

## **К ВОПРОСУ ОБ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ЭЛЕКТРОНИКИ**

### **ON THE ISSUE OF ELECTRONIC WASTE DISPOSAL**

**Аннотация:** Работа посвящена проблеме переработки отходов электроники и электротехнического оборудования. Указаны объемы использования электронных устройств и утилизации их отходов. Описано негативное влияние компонентов электронных отходов на организм человека. Рассмотрены наиболее востребованные методы утилизации отходов электроники на примере печатных плат. Особое внимание уделено перспективам развития утилизации электронных отходов в России.

**Abstract:** The work is devoted to the problem of waste recycling of electronics and electrical equipment. The volumes of use of electronic devices and their waste disposal are indicated. The negative impact of electronic waste components on the human body is described. The most popular methods of waste disposal of electronics on the example of printed circuit boards are considered. Special attention is paid to the prospects for the development of electronic waste disposal in Russia.

**Ключевые слова:** отходы электроники, методы переработки, печатные платы, утилизация.

**Keywords:** electronics waste, processing methods, printed circuit boards, disposal.

**Введение.** В нынешнюю эпоху глобальной цифровизации постоянно растут объемы используемого электротехнического оборудования. Последнее ведет к увеличению соответствующего вида отходов, а также возникновению проблем с их эффективной переработкой. С каждым годом электронные устройства становятся всё более сложными, и, вместе с тем, усложняется утилизация их отходов. При изготовлении электронных изделий, интегральных схем, при обработке, выращивании полупроводниковых кристаллов, утилизация исходных материалов зачастую происходит с низким коэффициентом использования, большая их часть идет в отходы, попадая биосферу и вызывая, таким

образом, загрязнение среды обитания человека [7]. Последнее связано с тем, что в состав материалов приборов входят тяжелые металлы, а также токсичные органические соединения [Акаев]. В этой связи проблема переработки отходов электроники является особенно актуальной. Цель настоящей работы – проанализировать существующие способы переработки отходов электроники утилизации и предложить пути её развития.

**Основная часть.** *Объемы использования и утилизации электроники.* В 2021 году мировая гора отходов электронного и электрического оборудования составила около 57,4 млн тонн. В отчете Global E-waste Monitor 2020 [1] сообщалось, что в 2019 году было произведено около 53,6 млн метрических тонн (Мт) электронных отходов. Последнее соответствует приросту количества отходов на 21% за пять лет.

Согласно прогнозу, содержащемуся в новом отчете [1], объем таких электронных отходов, как выброшенные продукты с батареей или штепселем, к 2030 году достигнет 74 млн. тонн, то есть практически удвоится всего за 16 лет (рис. 1). Таким образом, электронные отходы становятся наиболее быстро растущим потоком не только промышленных, но и бытовых отходов, в основном вследствие увеличения темпов потребления электрического и электронного оборудования, сокращения сроков службы и фактического отсутствия возможности ремонта.



Рис. 1 Ежегодный прирост электронных отходов в мире

*Негативное влияние электронных отходов на человека.* Утилизация ОЭЭО (отходы электрического и электронного оборудования) без учета требований нормативных документов создает риски для окружающей среды и человека. Основную опасность представляют тяжелые металлы (свинец, ртуть, кадмий и др.) и некоторые токсичные вещества, например, асбест.

Таблица 1. Влияние некоторых токсичных веществ на организм человека [8, 9]

Вещество	Содержание в элементах электроники	Приносимый вред
Свинец	Припой, покрытие контактных площадок печатных плат и покрытие выводов электронных компонентов	Изменение репродуктивной, нервной, сердечно-сосудистой, иммунной и эндокринной систем. Его токсическое действие проявляется в изменениях функционального состояния почек, синтеза гемоглобина, процессов окислительного метаболизма и энергетического обмена. Вызывает замещение кальция в костной ткани; нарушение роста и развития детей.
Бериллий	Компьютерная техника	Вызывает бериллиоз, при котором в результате ряда аутоиммунных процессов под влиянием бериллия специфически изменяются собственные белки организма. Бериллий нарушает активность ряда ферментов, влияет на метаболизм магния в организме человека.
Ртуть	Лампы, полупроводники	Вызывает серьезные нарушения в работе внутренних органов и систем в организме человека. Ртуть относят к классу опасных кумулятивных ядов, которые оказывают на организм целый ряд негативных воздействий – часть из них формируется сразу в острый реактивный период отравления, остальные же последствия имеют среднесрочную и долгосрочную основу.
Кадмий	Батареи, полупроводники, флюс	Токсичное воздействие кадмия основано на блокировке серосодержащих аминокислот (цистеин, метионин, глутатион), что приводит к нарушению белкового обмена и поражению ядра клетки. Кадмий способствует выводу кальция из костей и поражает нервную систему. Может накапливаться в почках и печени. Очень медленно выводится из организма.
Асбест	Электрические нагревательные приборы, плиты для кабельных мостов.	Вызывает такие специфические заболевания, как: асбездоз, рак легких, мезотелиома плевры или брюшины. Накопление ртути в организме человека способствует развитию аллергических реакций, нарушению мозговой деятельности, ухудшению зрения, катаракты, слепоты, ослаблению иммунной системы, депрессивных состояний, поражению почек, тератогенных эффектов.

В таблице 1 представлено описание негативного действия некоторых токсичных веществ, содержащихся в отходах электротехнического оборудования, на организм человека. Известно [3, с. 2], что все тяжелые металлы обладают склонностью к биоаккумуляции, вследствие чего многократно усиливается их способность поражать жизненно важные системы человеческого организма [5, с. 14]. Учитывая большое разнообразие ядовитых веществ в отходах электроники, необходима разработка таких способов переработки, которые

бы существенно минимизировали степень опасности таких отходов для всех живых организмов.

*Переработка отходов электронной промышленности.* Процесс переработки бытовых и промышленных электронных приборов и устройств (телевизоров, компьютеров, мониторов, принтеров, сканеров, телефонов, факсов и видеозаписывающих устройств) может принести значительную выгоду за счет повторного использования добытых из них цветных металлов. Данные, представленные на рис. 2, свидетельствуют о достаточно высоком содержании ценных компонентов в ломе печатных плат. Вместе с тем, указанные компоненты не вовлекаются во вторичное производство. Для предприятий-производителей печатных плат данный факт, безусловно, является упущенной возможностью получения дополнительного дохода. Например, при образовании лома печатных плат в количестве 30,6 тыс. тонн в год и содержании золота в ломе 185 г/т – для высокосортных и 50 г/т – для низкосортных, потенциальный доход может составить 9438,03 млн. руб. и 1982,14 млн. руб в год соответственно. При комплексной переработке и извлечении других компонентов приведенные цифры могут вырасти в несколько раз.

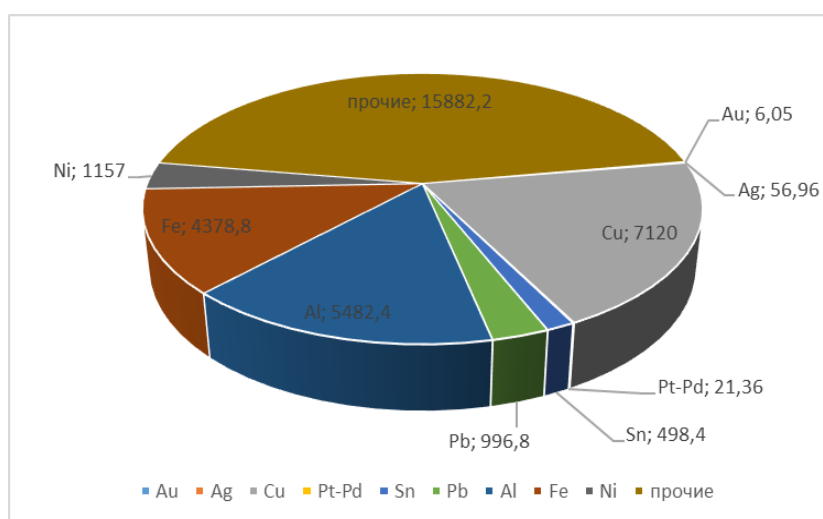


Рис. 2. Основные ценные металлы в ломе печатных плат, тонны.

*Технологии переработки печатных плат.* В качестве основного вида электронных отходов нами был выбран лом печатных плат, поскольку на сегодняшний день именно в такой форме содержится большая часть используемых в электронике металлов. Печатные платы являются одним из наиболее важных компонентов электронного оборудования. Они представляют собой платформу, на которой устанавливаются и связываются между собой микроэлектронные компоненты, такие как полупроводниковые микросхемы и конденсаторы. Различные способы переработки печатных плат представлены в работах [7, с. 686; 2, с. 10]. Переработка плат включает в себя три этапа обработки: предварительная обработка, физическая переработка и химическая переработка. В предварительную обработку входит

демонтаж многофазовых и токсичных элементов, измельчение или разделение. Затем следует физическая переработка. Потом материалы извлекают путем химического процесса переработки. Описание способов переработки отходов приведено в табл. 2.

Таблица 2. Существующие методы переработки электротехнических отходов

Метод	Сущность метода	Эффективность
<i>Предварительные методы</i> Механическая переработка	Разобранные детали размалываются до необходимых размеров, после чего они поступают на установку тонкого измельчения.	Представляют собой грубую переработку; являются необходимым этапом при использовании физических и химических методов утилизации отходов. Неизбежны потери драгоценных материалов.
Метод воздушной сепарации	Разделение диспергированных твердых частиц происходит благодаря различным размерам и плотностям частиц.	
<i>Физические методы</i> Электростатический метод	Для разделения сыпучих материалов использует электростатическое поле, которое воздействует на заряженные или поляризованные тела. Метод основан на различиях в траектории перемещения заряженных коротким разрядом, трением и другими способами частиц в электрическом поле.	Имеют меньшие затраты, проще реализуются и не наносят вред окружающей среде. Востребованы только при переработке металлической фракции, так как несут в себе грубую очистку от примесей.
Магнитная сепарация	Технология разделения материалов на основе различия их магнитных свойств (магнитной восприимчивости) и различного поведения материалов в зоне действия магнитного поля, изменяющего гравитационную траекторию материалов.	
<i>Химические методы</i> Пиролиз	Происходит разложение любых соединений на составляющие менее тяжелые молекулы или химические элементы под действием повышенной температуры.	Имеют большую стоимость, в сравнении с физическими методами; являются более сложными. Являются незаменимыми при разделении металлической и неметаллической фракций.
Гидрометаллургический метод	Метод заключается в выщелачивании металлов с применением растворов кислот и щелочей, за которым следует электрорафинирование желаемых металлов.	
Биометаллургический метод	Микроорганизмы используют металлы, присутствующие во внешней среде и на поверхности клеток, для своих внутриклеточных функций.	

Газификация	Преобразование органической части твердого или жидкого топлива в горючие газы при высокотемпературном (1000–2000 °С) нагреве с окислителем.	
-------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Авторами [6, с. 154] представлена схема выделения металлов (до 95 %) из пустых печатных плат в результате применения комплексной переработки. Последовательность переработки отходов включает измельчение, гранулирование, магнитное разделение, классификацию и электростатическое разделение. Как отмечают авторы, композиции, получаемые в результате такой переработки, используются при изготовлении изделий, содержащих стекловолокно, и наполнителей, используемых в производстве стройматериалов.

Перспективы развития утилизации ЭО (электротехнических отходов) в России. В России ежегодно образуется около 1,0–1,4 млн. тонн ОЭЭО (отходы электрического и электронного оборудования). Система учета образования и обращения с подобными отходами в России развита слабо, поэтому сложно привести точные данные по количеству утилизированных отходов. По данным Ассоциации переработчиков электронной и электробытовой техники, в России перерабатывается около 5–7% электронных отходов, что составляет порядка 70 тыс. тонн ОЭЭО в год [4, с. 23]. Структура утилизации отходов электрического и электронного оборудования (ОЭЭО) некоторых странах представлена на рис. 3. Как следует из рис. 3, в странах ЕС почти половина всех отходов электроники подвергается рециклингу (либо возвращению в производственный цикл, либо повторному использованию), в то время как в России подавляющая часть отходов отправляется на захоронение. Однако положительным моментом является факт утверждения Правительством Российской Федерации (от 25 января 2018 года) распоряжения, предусматривающего необходимость развития отрасли по переработке отходов.

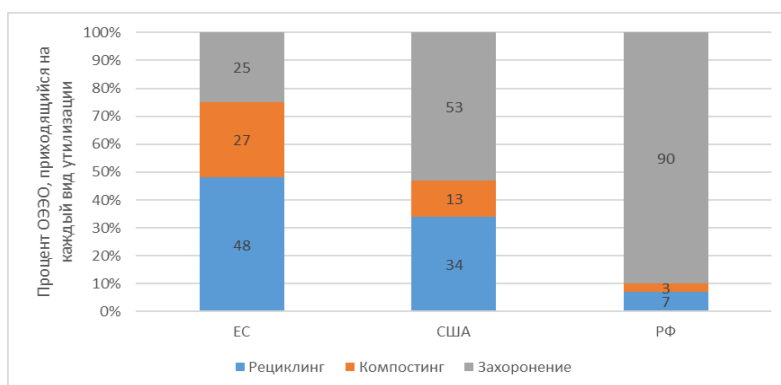


Рис. 3. Виды утилизации отходов электрического и электронного оборудования в разных странах

*Переработка лома.* Большое количество разнотипного оборудования, сложность конфигураций оборудования, а также многокомпонентность состава электронного лома требуют применения самых разнообразных способов переработки. В России чаще всего применяется технология пирометаллургической переработки электронного лома.

Переработка вторичного сырья в РФ в большинстве своем ориентирована на медеплавильные комбинаты и сводится к преобразованию электронного лома, содержащего благородные металлы, в сплав с медью. Далее черновая медь подвергается электролитическому растворению анодов, в процессе которого образуется анодный шлам, обогащенный драгоценными металлами.

К 2022 году Правительством РФ планируется запустить 12 заводов по комплексной переработке электроники, лома и пластика в разных городах [4, с. 33]. Развитие в этой области может быть простимулировано государством в форме инвестиций, создания СЭЗ (свободная экономическая зона).

**Выводы.** Таким образом, рассмотрены способы утилизации отходов электроники, описано негативное влияние элементов отходов на организм человека, указаны перспективы развития переработки отходов в России. Несмотря на то, что переработка электронных отходов в России на данном этапе не соответствует европейскому уровню, предпринимаются шаги по развитию в этой области. Подготавливается документальная и законодательная база, строится и модернизируется необходимая инфраструктура, создаются стандарты для обучения необходимого персонала.

Переработка электроники очень важна, так как компоненты технических средств и предметов электроники – это, скорее, ресурсы, чем отходы. В компонентах электроники, подлежащих переработке, достаточно высокое содержание полезных ресурсов, что делает их извлечение экономически выгодным.

### **Список литературы**

1. International E-Waste Day: 57.4M Tonnes Expected in 2021 // WEEE FORUM. URL: [https://weee-forum.org/ws\\_news/international-e-waste-day-2021/](https://weee-forum.org/ws_news/international-e-waste-day-2021/).
2. Термическая переработка отходов электронной промышленности / О. П. Акаев, А. Войнаровская, С. Желязный, В. Жуковский // Вестник Костромского государственного университета им. Н. А. Некрасова. 2012. Т. 18, № 2. С. 8–10.
3. Вишневецкий В. Ю., Ледяева В. С. Экологическое прогнозирование загрязнения водных сред тяжелыми металлами // Инженерный вестник Дона. 2014. № 4, ч. 2 (32). С. 1–13.

4. Гирфанов Р. Д. Оценка эффективности и тенденции переработки электронных отходов и лома. Екатеринбург : Уральский федеральный университет, 2021. 118 с. URL: [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/97945/1/m\\_th\\_r.d.girfanov\\_2021.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/97945/1/m_th_r.d.girfanov_2021.pdf).
5. Колосова И. И. Влияние ацетата свинца, солей тяжелых металлов на репродуктивную функцию // Вісник проблем біології і медицини. 2013. Вип. 3, т. 2 (103). С. 13–18.
6. Медведев А. М., Арсентьев С. Утилизация продуктов производства электроники // Компоненты и технологии. 2008. № 10. С. 153–159.
7. Экологические проблемы производства и утилизации электронных средств / Т. Н. Патрушева, В. А. Барашков, О. В. Чурбакова, С. К. Петров // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2018. № 11 (6). С. 679–693.
8. Раковская Е. Г., Гусаков А. А. Рециклинг отходов электротехнического и электронного оборудования. URL: [https://spbftu.ru/site/upload/Rakovskaya\\_2017\\_4.pdf](https://spbftu.ru/site/upload/Rakovskaya_2017_4.pdf).
9. Старкова Б., Червенка В. Проблема асбеста – взгляд из Европы // Недвижимость и инвестиции. Правовое регулирование. 2005. № 2 (23). URL: [https://dpr.ru/journal/journal\\_23\\_22.htm](https://dpr.ru/journal/journal_23_22.htm).