СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ОТХОДОВ

Мусаев Маруфджан Набиевич
Кандидат технических наук, профессор кафедры "Безопасность жизнедеятельности" ТГТУ (Узбекистан)
E-mail: promecology@mail.ru
Тел: +998901685777
Эргашев Сардор Бахтиёр ўғли
Докторант кафедры "Безопасность жизнедеятельности" ТГТУ (Узбекистан)
E-mail: ergashevsardor1107@gmail.com
Тел: +998333112131

Аннотация. В статье рассмотрены перспективы безопасной переработки электронных отходов с учётом глобальных тенденций и прогнозов до 2030 года. Показаны экологические и социальные последствия неконтролируемого обращения с e-waste, а также международный опыт переработки в ЕС, США, Китае и Японии. Приведён сравнительный анализ технологий переработки, дополненный таблицами, диаграммами и технологической схемой. Отмечены перспективные решения — роботизация, искусственный интеллект, биотехнологии и экономика замкнутого цикла. Сделаны выводы о необходимости сочетания инновационных технологий, эффективной нормативной базы и международного сотрудничества.

Ключевые слова: переработка, утилизация, прогноз, международный опыт, экология, здоровье, регулирование, механика, пирометаллургия, гидрометаллургия, биометаллургия, схема, роботизация, интеллект, цикл, эффективность, устойчивость.

Abstract. The article discusses the prospects for safe recycling of electronic waste taking into account global trends and forecasts up to 2030. The environmental and social consequences of uncontrolled handling of e-waste, as well as international recycling experience in the EU, USA, China, and Japan, are shown. A comparative analysis of recycling technologies is presented, supplemented with tables, diagrams, and a technological scheme. Promising solutions are noted — robotics, artificial intelligence, biotechnology, and the circular economy. Conclusions are drawn about the need to combine innovative technologies, an effective regulatory framework, and international cooperation.

Keywords: recycling, utilization, forecast, international experience, ecology, health, regulation, mechanics, pyrometallurgy, hydrometallurgy, biometallurgy, scheme, robotics, intelligence, cycle, efficiency, sustainability.

ISSN 3030-3907

Annotatsiya. Maqolada elektron chiqindilarni xavfsiz qayta ishlash istiqbollari global tendensiyalar va 2030 yilgacha bo‘lgan prognozlar hisobga olingan holda ko‘rib chiqilgan. Elektron chiqindilarni nazoratsiz boshqarishning ekologik va ijtimoiy oqibatlari hamda Yevropa Ittifoqi, AQSh, Xitoy va Yaponiyadagi qayta ishlash bo‘yicha xalqaro tajriba ko‘rsatilgan. Qayta ishlash texnologiyalarining taqqoslangan tahlillari keltirilgan bo‘lib, ular jadvallar, diagrammalar va texnologik sxemalar bilan to‘ldirilgan. Yangi istiqbolli yechimlar sifatida avtomatlashtirish, sun’iy intellekt, biotexnologiyalar va yopiq aylanish iqtisodiyoti qayd etilgan. Innovatsion texnologiyalarni samarali normativ-huquqiy baza va xalqaro hamkorlik bilan uyg‘unlashtirish zarurligi haqida xulosalar chiqarilgan.

Kalit so‘zlar: qayta ishlash, utilizatsiya, prognoz, xalqaro tajriba, ekologiya, sog‘liq, tartibga solish, mexanika, pirometallurgiya, gidrometallurgiya, biometallurgiya, sxema, robotlashtirish, intellekt, aylanish, samaradorlik, barqarorlik.

Введение

Электронные отходы (e-waste) сегодня являются одним из самых быстрорастущих потоков твердых отходов в мире. По данным международных мониторингов, их объем ежегодно увеличивается на миллионы тонн, что связано с ускоренной цифровизацией, сокращением жизненного цикла техники и ростом потребления электроники в развивающихся странах. Уже к 2030 году ожидается резкий рост глобального объема e-waste, что превращает эту проблему в ключевой фактор экологической и экономической безопасности.[1]

Неправильное обращение с электронными отходами сопровождается утечкой в окружающую среду тяжелых металлов и токсичных соединений, что ведет к деградации почв, загрязнению водных ресурсов и рискам для здоровья человека. Одновременно e-waste содержит значительные запасы ценных материалов — меди, золота, серебра, палладия и редкоземельных элементов, что делает переработку не только экологической, но и экономически выгодной задачей.

Сложность проблемы заключается в необходимости интегрированного подхода. Решения должны учитывать экологические ограничения, социальные последствия и экономическую эффективность, а также опираться на современные технологии и международный опыт.[2] Для этого важно сопоставить глобальные тенденции, выявить наиболее успешные модели переработки в разных странах, оценить потенциал существующих и перспективных технологий и наметить пути повышения их результативности.

ISSN 3030-3907

Настоящая статья направлена на комплексное рассмотрение перспектив и проблем безопасной переработки электронных отходов. В ней систематизированы данные о глобальной динамике образования e-waste, представлены сравнительные таблицы и прогнозные диаграммы, проведён анализ технологий переработки с использованием схем и моделей, а также предложены направления дальнейшего развития.

Глобальные тенденции образования электронных отходов

Электронные отходы образуют один из наиболее динамично растущих потоков твёрдых отходов в мире. По данным международных исследований, в 2019 году их объём составил 53,6 млн тонн, а уже в 2022 году превысил 59 млн тонн. Прогнозы показывают, что к 2030 году этот показатель достигнет 74 млн тонн, что соответствует среднегодовому приросту около 3 %.[3]

Рост e-waste характерен для всех регионов, однако выражен неравномерно. Наибольший вклад вносят Азия и Европа, где сосредоточены как крупнейшие производители, так и основные потребители электроники.[4] В то же время в Африке и Океании абсолютные объёмы меньше, но темпы роста также остаются высокими. Статистические данные по регионам приведены в обобщённой таблице (таблица 1).

Таблица 1

Образование электронных отходов по регионам мира в 2019–2022 гг. и прогноз до 2030 г.

Регион	2019 (млн т)	2022 (млн т)	Прогноз 2030 (млн т)	Среднегодовой рост, %
Азия	24.9	27.8	36.0	3.3
Европа	12.0	13.4	16.0	2.8
Северная Америка	7.5	8.4	10.0	3.0
Африка	2.9	3.2	4.0	2.7
Океания	0.7	0.8	1.0	2.5
Мир (итого)	53.6	59.0	74.0	3.0

Визуализация этих данных позволяет наглядно представить глобальную динамику. Диаграмма отражает, что к 2030 году лидерами по объёмам станут Азия и Америка, в то время как Европа сохранит высокую долю при умеренных темпах роста (рисунок 1).

ISSN 3030-3907

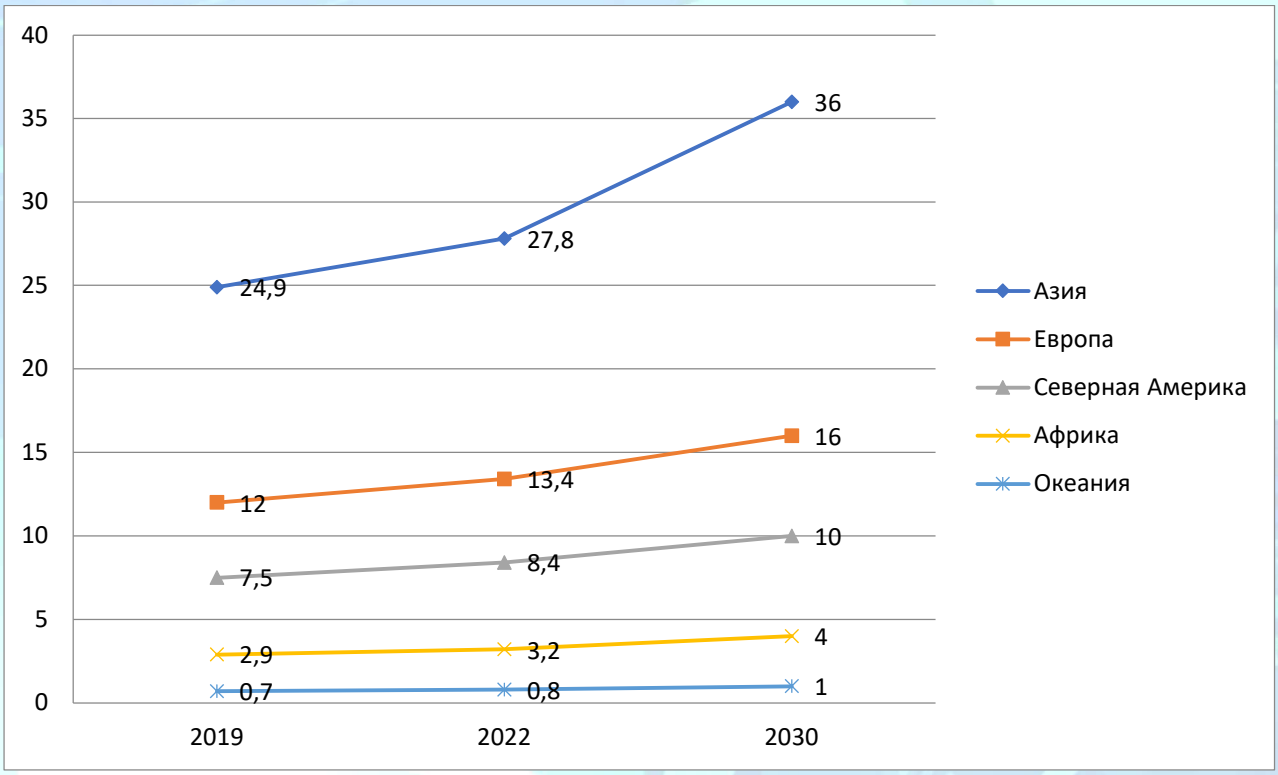


Рисунок 1 – Прогноз роста образования электронных отходов по регионам мира до 2030 года (млн тонн)

Особого внимания заслуживает сравнение между объёмами образованных отходов и их переработкой. Несмотря на устойчивый рост e-waste, доля официально переработанных отходов остаётся значительно ниже. Эта диспропорция иллюстрируется отдельным графиком, где показана динамика образования и переработки e-waste в 2019–2023 гг. (рисунок 2).

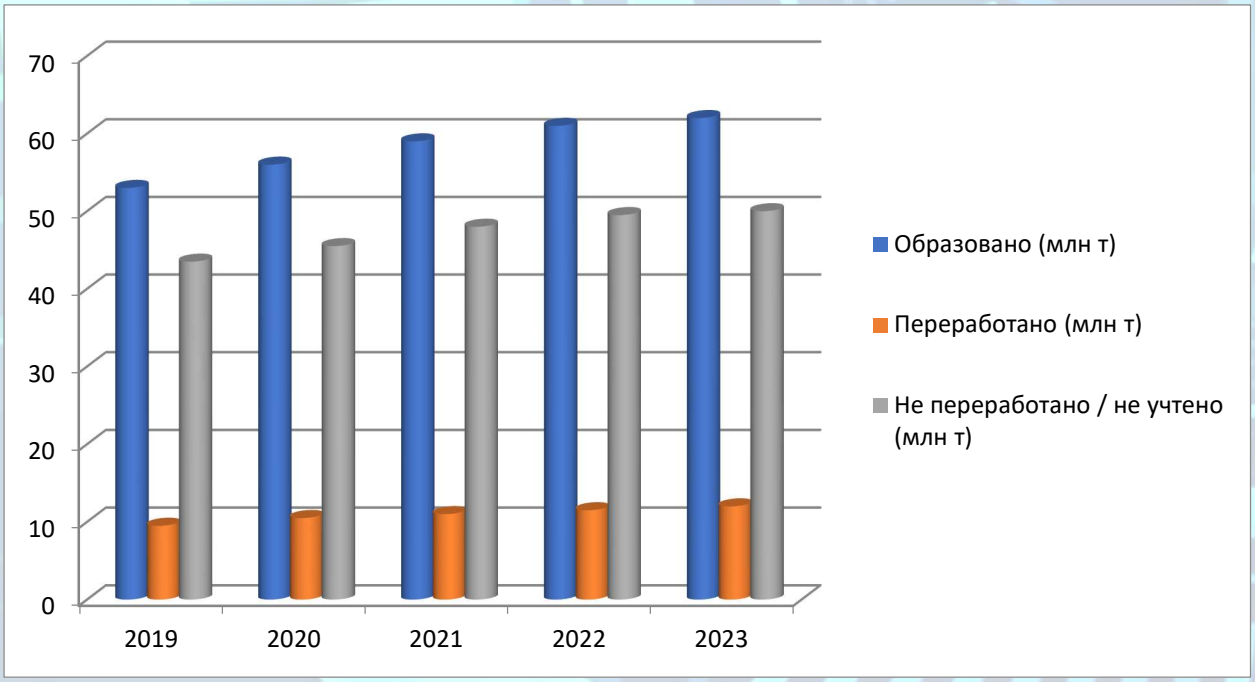


Рисунок 2 – Динамика образования и переработки электронных отходов в мире в 2019–2023 гг.

ISSN 3030-3907

Таким образом, глобальные тенденции указывают не только на быстрый рост общего объёма e-waste, но и на сохраняющийся разрыв между производством и переработкой. Этот дисбаланс создаёт серьёзные вызовы для систем обращения с отходами и подчеркивает необходимость перехода к более эффективным и технологичным методам переработки.

Экологические и социальные проблемы переработки

Переработка электронных отходов сопряжена с целым рядом экологических рисков. Одним из наиболее серьёзных последствий является загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами и токсичными соединениями. При разрушении или примитивной переработке устройств в почву и воду попадают ртуть, свинец, кадмий, бромированные антипирены и диоксины, что приводит к деградации экосистем и накоплению опасных веществ в цепях питания человека и животных.[5]

Кроме воздействия на окружающую среду, e-waste представляет прямую угрозу для здоровья работников перерабатывающих предприятий. В странах с низким уровнем дохода нередко используются неформальные методы переработки — выжигание кабелей, кислотное травление печатных плат, ручная разборка без средств защиты. Эти процессы сопровождаются выделением токсичных паров и пыли, что вызывает профессиональные заболевания дыхательных путей, кожи и нервной системы.

Социальные проблемы проявляются в том, что значительная часть e-waste экспортируется из развитых стран в развивающиеся. В результате отходы концентрируются в регионах с низким уровнем регулирования, где переработка осуществляется кустарными методами.[6] Это усиливает социальное неравенство, поскольку наиболее уязвимые группы населения вынуждены работать в условиях высокого риска при минимальной оплате.

Наряду с экологическими рисками наблюдаются и экономические потери. Из-за недостаточной переработки теряются редкоземельные элементы и драгоценные металлы, которые могли бы быть повторно использованы в производстве. Визуализация соотношения переработанных и не переработанных объёмов e-waste в последние годы наглядно показывает, что доля неучтённых отходов остаётся критически высокой (рисунок 2).

Таким образом, экологические и социальные последствия неправильной переработки выходят далеко за рамки проблемы утилизации. Они затрагивают здоровье населения, устойчивость экосистем, справедливость международных отношений и ресурсную безопасность.[7] Решение этих вопросов требует системного подхода, основанного на развитии технологий, эффективном регулировании и международном сотрудничестве.

ISSN 3030-3907

Международный опыт переработки

Мировая практика показывает, что эффективное управление электронными отходами возможно только при сочетании законодательных мер, технологических инноваций и экономических стимулов. Рассмотрим особенности подходов в наиболее показательных странах и регионах.

Европейский Союз. В Европейском Союзе действует директива, которая предусматривает обязательный сбор и переработку определённой доли электрического и электронного оборудования. Финансирование системы осуществляется за счёт производителей, что стимулирует внедрение экодизайна и развитие замкнутых циклов.[8] В результате доля переработки в ряде стран ЕС превышает 40 %, а показатели повторного использования материалов остаются одними из самых высоких в мире.

США. В Соединённых Штатах отсутствует единое федеральное законодательство по управлению e-waste, однако законы отдельных штатов предусматривают программы расширенной ответственности производителя (EPR) и бесплатный приём техники в специализированных пунктах. Это обеспечивает высокий уровень переработки бытовой электроники, хотя общий охват системы остаётся неравномерным.

Китай. Китай является крупнейшим производителем и одновременно генератором электронных отходов. Для решения проблемы в стране реализуется национальная программа «Circular Economy», которая ориентирована на замкнутые производственные циклы. В последние годы активно внедряются автоматизированные линии переработки и усиливается контроль над нелегальным сектором. Тем не менее быстрый рост внутреннего потребления создаёт нагрузку на существующую инфраструктуру.

Япония. В Японии действует закон об утилизации бытовой электроники, который требует сортировки техники на четыре категории: телевизоры, холодильники, кондиционеры и стиральные машины. Сбор средств на переработку осуществляется в момент покупки оборудования, что позволяет поддерживать стабильное финансирование отрасли. Более 80 % материалов извлекается повторно, что делает японскую модель одной из наиболее успешных в мире.

ISSN 3030-3907

Таблица 2

Сравнительные показатели систем переработки электронных отходов в ЕС, США, Китае и Японии (уровень переработки, ключевые механизмы регулирования, доля повторного использования)

Страна / регион	Уровень переработки (%)	Ключевые механизмы регулирования	Доля повторного использования (%)
Европейский Союз	40–50	Директива WEEE, финансирование за счёт производителей, обязательные квоты	70–80
США	20–25	Законы отдельных штатов, программы EPR, бесплатные пункты приёма	40–50
Китай	25–30	Национальная программа «Circular Economy», государственные инвестиции, автоматизация	50–60
Япония	45–50	Закон об утилизации бытовой электроники, плата за переработку при покупке	80–85

Таким образом, международный опыт демонстрирует широкий спектр организационных решений: от жёстких директив и обязательного финансирования переработки (ЕС, Япония) до децентрализованных программ отдельных штатов (США) и масштабных государственных инициатив (Китай). Сравнительный анализ этих моделей позволяет выявить элементы, которые могут быть адаптированы для других стран с учётом их социально-экономических условий.

Основные проблемы безопасной переработки

Несмотря на очевидные экологические и экономические преимущества, переработка электронных отходов сталкивается с рядом серьёзных ограничений.

Технологические сложности. Электронные устройства имеют гетерогенный состав: платы, корпуса, кабели, экраны и множество мелких

ISSN 3030-3907

деталей. Их механическая разборка и сепарация требуют значительных затрат, а существующие методы не всегда позволяют эффективно извлечь редкоземельные элементы и драгоценные металлы.[9]

Токсичность и риски для здоровья. Во многих странах, особенно развивающихся, переработка осуществляется кустарными методами — выжиганием кабелей и кислотным травлением печатных плат. Такие способы приводят к образованию токсичных газов, пыли и жидких отходов, что создаёт угрозу как для работников, так и для местных экосистем.

Экономические и инфраструктурные барьеры. Строительство современных заводов требует больших капиталовложений. При этом низкий уровень сбора отходов и слабая вовлечённость населения в систему утилизации снижают рентабельность переработки. Дополнительную нестабильность вносят колебания мировых цен на вторичные металлы.[10]

Нормативно-правовые пробелы. Во многих государствах отсутствует полноценное законодательство в сфере e-waste. Даже там, где действуют системы расширенной ответственности производителей, их исполнение зачастую недостаточно эффективно. Усиливает проблему и трансграничная нелегальная торговля отходами.

Таблица-3

Сравнительный анализ методов извлечения металлов из печатных плат (пирометаллургия, гидрометаллургия, биометаллургия, механическая переработка)

Метод	Принцип действия	Преимущества	Недостатки	Выход металлов (%)
Пирометаллургия	Плавка при высоких температурах	Высокая производительность, большие объёмы	Высокие энергозатраты, выбросы токсичных газов	70–85
Гидрометаллургия	Выщелачивание химическими растворами	Высокая селективность, низкие температуры	Образование токсичных жидких отходов	85–95
Биометаллургия	Выщелачивание с применением	Экологичность, низкие энергозатраты	Длительность процесса, чувствительн	60–80

ISSN 3030-3907

	микроорганизмов		ость к условиям	
Механическая	Дробление, сепарация (магнитная, электрическая, воздушная)	Простота, безопасность	Низкая эффективность для мелких частиц, пылеобразование	50–70



Рисунок 3 – Технологическая схема гибридного гидрометаллургического процесса переработки печатных плат

ISSN 3030-3907

Таким образом, существующие барьеры охватывают как технологические, так и социально-экономические и правовые аспекты. Их комплексное преодоление требует внедрения инноваций, совершенствования нормативной базы и развития международного сотрудничества.

Перспективные направления и решения

Развитие переработки электронных отходов невозможно без внедрения новых технологий и организационных подходов, которые делают процесс более эффективным и экологически безопасным.

Роботизация и искусственный интеллект. Автоматизированные линии с системами компьютерного зрения позволяют точно разбирать устройства и выделять отдельные компоненты.[11] Это повышает уровень извлечения ценных металлов и снижает риски для работников.

Совершенствование гидро- и биометаллургии. Новые методы селективного выщелачивания и использование специализированных микроорганизмов сокращают затраты энергии и уменьшают количество токсичных отходов. Такие подходы рассматриваются как альтернатива пирометаллургии при промышленном масштабировании.

Экономика замкнутого цикла. Переход от линейной модели «производство – использование – выброс» к циклической системе требует внедрения экодизайна, повторного использования и ремонта техники. Развитие рынка refurbished-устройств и сервисных бизнес-моделей (например, аренды техники) уже демонстрирует положительные результаты.

Международное сотрудничество и регулирование. Согласованность нормативной базы, выполнение требований Базельской конвенции и развитие систем расширенной ответственности производителей (РОП) формируют основу устойчивого управления e-waste.

Осведомлённость общества. Образовательные программы и удобная инфраструктура приёма техники мотивируют население сдавать старые устройства в переработку вместо отправки их на свалки.

ISSN 3030-3907

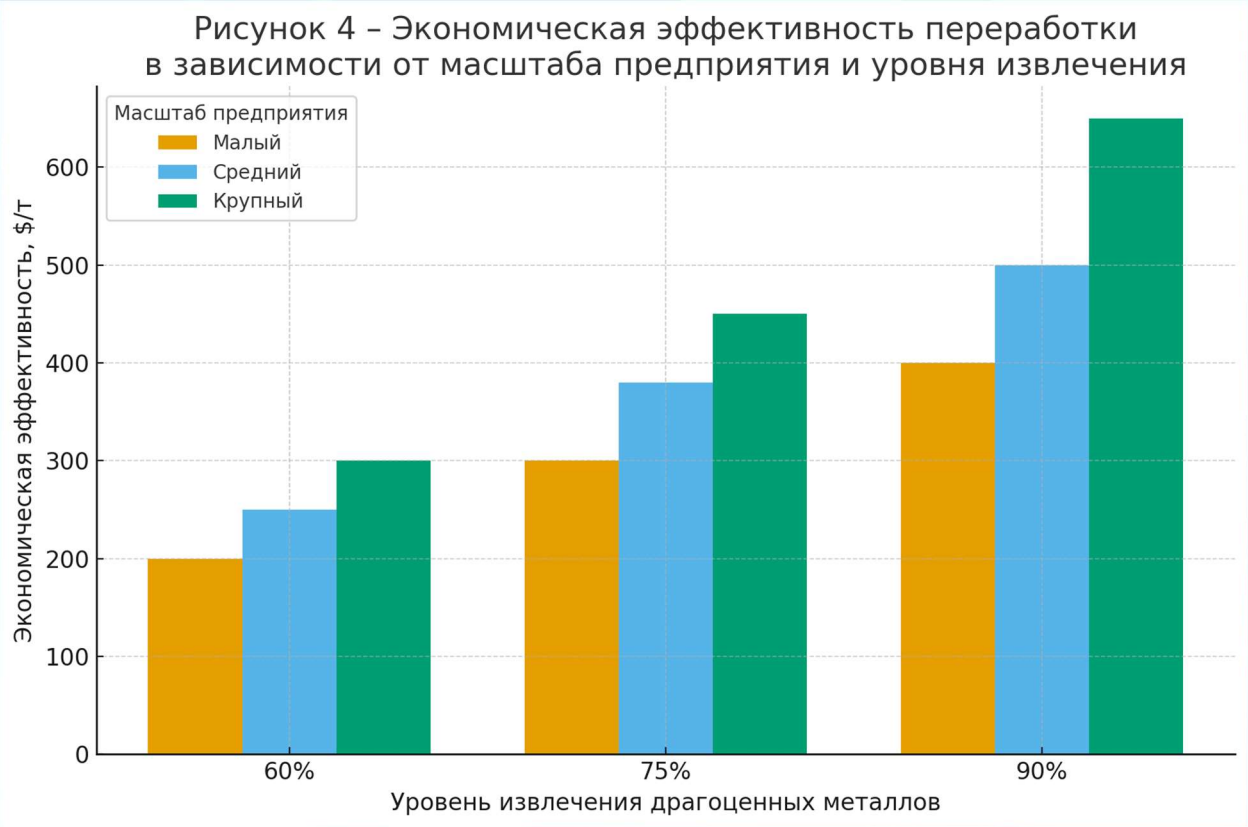


Рисунок 4 – Экономическая эффективность переработки в зависимости от масштаба предприятия и уровня извлечения драгоценных металлов

Прогнозы до 2030 года

Анализ международных статистических данных показывает, что к 2030 году объём электронных отходов в мире превысит 74 млн тонн. Основной вклад в рост внесут страны Азии и Америки, где быстрыми темпами увеличивается потребление бытовой и промышленной электроники. Европа сохранит относительно стабильные показатели, в то время как Африка и Океания будут демонстрировать умеренный, но постоянный рост.

Сравнение регионов позволяет выделить общую закономерность: наибольшие абсолютные объёмы фиксируются в странах с высоким уровнем производства и потребления, а наибольшие темпы прироста — в развивающихся экономиках. Это создаёт дополнительное давление на национальные системы обращения с отходами и усиливает необходимость глобальной координации.[12]

Прогнозные расчёты подчёркивают важность внедрения инновационных технологий переработки и гармонизации нормативной базы, иначе разрыв между образованием и переработкой e-waste продолжит увеличиваться.

Заключение

ISSN 3030-3907

Электронные отходы представляют собой одновременно угрозу для экологии и источник ценных ресурсов. Анализ глобальных данных показывает устойчивый рост e-waste, который к 2030 году достигнет рекордных масштабов. Нынешний уровень переработки остаётся недостаточным, что приводит к утрате редкоземельных металлов и накоплению токсичных веществ в окружающей среде.

Международный опыт демонстрирует разные подходы: жёсткие директивы и финансирование переработки за счёт производителей (ЕС, Япония), децентрализованные программы штатов (США), масштабные государственные инициативы (Китай). Сравнение этих моделей позволяет выделить наиболее эффективные элементы, которые могут быть адаптированы в других странах.

Сравнительный анализ технологий показывает, что ни один метод не является универсальным. Механическая переработка удобна, но ограничена по эффективности; пирометаллургия обеспечивает высокий выход металлов, но экологически небезопасна; гидрометаллургия и биометаллургия перспективны, но требуют дальнейшей оптимизации. Комбинированные схемы, включающие роботизацию и искусственный интеллект, становятся наиболее результативным направлением развития.

Для устойчивого управления электронными отходами необходим комплексный подход:

- внедрение инновационных технологий, включая автоматизацию и биопроцессы;
- ужесточение и унификация нормативной базы;
- развитие экономики замкнутого цикла;
- повышение экологической культуры общества.

Реализация этих мер позволит превратить проблему электронных отходов из экологической угрозы в возможность для ресурсной независимости и устойчивого развития.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forti V., Baldé C. P., Kuehr R., Bel G. The Global E-waste Monitor 2023. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). – Bonn, Geneva, Rotterdam, 2023. – 164 p.
2. Song Q., Li J. A systematic review of the human body burden of e-waste exposure in China // Environment International. – 2014. – Vol. 68. – P. 82–93.
3. Akcil A., Erust C., Gahan C. S., Ozgun M., Sahin M., Tuncuk A. Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixiviants – A review // Waste Management. – 2015. – Vol. 45. – P. 258–271.

ISSN 3030-3907

4. Isildar A., van Hullebusch E. D., Lenz M., Du Laing G., Marra A., Cesaro A., Panda S. Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE) – A review // Journal of Hazardous Materials. – 2019. – Vol. 362. – P. 467–481.
5. Zeng X., Li J. Measuring the recyclability of e-waste: an innovative method and its implications // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 131. – P. 156–162.
6. Widmer R., Oswald-Krapf H., Sinha-Khetriwal D., Schnellmann M., Böni H. Global perspectives on e-waste // Environmental Impact Assessment Review. – 2005. – Vol. 25, no. 5. – P. 436–458.
7. Жариков Ю. В., Лебедев В. А. Гидрометаллургическая переработка вторичного сырья, содержащего благородные металлы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 9. – С. 65–71.
8. Румянцев И. С., Скоробогатов Г. А., Юшин В. В. Современные методы переработки электронного и электрического лома // Цветные металлы. – 2020. – № 5. – С. 45–51.
9. Grant K., Goldizen F. C., Sly P. D., Brune M. N., Neira M., van den Berg M., Norman R. E. Health consequences of exposure to e-waste: a systematic review // The Lancet Global Health. – 2013. – Vol. 1, no. 6. – P. e350–e361.
10. Мусаев М. Н., Эргашев С. Б. (2023). Электронные отходы в Узбекистане: исследование текущего состояния управления утилизацией и воздействия на здоровье, а также рекомендации для будущих действий. Innovations in Technology and Science Education, 14(2), 125–134.
11. Musayev M. N., Ergashev S. B., Khusanov E. Sh. (2024). Health and Environmental Risks of Unused Mobile Phones Kept at Home. Ta'lim fidoyilari, May, Part 1, 198–204.
12. Musayev M. N., Ergashev S. B. (2024). The Solution to the Problem of Electronic Waste in Uzbekistan: Challenges, Innovations and Collaborative Solutions. Innovative International Multi-disciplinary Journal of Applied Technology, 2(5), 260–267.

ISSN 3030-3907