопоглощение	Высокое (гигроскопичен, требует предварительного высушивания)	Очень низкое (гидрофобна, вода скатывается с поверхности)	Низкое
Стойкость к температурам	Разлагается при температурах выше ~200–250 °С (обугливается и горит)	Размягчается при ~100–150 °С, но не плавится, как пластик; при высоких температурах горит	> 300 °С (термостабилен)
Морозостойкость	Низкая для индивидуального вещества	Очень высокая (сохраняет эластичность при температурах до -50 °С и ниже)	Очень высокая (инертное вещество)
Химическая стойкость	Средняя (разлагается сильными кислотами и щелочами, подвержен биоповреждению)	Высокая (устойчива к воде, щелочам, слабым кислотам, УФ-излучению)	Очень высокая (инертен к большинству реагентов)
Эксплуатационные характеристики в резинотехническом изделии	Модификатор / наполнитель, может увеличивать твердость, но снижает эластичность	Основной наполнитель для покрытий, шумопоглощение. Снижает затраты	Повышает прочность, износостойкость и сопротивление разрыву. Обязателен для шин
Содержание в составе резино-технических изделий	5–25 % (экспериментальные композиты)	До 80–85 % (в резиновых плитах)	25–50 % (в шинах и резинотехнических изделиях)
Ориентировочная стоимость	Бесплатно, как отход	15 000–35 000 руб./т (зависит от фракции и чистоты)	70 000–150 000 руб./т (зависит от марки)
Экологические последствия	Положительные (утилизация отходов, использование возобновляемого сырья)	Положительные (утилизация изношенных шин)	Отрицательные (сжигание нефтепродуктов, выбросы CO₂)

Примечание. Составлено авторами на основе [10].

этой продукции может составить 51,2 тыс. т (в среднем содержание лигнина в таких изделиях не должно превышать 15 %). Следовательно, в целом по стране на производство резинотехнических изделий может быть использовано 0,4 % отходов сульфатного лигнина

Переработка и использование отходов лигнина

Существует множество способов и методов переработки лигнина: термические (пиролиз, газификация, сжигание); химические (окисление, гидрогенизация для получения ароматических соединений и топлив); биологические (микробное разложение) и механические методы, которые позволяют получать ценные продукты — биотопливо, химикаты, углеродные материалы (сор-

бенты, волокна) и биопластики, превращая его из отхода в ценное сырье. Среди этих методов механические наиболее экономически целесообразны и легко реализуемы.

Из механических способов переработки лигнина практический интерес представляет его использование в качестве связующего наполнителя при производстве резиновых плит, например из переработанных шин. В данном случае можно получать высокопористый термо-, влаго- и морозостойкий продукт с заданными потребительскими характеристиками, например резинотехнические изделия с наполнителем из сульфатного или щелочного лигнина. Такой подход нашел применение за рубежом при обустройстве, например, спортивных площадок в школах и

детских садах. Плиты из вторично переработанной резины с наполнителями можно использовать в качестве напольного покрытия в транспортных средствах. Для получения таких материалов можно вводить сульфатный лигнин в экструдруемую смесь в количестве до 8 % ее массы [8, 9]. Также потенциально лигнин можно использовать в качестве заменителя (частично) технического углерода в резиновой промышленности (табл. 1).

В качестве одного из вариантов предлагается рассмотреть производство резиновых плит с наполнителем из сульфатного лигнина, что позволяет производить полезный продукт и утилизировать отходы ЦБК. Экспериментальным путем установлено, что для производства единицы продукта —

Таблица 2. Характеристика продуктов, производимых из отходов лигнина

Table 2. Characteristics of products manufactured from lignin waste

Назначение	Базовый вариант композита	Технология	Толщина, мм	Плотность, кг/м ³	Типовые размеры, мм	Основные свойства
Напольные покрытия	Частичная замена углерода модифицированным сульфатным лигнином	Горячее прессование (высокое давление)	8–15	Высокая, > 1200	500×500, 600×600, 1000×500	Высокая износостойкость, непористость, жесткость
Напольные покрытия для спортивных и детских площадок	Модифицированный сульфатный лигнин как полифункциональная добавка, структурообразователь	Холодное формование/вибропрессование	30–50	Низкая, 600–900	500×500, 1000×1000	Пористость, водопроницаемость
Электроизоляционные материалы	Лигнин используется для снижения затрат и как наполнитель (критична однородность и отсутствие пор)	Горячее прессование (очень высокое давление)	2–20	Очень высокая, > 1300	Листы 1000×2000, 1200×2400	Однородность, отсутствие пор, высокое удельное объемное сопротивление
Детали (подшвы, элементы интерьера)	Модифицированный сульфатный лигнин вводится для снижения затрат и повышения жесткости	Литье под давлением, экструзия	3–50	900–1100 (зависит от марки ТРЕ)	По заказу	Повышенная термостабильность, технологичность переработки, пониженная эластичность

Примечание. Составлено авторами.

резиновой плиты (например, для спортивных/детских площадок) площадью 1 м², толщиной 40 мм требуется 2,4 кг отхода сульфатного лигнина (плотность резинового покрытия принимается равной 750 кг/м³). В целом по стране это обеспечит выпуск качественной резиновой продукции путем ежегодной утилизации 30 тыс. т отхода очищенного сульфатного лигнина или 47 тыс. т отходов загрязненного сульфатного лигнина.

В основе технологии производства резиновых плит с наполнителем из сульфатного лигнина лежит переработка эластомеров, получение вторичных полимеров с заданными техническими и потребительскими характеристиками. В качестве основного компонента используется резиновая крошка, полученная путем переработки шин, при этом такая крошка может быть заменена на пиролизное масло и серу. В данную смесь добавляется промытый и обработанный разбавленной серной кислотой, а затем высушенный лигнин. Все компоненты смешиваются в лопастном смесителе, смесь расплавляется и спекается при температуре 300°C в экструдере, а затем формуется изделие. Полученный продукт — резина с наполнителем из сульфатного

лигнина обладает важными характеристиками.

Рассмотрим значение такого продукта для народного хозяйства. В настоящее время в соответствии с федеральным проектом "Формирование комфортной городской среды" для развития уличных покрытий (спортивные и детские площадки) по нормативу СП 42.13330.2016 на 1000 жителей требуется 0,5–0,7 га территорий для отдыха. По нашим оценкам, если ежегодно в стране обновляется и строится ~50 000 новых площадок, а средняя площадь покрытия одной площадки и создания территории для отдыха составляет 150 м², то потребность в такой продукции может составить 7,5 млн м²/год. Это равняется примерно 225–300 тыс. т готовой продукции (при плотности 900 кг/м³ и толщине 40 мм).

Также данную продукцию можно использовать в качестве напольного покрытия для общественных помещений, включая спортивные залы, коридоры школ и детских садов, объекты здравоохранения, общественный транспорт. Например, для сферы образования, по нашим оценкам, потребность в таких резиновых плитах может составить 1,76 млн м²/год, для спорта, здравоохранения, транспорта — 1,24 млн м²/год.

Таким образом, объем рынка такой продукции для указанных сегментов оценивается в 10,5 млн м² или 378 тыс. т в год.

Перспективное направление использования технологии утилизации отходов лигнина — производство электроизоляционных материалов, например для изготовления трансформаторов, электродвигателей, оборудования кабельных систем зданий, для электрооборудования целлюлозно-бумажных и лесопильных производств и др. В табл. 2 дана ожидаемая характеристика продуктов, полученных с использованием отходов лигнина.

Применяемое техническое оборудование позволяет делать производство резиновых плит модульным, используя местное вторичное сырье. Среди других альтернативных вариантов продуктов с использованием отходов лигнина можно выделить производство кислотных катализаторов. Такие катализаторы могут применяться для производства метил-трет-бутилового эфира или трет-бутанола — как добавки к бензинам для повышения октанового числа (для легкомоторной авиации и автотранспорта). В качестве альтернативных продуктов утилизации отходов лигнина можно выделить



Рис. 1. Схема образования и утилизации отходов лигнина в деятельности предприятий целлюлозно-бумажной промышленности (составлено авторами)

Fig. 1. Scheme of lignin waste formation and utilization in the activities of pulp and paper industry enterprises (compiled by the authors)

пропилфенолы и сахара — побочные продукты, которые могут использоваться для получения технического биоэтанола, создания биогумуса и компостирования отходов (см. рисунок).

Заключение

Утилизация отходов лигнина целлюлозно-бумажной промышленности при производстве резиновых плит позволяет получить ряд экологических, экономических и социальных преимуществ. По расчетам авторов, ежегодно образование отхода сульфатного лигнина в стране составляет 12 524 тыс. т, ущерб от размещения данных отходов, например для Архангельского ЦБК, может составлять порядка 1,4 млрд руб. ежегодно, таких предприятий в стране более тридцати. Экологические эффекты и выгоды от применения такой технологии состоят в снижении нагрузки на полигоны и улучшении состояния окружающей среды. Переработка лигнина в полезный продукт исключает его из потока отходов, сокращается вред окружающей среде от его сжигания, снижаются выбросы в атмосферу серосодержащих соединений.

Связывание серы в производимом продукте предотвращает эти выбросы.

Экономические преимущества и выгоды применения данной технологии связаны с экономией затрат на производство и первичного природного сырья. Следует учитывать, что очистка лигнина от остатков серы представляет собой трудозатратный и дорогостоящий процесс. Предложенный в работе промышленный процесс предполагает использование сульфатного лигнина без его тонкой очистки. Тем самым предприятия ЦБК могут превратиться из производителя проблемного отхода в поставщика ценного вторичного сырья, что может стать для них новой статьей дохода. При этом готовая продукция может позиционироваться как "зеленая", экологичная, что может стать дополнительным маркетинговым преимуществом при ее производстве. Кроме того, поддержка таких проектов имеет значительный потенциал для "зеленого" финансирования, включая льготное кредитование, налоговые льготы и другие ESG-инструменты [11].

Социальные преимущества состоят в развитии нового "зе-

леного" производства, создании новых рабочих мест природоохранной направленности (утилизация отходов и переработка вторичных ресурсов), обеспечении экологического и социального благополучия населения в районах деятельности ЦБК, которые часто являются градообразующими предприятиями. Такой подход имеет важное значение для градообразующих предприятий в районах их деятельности [12]. Снижение вредных выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду и нагрузки на полигоны улучшает качество жизни и здоровья населения в этих городах. В процессе утилизации отходов лигнина может быть использована технология отделения биомассы от сточных вод деревообрабатывающей промышленности для ее переработки [13], а также технологии создания порошкообразных целлюлозных и наноцеллюлозных материалов [14]. Перспективным является использование лигнина в качестве биополимерного наполнителя в композитах с резиновой крошкой и техническим углеродом, что имеет важное эколого-экономическое значение.

Литература

1. Евстигнеев Э.И. Что такое лигнин — эволюция взглядов (обзор). Химия растительного сырья. 2024. № 1. С. 57–81. DOI 10.14258/jcprm.20240112046.
2. Арапова О.В., Чистяков А.В., Цодиков М.В., Моисеев И.И. Лигнин — возобновляемый ресурс углеводородных продуктов и энергоносителей (обзор). Нефтехимия. 2020. Т. 60. № 3. С. 251–269. DOI 10.31857/S0028242120030041.
3. Хакимова Ф.Х., Хакимова Ф.Х., Носкова О.А., Хакимов Р.Р., Фонарев И.И. Комплексная утилизация лигносодержащих древесных отходов. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 3(399). С. 188–202. DOI 10.37482/0536-1036-2024-3-188-202.
4. Плотнокова Г.П. Композиционный строительный материал с использованием отходов лесохимии в составе. Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 3(38). С. 452–461. DOI 10.21285/2227-2917-2021-3-452-461.
5. Булгаков С.В. Хозяйственная деятельность и фенольное загрязнение водной экосистемы. Вода: химия и экология. 2024. № 1. С. 87–92.
6. О промышленном производстве в 2024 году. Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/10_05-02-2025.html (дата обращения: 02.11.2025).
7. Картон: уровень следующий. Бумажник. [Электронный ресурс]. URL: <https://bumazhnik.ru/2024/01/27/65b55348de2e014e78623aa2.html> (дата обращения: 01.11.2025).
8. Смирнова О.Е., Пичугин А.П. Технологические закономерности формирования гранулированного лигносодержащего заполнителя. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 4(796). С. 71–80. DOI 10.32683/0536-1052-2025-796-4-71-80.
9. Минич М.И., Спицын А.А. Получение углеродсодержащих сорбентов в качестве альтернативного способа переработки лигнин-содержащих отходов. Химическая безопасность. 2020. Т. 4. № 2. С. 240–249. DOI 10.25514/CHS.2020.2.18017.
10. Боголицин К.Г., Лунин В.В., Косяков Д.С. и др. Физическая химия лигнина. Монография. под ред. проф. К.Г. Боголицына и акад. РАН, проф. В.В. Лунина. М., Академкнига, 2010. 489 с.
11. Потравный И.М., Новиков А.В., Чавез Феррейра К.И. Ликвидация объектов накопленного экологического ущерба в прибрежной арктической зоне на основе методов ESG-финансирования. Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 10. С. 60–65. DOI 10.18412/1816-0395-2022-10-60-65.
12. Ненастьев Н.А., Яшалова Н.Н., Потравная Е.В. Развитие социального пространства в регионе размещения и деятельности предприятий черной металлургии на примере ПАО "Северсталь". Черные металлы. 2026. №1. С. 89–96.
13. Vitolina S., Shulga G., Neiberte B., Reihmane S. Woodworking wastewater biomass effective separation and its recovery. Agronomy Research. 2021. Vol. 19. Iss. 3. P. 1659–1674. DOI 10.15159/AR.21.128.
14. Myasoedova V.V., Golobokov D.A., Chuev E.A. Modern Technologies for Creating Powdered Cellulose and Nanocellulose Composites. Polymer Science, Series C. 2024. DOI 10.1134/s1811238224600253.

References

1. Evstigneev E.I. Chto takoe lignin — evolyutsiya vzglyadov (obzor). Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2024. № 1. S. 57–81. DOI 10.14258/jcprm.20240112046.
2. Arapova O.V., Chistyakov A.V., Tsodikov M.V., Moiseev I.I. Lignin — vozobnovlyaemyi resurs uglevodородных продуктов i energonositelei (obzor). Neftekhimiya. 2020. T. 60. № 3. S. 251–269. DOI 10.31857/S0028242120030041.
3. Khakimova F.Kh., Khakimova F.Kh., Noskova O.A., Khakimov R.R., Fonarev I.I. Kompleksnaya utilizatsiya lignosoderzhashchikh drevesnykh otkhodov. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal. 2024. № 3(399). S. 188–202. DOI 10.37482/0536-1036-2024-3-188-202.
4. Plotnikova G.P. Kompozitsionnyi stroitel'nyi material s ispol'zovaniem otkhodov lesokhimii v sostave. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2021. T. 11. № 3(38). S. 452–461. DOI 10.21285/2227-2917-2021-3-452-461.
5. Bulgakov S.V. Khozyaistvennaya deyatel'nost' i fenol'noe zagryaznenie vodnoi ekosistemy. Voda: khimiya i ekologiya. 2024. № 1. S. 87–92.
6. O promyshlennom proizvodstve v 2024 godu. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki: ofitsial'nyi sait. [Elektronnyi resurs]. URL: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/10_05-02-2025.html (data obrashcheniya: 02.11.2025).
7. Karton: uroven' sleduyushchii. Bumazhnik. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://bumazhnik.ru/2024/01/27/65b55348de2e014e78623aa2.html> (data obrashcheniya: 01.11.2025).
8. Smirnova O.E., Pichugin A.P. Tekhnologicheskie zakonomernosti formirovaniya granulirovannogo lignosoderzhashchego zapolnitelya. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo. 2025. № 4(796). S. 71–80. DOI 10.32683/0536-1052-2025-796-4-71-80.
9. Minich M.I., Spitsyn A.A. Polucheniye ugle rodsoderzhashchikh sorbentov v kachestve al'ternativnogo sposoba pererabotki lignin-soderzhashchikh otkhodov. Khimicheskaya bezopasnost'. 2020. T. 4. № 2. S. 240–249. DOI 10.25514/CHS.2020.2.18017.
10. Bogolitsyn K.G., Lunin V.V., Kosyakov D.S. i dr. Fizicheskaya khimiya lignina. Monografiya. pod red. prof. K.G. Bogolitsyna i akad. RAN, prof. V.V. Lunina. M., Akademkniga, 2010. 489 s.
11. Potravnyi I.M., Novikov A.V., Chavez Ferreira K.I. Likvidatsiya ob'ektov nakoplennoego ekologicheskogo ushcherba v pribrezhnoi arkticheskoi zone na osnove metodov ESG-finansirovaniya. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2022. T. 26. № 10. S. 60–65. DOI 10.18412/1816-0395-2022-10-60-65.
12. Nenast'ev N.A., Yashalova N.N., Potravnaya E.V. Razvitie sotsial'nogo prostranstva v regione razmeshcheniya i deyatel'nosti predpriyatii chernoi metallurgii na primere PAO "Severstal". Chernye metally. 2026. №1. S. 89–96.
13. Vitolina S., Shulga G., Neiberte B., Reihmane S. Woodworking wastewater biomass effective separation and its recovery. Agronomy Research. 2021. Vol. 19. Iss. 3. P. 1659–1674. DOI 10.15159/AR.21.128.
14. Myasoedova V.V., Golobokov D.A., Chuev E.A. Modern Technologies for Creating Powdered Cellulose and Nanocellulose Composites. Polymer Science, Series C. 2024. DOI 10.1134/s1811238224600253.

Е.В. Попова – студент, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова (РЭУ им. Г.В. Плеханова), e-mail: liza.poptsova@yandex.ru • И.М. Потравный – д-р экон. наук, профессор, РЭУ им. Г.В. Плеханова, e-mail: ecoaudit@bk.ru • И.А. Суханов – студент, РЭУ им. Г.В. Плеханова, e-mail: ignat.sukhanov2006@mail.ru • В.С. Кондрев – ст. преподаватель, РЭУ им. Г.В. Плеханова, e-mail: kondrev.vs@rea.ru

E.V. Poptsova – Student, Plekhanov Russian University of Economics (PRUE), e-mail: liza.poptsova@yandex.ru • I.M. Potravny – Dr. Sci. (Economics), Professor, PRUE, e-mail: ecoaudit@bk.ru • I.A. Sukhanov – Student, PRUE, e-mail: ignat.sukhanov2006@mail.ru • V.S. Kondrev – Senior Lector, PRUE, e-mail: kondrev.vs@rea.ru