

УПРАВЛЕНИЕ ОТХОДАМИ. БЕЗОПАСНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ, ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ И УТИЛИЗАЦИЯ

DOI: 10.15593/2224-9400/2025.3.09
УДК 628.477

Научная статья

**Г.В. Ильиных, С.В. Полыгалов, В.Н. Коротаев,
Н.Н. Слюсарь, Я.И. Вайсман, В.Г. Рябов**

Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Российская Федерация

СЫРЬЕВОЙ ПЕРЕХОД КАК ОСНОВА ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

Сырье служит основой для производства топлив, строительных и конструкционных материалов, продуктов питания и высокотехнологичной продукции. Низкая эффективность использования сырья и преимущественно линейные, одноразовые схемы его использования в настоящее время создают множество экологических проблем. Формирование экономики замкнутого цикла требует сырьевого перехода – масштабного преобразования в части использования вторичного сырья, которое подразумевает перестройку всех этапов – от проектирования продукции с учетом будущего рециклинга до создания эффективной инфраструктуры сбора, сортировки и глубокой переработки отходов в качественные вторичные ресурсы для промышленности. Переход на преимущественное использование вторичного сырья позволяет минимизировать захоронение отходов, снижает потребность в добыче первичных ресурсов, сохраняя тем самым природные ландшафты и уменьшая разрушение экосистем. Сопоставимая концентрация целевых материалов в отходах по сравнению с природными источниками, например рудами, делает их переработку экономически, экологически и ресурсоэффективной. Вторичные материалы чаще всего обладают значительно меньшим углеродным следом, соответственно их использование способствует декарбонизации промышленности. Для сырьевого перехода необходимо развитие сразу в нескольких направлениях, среди которых комплексное использование сырья и промышленный симбиоз, оперативное и централизованное управление потоками первичного и техногенного сырья, экодизайн, государственное регулирование, нормирование и стимулирование, формирование позитивного отношения к изделиям из вторичного сырья, разработка техногенных месторождений и совершенствование технологий для работы со вторичным сырьем. Необходима подготовка специалистов, способных работать с применением инновационных подходов к ресурсосбережению и построению замкнутых циклов.

Ключевые слова: вторичные ресурсы, альтернативное сырье, отходы, углеродный след, декарбонизация, вовлечение в хозяйственный оборот, рециклинг.

**G.V. Ilinykh, S.V. Polygalov, V.N. Korotaev,
N.N. Sliusar, Y.I. Vaisman, V.G. Ryabov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RAW MATERIALS TRANSITION AS A BASIS FOR A CIRCULAR ECONOMY

Raw materials are the key foundation for the production of fuels, construction and structural materials, food products and high-tech products. Low efficiency of raw material use and predominantly linear, disposable patterns of its use currently create many environmental problems. The formation of a circular economy requires a raw material transition – a large-scale transformation in terms of the use of secondary raw materials, which implies the restructuring of all stages - from product design taking into account future recycling to the creation of an effective infrastructure for collecting, sorting and deep processing of waste into high-quality secondary resources for industry. The transition to the predominant use of secondary raw materials allows for the minimization of waste disposal, reduces the need for the extraction of primary resources, thereby preserving natural landscapes and reducing the destruction of ecosystems. A comparable concentration of target materials in waste compared to natural ores makes their processing economically, environmentally and resource-efficient. Secondary materials most often have a significantly smaller carbon footprint, and their use contributes to the decarbonization of industry. The raw materials transition requires development in several directions at once, including the integrated use of raw materials and industrial symbiosis, operational and centralized management of primary and man-made raw materials flows, eco-design, government regulation, standardization and stimulation, the formation of a positive attitude towards products made from secondary raw materials, urban and landfill mining and the improvement of technologies for secondary raw material processing. It is necessary to train specialists capable of working with innovative approaches to resource conservation and the construction of closed cycles.

Keywords: *secondary resources, alternative raw materials, waste, carbon footprint, decarbonization, involvement in economic circulation, recycling*

Введение. Современное общество и промышленность не могут существовать без сырья, которое служит основой для производства энергии, материалов и товаров. Сырье выступает ключевым структурным элементом глобальной экономики, обеспечивая как базовые потребности человечества в энергии и строительных материалах, так и сложные технологические цепочки производства высокотехнологичной продукции.

Традиционно природные ресурсы делят на исчерпаемые (уголь, нефть, руды) и неисчерпаемые (солнечная энергия, ветер, приливы), возобновимые (лес, вода, биоресурсы) и невозобновимые (ископаемое

топливо, минералы). Сырьевые ресурсы можно также условно разделить на органические (нефть, газ, уголь, биомасса) и минеральные (руды и нерудные минеральные полезные ископаемые). При этом граница между этими категориями в современных условиях становится все более условной благодаря развитию технологий глубокой переработки, позволяющих получать из органического сырья минеральные компоненты (например, зола от сжигания биомассы как источник минеральных удобрений) и наоборот (синтез органических соединений из минерального сырья).

Кроме того, ресурсы можно классифицировать как первичные (извлекаемые непосредственно из окружающей среды без предварительной антропогенной трансформации) и вторичные (материалы, отходы, уже прошедшие цикл промышленного использования и подлежащие повторному вовлечению в производственный процесс). Вовлечение отходов в хозяйственный оборот в качестве вторичных ресурсов и сырья является одной из ключевых задач по формированию экономики замкнутого цикла для достижения национальной цели развития Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2036 г. «Экологическое благополучие».

Экономика замкнутого цикла базируется на нескольких ключевых принципах: минимизация отходов, повторное использование материалов, рециклинг и восстановление ресурсов. Для ее реализации требуется кардинальная смена парадигмы в отношении сырья – переход от линейной модели «добыча–производство–утилизация» к циклической системе, где отходы становятся ресурсом. Этот процесс, который можно обозначить как сырьевой переход, подразумевает преобразование промышленных процессов, внедрение новых технологий и изменение потребительского поведения.

Сырьевой переход – это системное преобразование, направленное на снижение зависимости от первичных ресурсов за счет расширения использования вторичного сырья и возобновляемых материалов. Основными проблемами на этом пути являются технологические ограничения, недостаточная инфраструктура для сбора и переработки отходов, а также экономическая неэффективность некоторых процессов рециклинга. Кроме того, существует необходимость в ужесточении регулирования, стимулировании инноваций и повышении экологической ответственности бизнеса. Без этих изменений общество столкнется с усугублением ресурсного дефицита, ростом объемов образующихся отходов и загряз-

нения окружающей среды и экономическими кризисами, связанными с истощением критически важных ископаемых ресурсов.

Таким образом, сырьевой переход и внедрение принципов экономики замкнутого цикла становятся не просто альтернативой, а необходимым условием современного развития, обеспечивающим долгосрочную устойчивость промышленности и общества в целом. Сырьевой переход в долгосрочной перспективе позволяет решать проблемы как традиционного первичного производства, так и системы обращения с отходами (табл. 1).

Таблица 1

Преимущества сырьевого перехода в решении проблем
в области ресурсобеспеченности и обращения с отходами

Проблемы первичного производства	Проблемы отходов	Преимущества сырьевого перехода
• Истощение первичного сырья • Снижение качества первичных сырьевых материалов • Большой выход отходов при работе с первичным сырьем • Высокий углеродный след первичных материалов	• Растущие объемы образования отходов • Слабое вовлечение отходов во вторичное использование • Захоронение значительных объемов отходов • Истощение ассимиляционной емкости окружающей среды	• Предотвращение захоронения • Предотвращение добычи первичного сырья • Более высокие концентрации целевых материалов во вторичном сырье • Меньший углеродный след вторичных материалов

Далее более подробно рассмотрены основные проблемы и преимущества сырьевого перехода.

Проблемы первичного производства.

Истощение первичного сырья. Проблема истощения первичного сырья становится одной из ключевых угроз устойчивому развитию мировой экономики. Среди наиболее уязвимых видов сырья, находящихся под угрозой истощения, особое место занимают традиционные энергоносители, включая нефть и природный газ, а также урановые руды. Определенные опасения в условиях роста глобального потребления и развития высокотехнологичных отраслей промышленности связаны с дефицитом ключевых металлов (цинка, свинца, олова), а также критически важных материалов, таких как литий, кобальт и редкоземельные металлы, без которых невозможно развитие высокотехнологичных отраслей и «зеленой» энергетики (табл. 2).

Таблица 2

Расчетное количество лет, оставшихся
до полного истощения ресурсов

Минералы	Производство и запас некоторых ресурсов (2023 г.), тыс. т [1]		Расчетное количество лет, оставшихся до полного истощения ресурсов
	Производство	Запасы	
Бокситы	400 000	30 000 000	75
Медь	22 000	1 000 000	46
Цинк	12 000	220 000	19
Свинец	4 500	95 000	22
Литий	180	28 000	156
Кобальт	230	11 000	48
Серебро	26	610	24
Золото	3	59	20

При этом бытует мнение, что конкретных ресурсов, например меди и других металлов, хватит только до определенного года. Это пессимистические оценки, не более чем чрезмерное преувеличение проблемы [2, 3]. Так, еще в начале XX в. в связи с бурным развитием промышленности, телефонии, электротехники и военного производства возникли опасения по поводу дефицита меди [4]. Это было связано с тем, что крупные запасы меди были сосредоточены всего в нескольких регионах, а многие медные рудники находились в странах с нестабильной ситуацией (например, в Африке и Латинской Америке). К середине XX в. стало очевидно, что речь о критически важном дефиците меди не идет благодаря открытию новых месторождений и способов замены, например, алюминием.

Однако современная ситуация принципиально отличается от исторических прецедентов по нескольким ключевым аспектам. Во-первых, темпы потребления ресурсов в XXI в. несопоставимы с показателями прошлого – за последние 50 лет мировое использование минерального сырья увеличилось более чем в 3 раза. Во-вторых, многие критически важные элементы (такие как редкоземельные металлы) даже теоретически не имеют полноценных заменителей в существующих технологических процессах. В-третьих, проблема заключается не столько в абсолютном истощении ресурсов (геологические запасы многих полезных ископаемых огромны), сколько в экономической целесообразности и экологических последствиях их добычи и переработки.

Снижение качества первичных сырьевых материалов. По мере роста промышленного производства и потребления человечество стал-

кивается с физическим истощением наиболее доступных и «богатых» месторождений полезных ископаемых, что проявляется в необходимости разработки более глубоких и труднодоступных залежей с меньшим содержанием полезных компонентов.

Характерным примером является снижение концентрации целевых металлов в рудах, в том числе в уже упоминавшихся медных [5] (рис. 1).

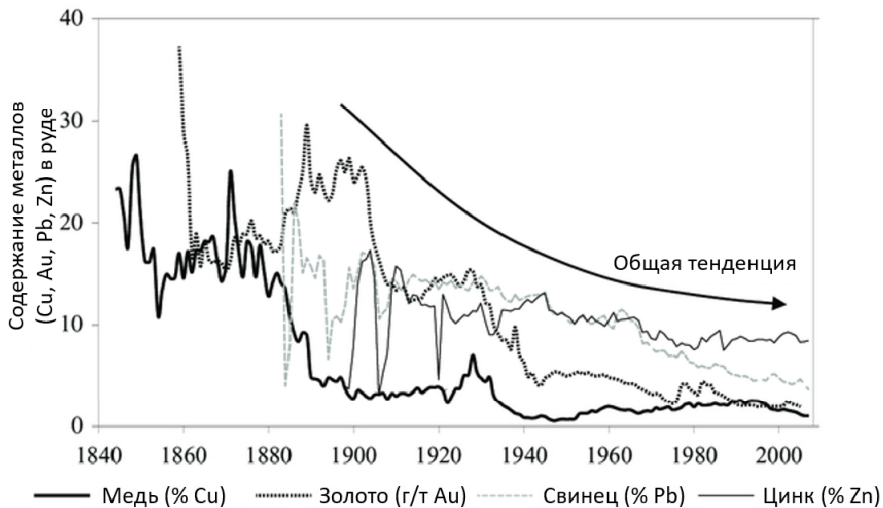


Рис. 1. Среднее содержание меди, золота, свинца и цинка в рудах в Австралии с середины XIX в. по 2007 г. [6]

По мере истощения «богатых» месторождений приходится эксплуатировать более «бедные». Конечно, разрабатываются и совершенствуются технологии, которые позволяют добывать целевые материалы из менее качественного и концентрированного сырья. Однако использование более сложных, зачастую более энергоемких и дорогих технологий добычи и переработки сырья отражается на стоимости конечной продукции и усиливает сырьевую зависимость.

Большой выход отходов при работе с первичным сырьем. Одной из ключевых экологических и экономических проблем современной добывающей и перерабатывающей промышленности является образование значительных объемов отходов на всех этапах работы с первичным сырьем. Эта проблема носит системный характер и затрагивает практически все виды полезных ископаемых — от традиционных энергоносителей до металлических руд и нерудных материалов (рис. 2).

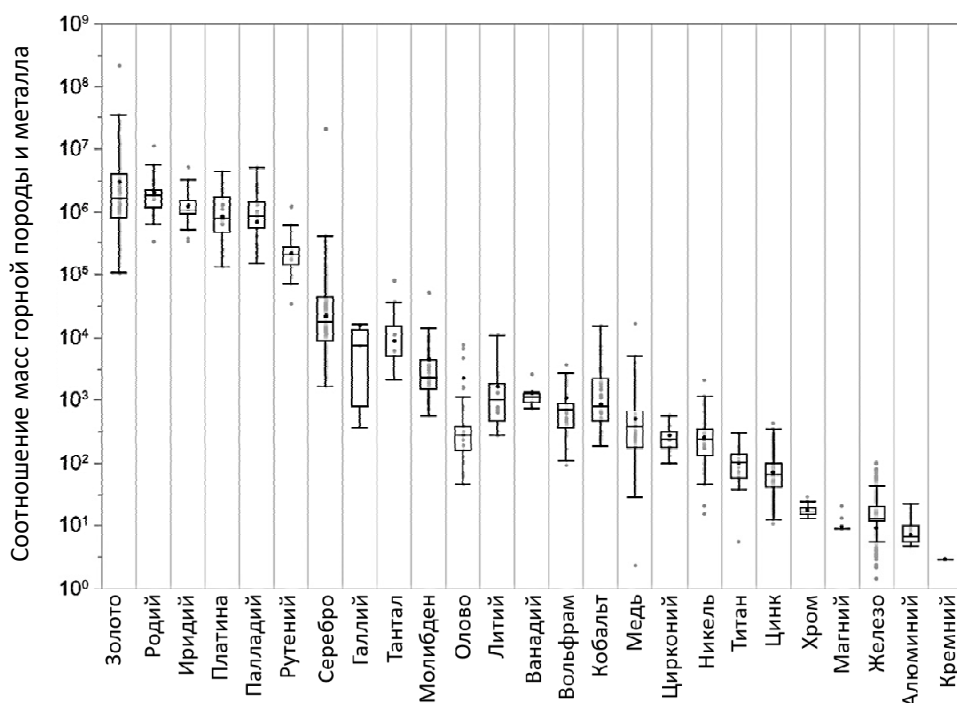


Рис. 2. Отношение массы обрабатываемой горной породы к массе добываемого сырья [7]

При добыче первичного сырья образуются так называемые вскрышные породы – горная масса, которая извлекается для обеспечения доступа к полезному ископаемому, но не содержит промышленно значимых концентраций целевых компонентов. Эти материалы складировются в отвалах, занимающих значительные территории и создающих риски для окружающей среды за счет пылеобразования, вымывания химических элементов и изменения ландшафтов. На стадии обогащения сырья ситуация усугубляется образованием технологических отходов – хвостов, представляющих собой измельченную породу после извлечения полезных компонентов. В зависимости от качества руды и применяемых технологий доля извлекаемого полезного компонента может составлять всего несколько процентов от исходной массы, а остальное превращается в отходы переработки. Например, при производстве редкоземельных металлов из руд лишь около 0,5–2 % исходного материала идет в конечный продукт, а остальные 98–99,5 % формируют хвосты, часто содержащие остаточные концентрации химических реагентов, используемых в процессе обогащения.

Большинство отходов, образующихся при добыче и переработке сырья, никак не используются, формируя нагрузку на окружающую среду.

Высокий углеродный след первичных материалов. Производство первичных материалов, включая алюминий, сталь, цемент и пластики, приносит значительную долю глобальных выбросов парниковых газов. Эта проблема приобретает особую актуальность в контексте климатических изменений и необходимости декарбонизации промышленности (табл. 3).

Таблица 3

Углеродный след некоторых материалов (удельные выбросы парниковых газов при производстве)

Материал	Выбросы парниковых газов, т CO ₂ -экв./т	Источник
Цемент	0,5–0,9	[8]
Пластмассы	1,1–3,6	[9]
Сталь	1,6–2,3	[10]
Алюминий	4,5–22	[11]
Углеродное волокно	24,4–31,0	[12]

Производство первичного алюминия остается одним из наиболее углеродоемких промышленных процессов в мировой экономике. Полный цикл получения этого стратегически важного металла – от добычи бокситов до выпуска готовой продукции – сопровождается значительными выбросами парниковых газов. Основным источником углеродного следа в производстве алюминия сосредоточен в процессе электролиза глинозема. Этот энергоемкий процесс требует огромного количества электроэнергии: для получения 1 т алюминия необходимо около 13–15 МВт·ч электроэнергии. В регионах, где алюминиевые заводы используют электроэнергию, вырабатываемую на угольных электростанциях (например, в Китае, который производит более половины мирового алюминия), углеродный след может достигать 14,3–19,5 т CO₂-эквивалента на 1 т металла [13]. Даже на заводах, использующих гидроэлектроэнергию (как в России или Канаде), выбросы составляют значительные 4–8 т CO₂-эквивалента на 1 т продукции [14].

Таким образом, добыча и использование первичного сырья сопровождается значительными воздействиями на окружающую среду, которые только увеличиваются со временем.

Проблемы отходов.

Растущие объемы образования отходов. Как уже было показано выше, добыча первичного сырья сопровождается образованием значительных объемов отходов, масса которых может на несколько порядков превышать массу получаемых материалов. Кроме того, значи-

тельные объемы отходов генерируются в сфере потребления. Глобальное производство пластиковой упаковки превысило 400 млн т в год (435 млн т в 2020 г.), при этом до 35 % приходится на упаковку, которая после кратковременного использования попадает на полигоны или в окружающую среду [15]. Строительная отрасль также вносит значительный вклад в общий объем отходов – демонтаж зданий и сооружений дает до трети всех твердых отходов в развитых странах. Особую озабоченность вызывает стремительный рост электронных отходов – ежегодно в мире образуется свыше 60 млн т отработанной электроники (в среднем 7,8 кг/год на душу населения), содержащей как ценные компоненты, так и опасные вещества [16].

Удельное образование отходов производства и потребления на душу населения для разных стран представлено на рис. 3.

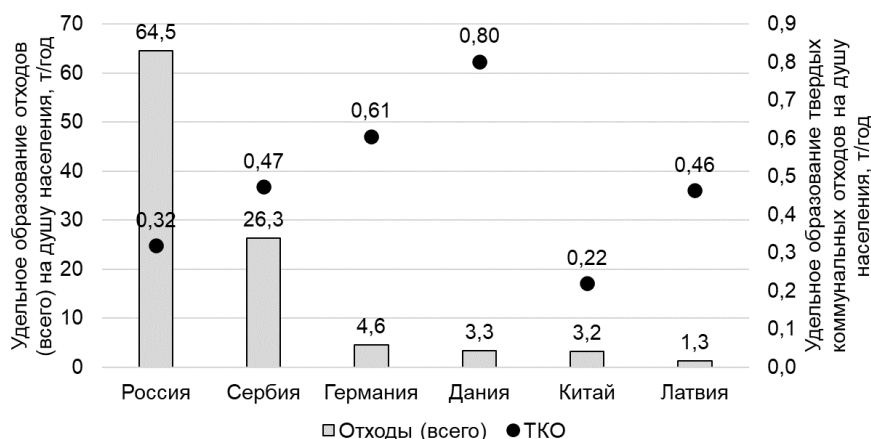


Рис. 3. Образование отходов на душу населения (на основе [17–21])

Факторами, усугубляющими проблему, выступают усложнение состава материалов и их комбинаций, рост потребления на душу населения, сокращение жизненного цикла продукции, недостаточное развитие инфраструктуры переработки, низкая экономическая эффективность рециклинга многих видов отходов.

Слабое вовлечение отходов во вторичное использование. Современная система обращения с отходами демонстрирует крайне неравномерные показатели вовлечения различных материалов в повторное использование. Наиболее благополучная ситуация наблюдается в сегменте металлов, где сложились эффективные механизмы сбора и переработки. Так, уровень рециклинга черных металлов достигает 70–90 %, цветных металлов – 50–80 % [22, 23].

Однако для большинства других видов отходов показатели вторичного использования остаются неудовлетворительными. Отходы пластмасс вовлекаются в переработку лишь на 10–15 % от общего объема образования, а в замкнутых циклах оказывается ничтожное количество (рис. 4).



Рис. 4. Глобальные циклы пластмасс [24]

Стекло, несмотря на теоретическую возможность бесконечной переработки, вовлекается во вторичный оборот в среднем на 30–50 % [25], макулатура перерабатывается на 50–70 % [26], при этом каждый цикл переработки снижает качество волокна. Строительные отходы перерабатываются менее чем на 30 %, хотя технологические решения для их утилизации достаточно просты. Лишь в некоторых европейских странах, таких как Германия, Дания и Нидерланды достигнуты высокие показатели переработки строительных отходов (80–90 %) [27]. Электронные отходы, содержащие ценные компоненты, также перерабатываются крайне слабо.

Захоронение значительных объемов отходов. Свалки и полигоны захоронения отходов занимают значительные территории, выводя ценные земли, в том числе сельскохозяйственные, из хозяйственного оборота. В густонаселенных регионах (Европа, Юго-Восточная Азия) наблюдается острый дефицит площадей для новых полигонов, что приводит к необходимости транспортировки отходов на большие расстояния.

На территории, прилегающих к объектам захоронения отходов, происходит деградация поверхностей и подземных водных объектов, атмосферного воздуха, почв и грунтов из-за поступления загрязняющих веществ с фильтратом, биогазом. Выделение биогаза, кроме того, приводит к поступлению в воздух метана, который обладает в 25 раз

большим парниковым потенциалом, чем углекислый газ, а также увеличивает риски возгораний. Кроме того, разложение органических отходов приводит к образованию неприятных запахов и эмиссиям вредных летучих соединений, ухудшающих качество жизни населения в радиусе 3–5 км.

Исчерпание ассимиляционной емкости окружающей среды.

Современная антропогенная нагрузка достигла масштабов, при которых природные системы уже не способны нейтрализовать и перерабатывать поступающие загрязнения. Природные механизмы самоочищения и биогеохимические циклы, формировавшиеся миллионы лет эволюции, не успевают адаптироваться к современным темпам и объемам загрязнения. Особенно критична ситуация с углеродным (превышение поглощающей способности океанов и лесов), азотным и фосфорным циклам (эвтрофикация водоемов).

На примере азотных и фосфорных удобрений хорошо прослеживается разница в экологическом воздействии и обеспеченности ресурсами. Азот и фосфор, являясь незаменимыми элементами для всех живых организмов, представляют собой критически важный ресурс для современного сельского хозяйства: глобальное использование этих базовых удобрений растет с каждым годом. При этом азотные удобрения можно производить в практически неограниченных количествах благодаря процессу Габера–Боша, который позволяет синтезировать аммиак из атмосферного азота и водорода (обычно получаемого из природного газа). Однако эта технологическая доступность порождает серьезные экологические проблемы. Соединения азота вызывают эвтрофикацию водоемов (избыточные нитраты с сельхозполей попадают в водные системы, вызывают бурное цветение водорослей, приводят к образованию «мертвых зон» из-за дефицита кислорода, нарушают водные экосистемы), закисление почв и вод (оксиды азота образуют азотистую и азотную кислоты, снижают pH почв, ухудшая их плодородие, повреждают корневые системы растений, увеличивают подвижность токсичных металлов). Таким образом, азотные удобрения вызывают большую настороженность именно в контексте их ассимиляции, а не в части истощаемости первичного сырья. В отношении фосфора ситуация обратная. Источником сырья для производства фосфорных удобрений являются истощаемые месторождения апатитов и фосфоритов. Избыточное поступление фосфора в водные объекты, так же как и в случае с азотом, приводит к эвтрофикации водоемов, однако

наибольшую озабоченность в научном сообществе вызывают именно его ограниченные и невозполнимые запасы.

Преимущества сырьевого перехода.

Предотвращение захоронения. Применение вторичного сырья в производственных процессах, означает уменьшение потоков отходов, поступающих на полигоны захоронения. Извлечение из отходов пластиков и их повторное использование предотвращает накопление в природе веществ, которые сохраняются столетиями без признаков разложения. Обезвреживание и утилизация ртутьсодержащих изделий и других опасных отходов не только сохраняет природные ресурсы, но и предотвращает выделение токсичных соединений в окружающую среду.

Однако реальный экологический эффект достигается только при условии комплексной утилизации. Выборочное извлечение лишь наиболее ценных фракций, оставляющее значительную часть отходов без внимания, не решает проблему в полной мере. Необходимо применять технологии, способные работать со всем спектром образующихся материалов, включая низколиквидные и сложные в переработке компоненты.

Предотвращение добычи первичного сырья. Активное вовлечение вторичного сырья в хозяйственный оборот позволяет существенно сократить потребность в добыче первичных ресурсов. Каждая тонна переработанных металлов, пластиков или стекла предотвращает разработку новых месторождений, сохраняя природные ландшафты от разрушения. Это означает, что благодаря рециклингу удастся избежать образования дополнительных отвалов пустой породы, шламонакопителей и хвостохранилищ, которые неизбежно сопровождают добычу полезных ископаемых.

Кроме прямого ресурсосбережения, использование вторичных материалов помогает сохранить естественные экосистемы. Сокращение объемов горных работ уменьшает нагрузку на окружающую среду: леса остаются нетронутыми, реки не загрязняются стоками обогатительных фабрик, а почвы сохраняют свою плодородность. Это особенно важно для регионов с хрупкими экосистемами, где добыча ископаемых может привести к необратимым последствиям для биоразнообразия.

Таким образом, переход на вторичное сырье не только снижает объемы промышленных отходов, но и предотвращает будущий экологический ущерб, связанный с добычей первичных ресурсов.

Более высокие концентрации целевых материалов. Отходы различных отраслей промышленности и потребления часто содержат

значительно более высокие концентрации ценных материалов по сравнению с природными месторождениями.

Высокий ресурсный потенциал отходов электрического и электронного оборудования объясняется предварительной концентрацией материалов в процессе производства и использования изделий. Особенно это характерно для металлов – меди, никеля, содержание которых в отдельных видах отходов достигает 30–70 %, тогда как даже богатые руды редко содержат не более 5 % полезного компонента. Концентрации золота, платины и редкоземельных элементов в отработанных электронных устройствах могут быть на порядок выше, чем в разрабатываемых рудных месторождениях (табл. 4).

Объекты захоронения отходов прежних лет превращаются в уникальный вид сырьевой базы, где содержание полезных компонентов может в разы превышать их количество в традиционных рудах. Промышленные шламы, отходы гальванического производства, катализаторы и другие техногенные образования аккумулируют ценные компоненты, которые в природе встречаются в очень рассеянном состоянии. Техногенные месторождения, в отличие от природных, уже прошли стадию первичного обогащения в ходе производственных процессов. Их переработка требует меньших энергозатрат и обеспечивает более высокий выход конечного продукта. Кроме того, такие «месторождения» часто расположены вблизи промышленных центров, что значительно снижает транспортные расходы по сравнению с доставкой сырья из отдаленных районов добычи.

Меньший углеродный след вторичных материалов. Вторичное сырье чаще всего имеет более низкий углеродный след по сравнению с первичными материалами. Это характерно для металлургической отрасли, где переплавка вторичного алюминия требует лишь 5–10 % энергии от затрат на производство первичного металла, что соответствует сокращению выбросов CO₂ на 90–95 %. Похожие эффекты наблюдаются в переработке полимеров – производство изделий из вторичного пластика генерирует на 30–80 % меньше парниковых газов в зависимости от типа полимера и технологии переработки [42].

Многими исследователями прогнозируется трансформации нефтеперерабатывающей отрасли, при которой в ходе декарбонизации нефтеперерабатывающие заводы будут переориентированы на работу с альтернативным, возобновляемым и низкоуглеродным сырьем – отходами пластмасс, растительными маслами, биогазом (рис. 5).

Таблица 4
Содержание металлов в рудах и в отходах электрического и электронного оборудования (ОЭЭО)

Металл	Первичное сырье [28–30]			ОЭЭО		
	Основные минералы		Основные руды	Основные компоненты ОЭЭО [31–41]		Содержание в ОЭЭО в среднем [16], %
	Наименование минерала	Содержание в минерале, %		Наименование компонента	Содержание в компоненте, %	
Железо (сталь)	Гематит Fe_2O_3	70	Железные руды	Детали корпусов	50–90	38,7
Алюминий	Гиббсит $\text{Al}(\text{OH})_3$	34–35	Бокситы	Бытовой и оргтехники	5–40	6,5
Медь	Халькопирит CuFeS_2	30–35	Сульфидные медные руды	Медные провода	40–70	3,2
Никель	Пентландит $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$	22–42	Сульфидные медно-никелевые руды	Никель-металлогидридные аккумуляторы	29–42	0,8
Цинк	Сфалерит ZnS	67	Сульфидные цинковые руды	Щелочные батарейки	10–25	0,5
Свинец	Галенит PbS	80–87	Свинцовые руды	Свинцово-кислотные аккумуляторы	3,8–18,6	0,11
Олово	Касситерит SnO_2	75–79	Оловянные руды	Печатные платы	1–6	0,07
Кобальт	Кобальтин CoAsS	32–36	Медно-кобальтовые руды	Литий-ионные аккумуляторы	8,5–20	0,05
Сурьма	Антимонит/стибнит Sb_2S_3	72	Сурьмяные руды	Печатные платы	0,45–2,0	0,05
Серебро	Аргентит Ag_2S	87	Полиметаллические руды	Печатные платы	0,024–0,36	0,002
Золото	Самородное золото Au	75–99	Золото-кварцевые жилы	Печатные платы	0,007–0,035	0,0004
Палладий	Брэггит $(\text{Pd}, \text{Pt}, \text{Ni})\text{S}$	20–40	Медно-никелевые и сульфидные руды	Печатные платы	0,002–0,022	0,0002
Неодим	Баистнезит $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})\text{CO}_3\text{F}$	5–15	Баистнезит	Магниты в жестких дисках	21–27	0,000012

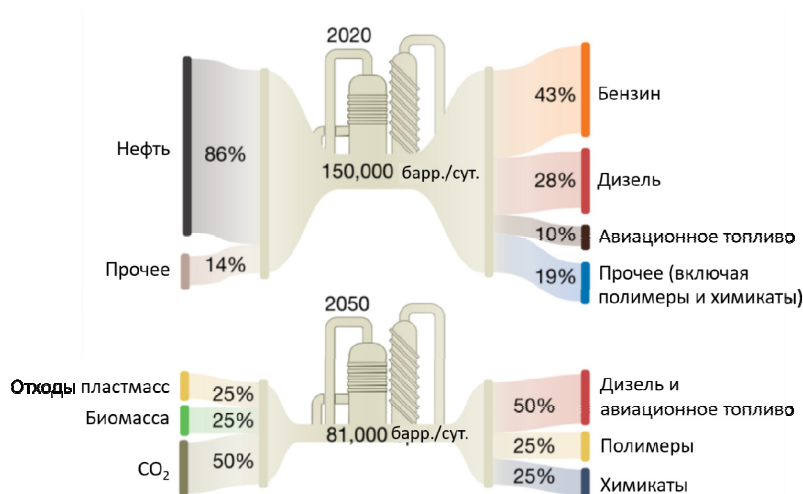


Рис. 5. Переход нефтеперерабатывающих заводов на низкоуглеродные технологии, возобновляемое и альтернативное сырье [43]

Необходимые условия для сырьевого перехода.

Комплексное использование сырья и промышленный симбиоз.

Комплексное использование сырья, при котором каждый компонент исходного материала находит свое применение в технологической цепочке меняет традиционную парадигму линейного производства, превращая отходы одного процесса в ценное сырье для другого.

Промышленный симбиоз представляет собой практическую реализацию этих принципов, когда предприятия различных отраслей объединяются в единую экосистему материальных потоков. В таких системах побочные продукты химического производства могут стать сырьем для металлургии, отходы энергетики – основой для строительных материалов, а избыточное тепло одного предприятия превращается в энергоресурс для другого. Эффективность промышленного симбиоза особенно ярко проявляется в создании территориально-производственных кластеров, где предприятия географически соседствуют и оптимизируют свои материально-энергетические потоки. Подобные системы позволяют минимизировать транспортные издержки и создать устойчивые цепочки кооперации.

Разработка техногенных месторождений и объектов захоронения отходов. При разработке стратегий сырьевого перехода принципиально важно рассматривать не только текущие потоки образуемых отходов, но и накопленный за десятилетия экологический ущерб в виде захороненных отходов. Техногенные месторождения, сформиро-

вавшиеся на полигонах и свалках, имеют значительный ресурсный потенциал, однако их освоение сопряжено с комплексом технологических и экологических вызовов.

Особенность ранее захороненных отходов заключается в их неоднородном составе и измененных физико-химических свойствах: за время нахождения в полигонах материалы подвергаются процессам деградации, смешиваются между собой и образуют новые соединения. Это требует разработки специализированных технологических решений, включающих поэтапную выемку отходов, их тщательную сортировку с применением современных сепарационных методов и каскадную переработку с максимальным извлечением полезных фракций.

Оперативное и централизованное управление потоками первичного и техногенного сырья. Централизованный подход к управлению потоками сырья и отходов позволяет оптимизировать распределение ресурсов на национальном и/или региональном уровнях, минимизируя потери и обеспечивая стабильность поставок для ключевых отраслей промышленности. Для оперативного управления полезно создать единую цифровую платформу учета и мониторинга всех видов сырья – от добываемых полезных ископаемых до вторичных материальных ресурсов. Прогнозирование потребностей промышленности и балансировка между использованием первичных и вторичных ресурсов позволит преодолеть ключевые проблемы фрагментированной системы ресурсопользования: неравномерность распределения перерабатывающих мощностей, дисбаланс спроса и предложения на вторичное сырье, неэффективную логистику. Информация о качественных и количественных характеристиках накопленных отходов позволит рассматривать их как стратегический резерв и альтернативу традиционным видам сырья. Инструментом оперативного и самообучающегося механизма эффективного управления вторичными ресурсами может стать искусственный интеллект.

Централизованное управление сырьевыми потоками создает основу для планомерного сокращения зависимости от первичных ресурсов и постепенного увеличения доли техногенного сырья в экономике. Такой подход превращает отходы из экологической проблемы в ценный экономический актив, обеспечивая тем самым устойчивость ресурсной базы в долгосрочной перспективе.

Экодизайн. Современный экодизайн решает три взаимосвязанные задачи сырьевого перехода. Во-первых, он минимизирует исполь-

зование первичных ресурсов за счет оптимизации конструкции и применения вторичных материалов. Во-вторых, обеспечивает легкую разборку и сепарацию компонентов по окончании жизненного цикла продукта. В-третьих, исключает применение веществ, затрудняющих переработку или опасных для окружающей среды.

Сырьевой переход без повсеместного внедрения экодизайна невозможен. Именно на стадии проектирования закладывается до 80 % экологического следа будущего изделия. Поэтому экодизайн становится не просто элементом корпоративной социальной ответственности, а необходимым условием устойчивого развития промышленности в условиях исчерпания природных ресурсов.

Государственное регулирование, нормирование и стимулирование. Основой государственного регулирования выступает разработка четких экологических стандартов и требований к обращению с первичными и вторичными ресурсами. Необходимо установление нормативов использования вторичного сырья в различных отраслях промышленности, требований к экодизайну продукции и обязательных показателей переработки отходов.

Нормативы утилизации в рамках расширенной ответственности производителей должны создавать экономические стимулы для разработки легко перерабатываемых изделий и способствовать формированию инфраструктуры по рециклингу отходов.

Стимулирующие меры со стороны государства должны создавать экономические преимущества для предприятий, внедряющих принципы экономики замкнутого цикла. Система налоговых льгот, субсидий и преференций для производителей, использующих вторичные ресурсы, способна значительно ускорить сырьевой переход. Важным инструментом становятся «зеленые закупки», предусматривающие приоритетное приобретение продукции из переработанных материалов.

Формирование позитивного отношения к изделиям из вторичного сырья. Позитивное восприятие продукции из рециклированных материалов в обществе является критически важным фактором для успешного сырьевого перехода. Основной проблемой остается укоренившееся представление о товарах из вторсырья как о низкосортных или менее ценных по сравнению с изделиями из первичных материалов. Для изменения этой парадигмы необходимо последовательно работать над повышением доверия потребителей через демонстрацию реальных примеров продукции, которая не только не уступа-

ет, но в некоторых случаях превосходит аналоги из первичного сырья по своим характеристикам.

Эффективным инструментом формирования положительного образа является прозрачная и достоверная маркировка, системы сертификации, подтверждающие экологическую безопасность и качество изделий из переработанных материалов.

Важную роль играет образовательная работа, направленная на разъяснение экологических и экономических преимуществ использования вторичного сырья, а также вовлечение бизнеса, общественных активистов, популярных лиц.

Разработка технологий для работы со вторичным сырьем. Для сырьевого перехода требуются новые технологические решения, адаптированные для получения и использования вторичного сырья. Особенность таких технологий заключается в необходимости учитывать специфические свойства вторичных ресурсов – их неоднородность, загрязненность и измененные физико-химические характеристики.

Ключевым направлением развития становится создание энерго- и ресурсосберегающих процессов, позволяющих эффективно работать с низкоконцентрированными и многокомпонентными материалами. Такие технологии должны обеспечивать глубокую переработку с максимальным извлечением полезных фракций при минимальных энергозатратах.

Параллельно с созданием новых решений необходима масштабная модернизация существующих производственных процессов с введением дополнительных стадий очистки, разработкой новых реагентов и катализаторов, оптимизацией температурных режимов, более активной автоматизацией, цифровизацией и использованием искусственного интеллекта.

Подготовка кадров. Переход к экономике замкнутого цикла и эффективному использованию вторичных ресурсов требует принципиально новых компетенций от специалистов различных отраслей. Формирование кадрового потенциала становится ключевым условием успешной трансформации сырьевой системы.

Необходима подготовка специалистов, способных работать на стыке традиционных производственных процессов и инновационных подходов к ресурсосбережению. Особое значение приобретает развитие междисциплинарных компетенций, сочетающих глубокие технологические знания с пониманием экологических и экономических аспектов экономики замкнутого цикла. Инженерные кадры должны быть

способны модернизировать существующие производственные цепочки под использование вторичных ресурсов, должны понимать полный жизненный цикл материалов и принципы экодизайна.

Таким образом, сырьевой переход требует тесной кооперации научных организаций, промышленных предприятий и органов регулирования. Только комплексный подход, сочетающий фундаментальные исследования, прикладные разработки и внедрение лучших доступных технологий, позволит создать эффективную систему ресурсосбережения, а решение экологических задач из бремени предприятий и регионов станет драйвером их устойчивого, в том числе экономического развития.

Список литературы

1. Metals and Minerals [Электронный ресурс] // Our World in Data. – URL: <https://ourworldindata.org/metals-minerals>.
2. Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? / G. Calvo, G. Mudd, A. Valero, A. Valero // Resources. – 2016. – Vol. 5, 36. DOI: 10.3390/resources5040036
3. Roetzer, N. Decreasing Metal Ore Grades – Is the Fear of Resource Depletion Justified? / N. Roetzer, M. Schmidt // Resources. – 2018. – Vol. 7, 88. DOI: 10.3390/resources7040088
4. Brooks, S. The Coming Copper Famine [Электронный ресурс] / S. Brooks // The North American Review. – 1918. – Vol. 207, no. 749. – P. 522–532. – URL: <https://www.jstor.org/stable/25121847> (дата обращения: 14.07.2025).
5. Crowson, P. Some observations on copper yields and ore grades / P. Crowson // Resources Policy. – 2012. – Vol. 37. – P. 59–72. DOI: 10.1016/j.resourpol.2011.12.004
6. Coiled Tubing Drilling and Real-Time Sensing – Enabling Prospecting Drilling in the 21st Century? / Society of Economic Geologists. – Inc. Special Publication, 2014. – Chapter 12. – P. 243–259.
7. Rock-to-Metal Ratio: A Foundational Metric for Understanding Mine Wastes / Nedal T. Nassar, Graham W. Lederer, Jamie L. Brainard, Abraham J. Padilla, Joseph D. Lessard // Environmental Science & Technology. – 2022. – Vol. 56 (10). – P. 6710–6721. DOI: 10.1021/acs.est.1c07875
8. Perspectives on environmental CO2 emission and energy factor in Cement Industry / G.U. Fayomi, S.E. Mini, O.S.I. Fayomi, A.A. Ayoola // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/331/1/012035
9. Rubio-Domingo, G. Making Plastics Emissions Transparent [Электронный ресурс] / G. Rubio-Domingo, A. Halevi. – URL: <https://ccsi.columbia.edu/sites/ccsi.columbia.edu/files/content/COMET-making-plastics-emissions-transparent.pdf> (дата обращения: 14.07.2025).

10. Suer, J. Carbon Footprint and Energy Transformation Analysis of Steel Produced via a Direct Reduction Plant with an Integrated Electric Melting Unit. J. Sustain / J. Suer, F. Ahrenhold, M. Traverso // Metall. – 2022. – Vol. 8. – P. 1532–1545. DOI: 10.1007/s40831-022-00585-x
11. Aluminium Carbon Footprint [Электронный ресурс] // International Aluminium. – URL: <https://international-aluminium.org/landing/aluminium-carbon-footprint-faqs/> (дата обращения: 14.07.2025).
12. Techno-economic assessment of atmospheric CO₂-based carbon fibre production enabling negative emissions / D. Keiner, A. Mühlbauer, G. Lopez [et al.] // Mitig Adapt Strateg Glob Change. – 2023. – Vol. 28, 52. DOI: 10.1007/s11027-023-10090-5
13. Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions Analysis of Primary and Recycled Aluminum in China / T. Peng, L. Ren, E. Du, X. Ou, X. Yan // Processes. – 2022. – Vol. 10. – P. 2299. DOI: 10.3390/pr10112299
14. РУСАЛ увеличил долю «зеленого» алюминия до 100% [Электронный ресурс] // Сайт компании РУСАЛ, 2024. – URL: <https://www.rusal.ru/press-center/press-releases/rusal-uvulichil-dolyu-zelenogo-alyuminiya-do-100-/> (дата обращения: 14.07.2025).
15. Policy Scenarios for Eliminating Plastic Pollution by 2040 / OECD Publishing. – Paris, 2024. DOI: 10.1787/76400890-en
16. The global E-waste Monitor 2024 [Электронный ресурс] / Cornelis P. Baldé, Ruediger Kuehr [et. al.]. – URL: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/12/GEM_2024_EN_11_NOV-web.pdf (дата обращения: 14.07.2025).
17. Waste generation per capita [Электронный ресурс] / Eurostat. – URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_pc034/default/table?lang=en (дата обращения: 14.07.2025).
18. Generation of municipal waste per capita [Электронный ресурс] / Eurostat. – URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_pc031/default/table?lang=en&fbclid=IwAR3GEKTjgP8Yh6 (дата обращения: 14.07.2025).
19. Greenhouse gas emissions and mitigation strategies in China's municipal solid waste sector under the impact of the COVID-19 pandemic / Y. Liu, R. Li, W. Cai, Q. Liu // Environmental Research. – 2025. – Vol. 266. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120497
20. Ling, Z.S. The knowledge, attitudes and practices in circular economy: A review of industrial waste management in China / Z.S. Ling, M.H. Jaafar, N. Ismail // Cleaner Waste Systems. – 2025. – Vol. 11. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100276
21. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации» в 2023 году [Электронный ресурс]. – URL: 2023.ecology-gosdoklad.ru (дата обращения: 23.03.2025).
22. Ferrous Metals: Material-Specific Data [Электронный ресурс] / EPA, <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/ferro->

us-metals-material-specific-data#:~:text=The%20generation%20of%20ferrous%20metals,and%20management%20of%20ferrous%20metals (дата обращения: 14.07.2025).

23. Other Nonferrous Metals: Material-Specific Data [Электронный ресурс] / EPA. – URL: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/other-nonferrous-metals-material-specific> (дата обращения: 14.07.2025).

24. Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges / H. Li [et al.] // *Green Chemistry*. – 2022. – Vol. 23. – P. 8899–9002. DOI: 10.1039/D2GC02588D

25. How circular is glass? A report on the circularity of single-use glass packaging, using Germany, France, the UK, and the USA as case studies, 2022.

26. Monitoring report 2021 European Declaration on Paper Recycling 2021–2030 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.paperforrecycling.eu/publications/> (дата обращения: 14.07.2025)

27. The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries / J. Soto-Paz, O. Arroyo [et. al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 78. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107724

28. Schwarz, H.-G. Aluminum Production and Energy / H.-G. Schwarz // *Encyclopedia of Energy*, 2004. DOI: 10.1016/B0-12-176480-X/00372-7

29. Smil, V. Still the iron age: Iron and steel in the modern world / V. Smil. – 1st Edition. – Publ.: Butterworth – Heinemann, 2016. – 280 p. DOI: 10.1016/C2014-0-04576-5

30. Старостин, В.И. Медные руды [Электронный ресурс] / В.И. Старостин // Большая российская энциклопедия 2004–2017. – URL: <https://old.bigenc.ru/geology/text/2198278> (дата обращения: 14.07.2025).

31. The lead-acid battery industry in China: Outlook for production and recycling / X. Tian, Y. Wu, Y. Gong, T. Zuo // *Waste Management & Research*. – 2015. DOI: 10.1177/0734242X15602363

32. Pita, F. Separation of Copper from Electric Cable Waste Based on Mineral Processing Methods: A Case Study / F. Pita, A.M. Castilho // *Minerals*. – 2018. – Vol. 8. DOI: 10.3390/min8110517

33. Characterization of Spent Nickel-Metal Hydride Batteries and a Preliminary Economic Evaluation of the Recovery Processes / S. Lin, K. Huang, I. Wang, I. Chou // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2016. – Vol. 66. DOI: 10.1080/10962247.2015.1131206

34. The Necessity of Recycling of Waste Li-Ion Batteries Used in Electric Vehicles as Objects Posing a Threat to Human Health and the Environment / A. Sobianowska-Turek, W. Urbańska [et. al.] // *Recycling*. – 2021. – Vol. 6. DOI: 10.3390/recycling6020035

35. Reducing Reliance on Cobalt for Lithium-ion Batteries, 2021 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/reducing-reliance-cobalt-lithium-ion-batteries#:~:text=Cobalt%20is%20considered%20the%20highest,in%20lithium%20ion%20EV%20batteries> (дата обращения: 14.07.2025).
36. EnviroLeach Announces Successful Recovery of Tin from Printed Circuit Boards, 2020 [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.accessnews-wire.com/newsroom/en/oil-gas-and-energy/enviroleach-announces-successful-recovery-of-tin-from-printed-circuit-boards-576302#:~:text=Typically%2C%20the%20tin%20content%20in,value%20of%20\\$17.00%20per%20kilogram](https://www.accessnews-wire.com/newsroom/en/oil-gas-and-energy/enviroleach-announces-successful-recovery-of-tin-from-printed-circuit-boards-576302#:~:text=Typically%2C%20the%20tin%20content%20in,value%20of%20$17.00%20per%20kilogram) (дата обращения: 14.07.2025).
37. Hydrometallurgical Recovery of Tin from Waste-Printed Circuit Boards / D. Vlasopoulos, P. Oustadakis, E. Remoundaki, S. Agatzini-Leonardou // Mater. Proc. – 2023. – Vol. 15, 90. DOI: 10.3390/materproc2023015090
38. Szałatkiewicz, J. Metals Content in Printed Circuit Board Waste / J. Szałatkiewicz // Pol. J. Environ. Stud. 2014. – Vol. 23, no. 6. – P. 2365–2369.
39. München, D.D. Neodymium as the main feature of permanent magnets from hard disk drives (HDDs) / D.D. München, H.M. Veit // Waste Management. – 2017. – Vol. 61. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.032
40. Hydrometallurgical recovery of neodymium from spent hard disk magnets: A life cycle perspective / E. Karal, M.A. Kucuker, B. Demirel, N.K. Coptý, K. Kuchta // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 288. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125087
41. Extraction and separation of potassium, zinc and manganese issued from spent alkaline batteries by a three-unit hydrometallurgical process / N.M. Garcia, B.D. Cano [et. al.] // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. – 2024. – Vol. 99. DOI: 10.1002/jctb.7649
42. Feasibility Study of Closed-Loop Recycling for Plastic Generated from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) in South Korea / W.H. Choi, K.P. Pae, N.S. Kim, H.Y. Kang // Energies. – 2023. – Vol. 16. DOI: 10.3390/en16176358
43. Vogt, E.T.C. The refinery of the future / E.T.C. Vogt, B.M. Weckhuysen // Nature. – 2024. – Vol. 629. – P. 295–306. DOI: 10.1038/s41586-024-07322-2

References

1. Metals and Minerals // Our World in Data. Режим доступа: <https://ourworldindata.org/metals-minerals>.
2. Calvo G., Mudd G., Valero A., Valero A., Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? Resources 2016, 5, 36; doi:10.3390/resources5040036.
3. Roetzer N., Schmidt M. Decreasing Metal Ore Grades—Is the Fear of Resource Depletion Justified? Resources 2018, 7, 88; doi:10.3390/resources7040088.

4. Brooks S. The Coming Copper Famine. *The North American Review*, vol. 207, no. 749 (Apr., 1918), pp. 522-532 (11 pages). <https://www.jstor.org/stable/25121847>.

5. Crowson P. Some observations on copper yields and ore grades. *Resources Policy* 37 (2012) 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.12.004>.

6. Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication. 2014. Chapter 12 Coiled Tubing Drilling and Real-Time Sensing. Enabling Prospecting Drilling in the 21st Century? pp. 243–259.

7. Nedal T. Nassar, Graham W. Lederer, Jamie L. Brainard, Abraham J. Padilla, and Joseph D. Lessard. Rock-to-Metal Ratio: A Foundational Metric for Understanding Mine Wastes. *Environmental Science & Technology*. 2022, vol. 56 (10), pp. 6710-6721. DOI: 10.1021/acs.est.1c07875.

8. Fayomi, G. U., Mini, S. E., Fayomi, O. S. I., Ayoola, A. A. Perspectives on environmental CO2 emission and energy factor in Cement Industry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, DOI:10.1088/1755-1315/331/1/012035.

9. Rubio-Domingo, G., Halevi, A. Making Plastics Emissions Transparent, <https://ccsi.columbia.edu/sites/ccsi.columbia.edu/files/content/COMET-making-plastics-emissions-transparent.pdf>.

10. Suer, J., Ahrenhold, F. & Traverso, M. Carbon Footprint and Energy Transformation Analysis of Steel Produced via a Direct Reduction Plant with an Integrated Electric Melting Unit. *J. Sustain. Metall.* 2022, vol. 8, pp. 1532–1545. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00585-x>.

11. Aluminium Carbon Footprint // International Aluminium, <https://international-aluminium.org/landing/aluminium-carbon-footprint-faqs/>

12. Keiner, D., Mühlbauer, A., Lopez, G. et al. Techno-economic assessment of atmospheric CO2-based carbon fibre production enabling negative emissions. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*. 2023, vol. 28, p. 52. <https://doi.org/10.1007/s11027-023-10090-5>.

13. Peng, T., Ren, L., Du, E., Ou, X., Yan, X. Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions Analysis of Primary and Recycled Aluminum in China // *Processes* 2022, 10, 2299, doi.org/10.3390/pr10112299.

14. RUSAL increased the share of “green” aluminum to 100% // RUSAL company website, 2024, <https://www.rusal.ru/press-center/press-releases/rusal-uvelichil-dolyu-zelenogo-aluminiya-do-100-/>

15. OECD (2024), Policy Scenarios for Eliminating Plastic Pollution by 2040, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/76400890-en>.

16. Cornelis P. Baldé, Ruediger Kuehr, et. al. The global E-waste Monitor 2024, https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/12/GEM_2024_EN_11_NOV-web.pdf.

17. Waste generation per capita // Eurostat, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_pc034/default/table?lang=en.

18. Generation of municipal waste per capita // Eurostat, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_pc031/default/table?lang=en&fbclid=IwAR3GEKTjgP8Yh6.
19. Liu, Y., Li, R., Cai, W., Liu, Q. Greenhouse gas emissions and mitigation strategies in China's municipal solid waste sector under the impact of the COVID-19 pandemic // *Environmental Research*. 2025, vol. 266, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120497>.
20. Ling, Z. S., Jaafar, M. H., Ismail, N. The knowledge, attitudes and practices in circular economy: A review of industrial waste management in China // *Cleaner Waste Systems*, 2025, vol. 11. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100276>.
21. State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation", 2023.
22. Ferrous Metals: Material-Specific Data // EPA, <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/ferrous-metals-material-specific-data#:~:text=The%20generation%20of%20ferrous%20metals,and%20management%20of%20ferrous%20metals>.
23. Other Nonferrous Metals: Material-Specific Data // EPA, <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/other-nonferrous-metals-material-specific>.
24. Li H. et al. Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges. *Green Chemistry*. 2022, vol. 23, pp. 8899-9002. <https://doi.org/10.1039/D2GC02588D>.
25. HOW CIRCULAR IS GLASS? A report on the circularity of single-use glass packaging, using Germany, France, the UK, and the USA as case studies, 2022 г.
26. MONITORING REPORT 2021 European Declaration on Paper Recycling 2021-2030, <https://www.paperforrecycling.eu/publications/>
27. Soto-Paz, J., Arroyo, O. et. al. The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries // *Journal of Building Engineering*. 2023, vol. 78. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107724>.
28. Schwarz, H.-G. Aluminum Production and Energy // *Encyclopedia of Energy*, 2004, <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00372-7>.
29. Iron Ore // *Minerals Engineering*, 2018, <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/iron-ore>.
30. Starostin, V. I. Copper ores // *The Great Russian Encyclopedia* 2004–2017, <https://old.bigenc.ru/geology/text/2198278>.
31. Tian, X., Wu, Y., Gong, Y., Zuo, T. The lead-acid battery industry in China: Outlook for production and recycling / *Waste Management & Research*. 2015, DOI:10.1177/0734242X15602363.
32. Pita, F., Castilho, A. M. Separation of Copper from Electric Cable Waste Based on Mineral Processing Methods: A Case Study. *Minerals*. 2018, vol. 8, DOI:10.3390/min8110517.

33. Lin, S., Huang, K., Wang, I., Chou, I. Characterization of Spent Nickel-Metal Hydride Batteries and a Preliminary Economic Evaluation of the Recovery Processes // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2016, vol. 66, DOI: 10.1080/10962247.2015.1131206.

34. Sobianowska-Turek, A., Urbańska, W. et. al. The Necessity of Recycling of Waste Li-Ion Batteries Used in Electric Vehicles as Objects Posing a Threat to Human Health and the Environment // *Recycling*. 2021, vol. 6, DOI: 10.3390/recycling6020035.

35. Reducing Reliance on Cobalt for Lithium-ion Batteries, 2021, <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/reducing-reliance-cobalt-lithium-ion-batteries#:~:text=Cobalt%20is%20considered%20the%20highest,in%20lithium%20ion%20EV%20batteries>.

36. EnviroLeach Announces Successful Recovery of Tin from Printed Circuit Boards, 2020, [https://www.accessnewswire.com/newsroom/en/oil-gas-and-energy/enviroleach-announces-successful-recovery-of-tin-from-printed-circuit-boards-576302#:~:text=Typically%2C%20the%20tin%20content%20in,value%20of%20\\$17.00%20per%20kilogram](https://www.accessnewswire.com/newsroom/en/oil-gas-and-energy/enviroleach-announces-successful-recovery-of-tin-from-printed-circuit-boards-576302#:~:text=Typically%2C%20the%20tin%20content%20in,value%20of%20$17.00%20per%20kilogram).

37. Vlasopoulos, D.; Oustadakis, P.; Remoundaki, E.; Agatzini-Leonardou, S. Hydrometallurgical Recovery of Tin from Waste-Printed Circuit Boards. *Mater. Proc.* 2023, vol. 15, 90 p. <https://doi.org/10.3390/materproc2023015090>.

38. Szałatkiewicz, J. Metals Content in Printed Circuit Board Waste // *Pol. J. Environ. Stud.* 2014, vol. 23, no. 6, pp. 2365-2369.

39. München, D. D., Veit, H. M. Neodymium as the main feature of permanent magnets from hard disk drives (HDDs) // *Waste Management*. 2017, vol. 61, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.032>.

40. Karal, E., Kucuker, M. A., Demirel, B., Coptý, N. K., Kuchta, K. Hydrometallurgical recovery of neodymium from spent hard disk magnets: A life cycle perspective // *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 288, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125087>.

41. Garcia, N. M., Cano, B.D., et. al. Extraction and separation of potassium, zinc and manganese issued from spent alkaline batteries by a three-unit hydrometallurgical process // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2024, vol. 99, <https://doi.org/10.1002/jctb.7649>.

42. Choi, W. H., Pae, K.P., Kim, N. S., Kang, H.Y. Feasibility Study of Closed-Loop Recycling for Plastic Generated from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) in South Korea // *Energies*. 2023, vol. 16, DOI: 10.3390/en16176358.

43. Vogt, E.T.C., Weckhuysen, B.M. The refinery of the future. *Nature*. 2024, vol. 629, pp. 295–306. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07322-2>.

Об авторах

Ильиных Галина Викторовна (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: eco@pstu.ru).

Полыгалов Степан Владимирович (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: eco@pstu.ru).

Коротаяев Владимир Николаевич (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: eco@pstu.ru).

Слюсарь Наталья Николаевна (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: eco@pstu.ru).

Вайсман Яков Иосифович (Пермь, Российская Федерация) – доктор медицинских наук, научный руководитель кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: eco@pstu.ru).

Рябов Валерий Германович (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Химические технологии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: xtf@pstu.ru).

About the authors

Galina V. Ilinykh (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, e-mail: eco@pstu.ru).

Stepan V. Polygalov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, e-mail: eco@pstu.ru).

Vladimir N. Korotaev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, e-mail: eco@pstu.ru).

Natalia N. Slyusar (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Environmental Protection, Perm National

Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, e-mail: eco@pstu.ru).

Yakov I. Vaysman (Perm, Russian Federation) – Doctor of Medical Sciences, Scientific Supervisor of the Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, e-mail: eco@pstu.ru).

Valery G. Ryabov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, e-mail: xtf@pstu.ru).

Поступила: 21.07.2025

Одобрена: 28.07.2025

Принята к публикации: 03.08.2025

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Сырьевой переход как основа экономики замкнутого цикла / Г.В. Ильиных, С.В. Польшгалов, В.Н. Коротаев, Н.Н. Слюсарь, Я.И. Вайсман, В.Г. Рябов // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2025. – № 2. – С. 136–162.

Please cite this article in English as:

Ilinykh G.V., Polygalov S.V., Korotaev V.N., Sliusar N.N., Vaisman Y.I., Ryabov V.G. Raw materials transition as a basis for a circular economy. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2025, no. 2, pp. 136-162 (*In Russ*).