

Всероссийский конкурс юных исследователей окружающей среды
имени Б.В. Всесвятского

Тематическое направление
«Обращение с отходами»

**ИЗУЧЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ
ОТХОДОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ, НАПРАВЛЕННЫХ
НА МИНИМИЗАЦИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА
И ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛОВ**

Автор:

Малышкин Тимофей Александрович
Мурманская область, г. Снежногорск
МАУДО «ДДТ «Дриада», 8 класс

Научные руководители:

Хиневич Евгения Сергеевна, канд. соц. н.,
педагог дополнительного образования МАУДО «ДДТ «Дриада»;

Воронцова Анастасия Олеговна, учитель биологии
АНОО «Губернаторский лицей»

Научный консультант:

Малышкин Александр Николаевич,
Ведущий специалист службы атомных
паропроизводящих установок
утилизации и целевых программ,
ФГУП «Атомфлот»

г. Москва
2026 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МАТЕРИАЛА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	
1.1. Понятие и классификация электронных отходов и лома.....	5
1.2. Основные причины неприемлемости захоронения ОЭЭО.....	5
1.3. Современные способы переработки и утилизации ОЭЭО.....	7
ГЛАВА II. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ	
2.1. Сбор и подготовка материала для экспериментов.....	8
2.2. Выводы по результатам экспериментов	10
2.3. Выводы по практической части исследования	11
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	12
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	13
ПРИЛОЖЕНИЯ	

ВВЕДЕНИЕ

Мой мобильный телефон вышел из строя. Мои близкие высказали разные мнения относительно его дальнейшей судьбы: от ремонта до полной замены новым устройством.

Однако, столкнувшись с проблемой утилизации сломанного телефона, я задался вопросом о последствиях его отправки в обычный мусорный контейнер. Ведь на площадке для сбора мусора во дворе нашего дома мне часто попадались остатки бытовой техники: холодильники, стиральные машины, телевизоры, мониторы и системные блоки компьютеров.

Современное электротехническое и электронное оборудование в своем составе содержит не только железо, кремний и пластик, но и многие другие элементы периодической таблицы Менделеева.

Чтобы изготовить печатные платы необходимы медь для токопроводящих дорожек, олово и свинец в обеспечении пайки компонентов, а также различные полимеры и эпоксидные смолы с целью создания диэлектрического основания.

Ресурсосбережение, экологическая безопасность, рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды являются приоритетными направлениями государственной политики согласно стратегическому плану развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов до 2030 года.

Однако одной из нерешенных задач на федеральном и региональном уровнях остается создание инновационной технико-экономической системы. Она позволит минимизировать количество захораниваемых отходов, максимально обеспечив при этом ресурсосбережение, повторное вовлечение утилизируемых компонентов в хозяйственный оборот в качестве сырья, материалов и изделий, а также превращение отходов во вторичное сырье для изготовления новой продукции и получения энергии.

Проблема исследования состоит в том, что в настоящее время в Российской Федерации доля извлекаемых из электронного лома вторичных ресурсов невелика, большое количество ценного материала направляется на захоронение.

Несмотря на то, что утилизация высокотехнологичного лома входит в число международных обязательств, принятых Российской Федерацией, комплексной системы сбора и утилизации электронных отходов в масштабе нашей страны пока не существует.

Актуальность нашего исследования обусловлена тем, что на рынок Российской Федерации поступает более 70 млн единиц электронных устройств. Сбором, обработкой и утилизацией устаревших и сломанных устройств занимается лишь несколько десятков частных компаний из разных регионов страны.

По оценкам Минпромторга в Российской Федерации ежегодно образуется более полутора млн тонн отходов электронного и электротехнического оборудования (ОЭЭО), из которых перерабатываются только 5%.

Частные компании, вовлеченные в процесс сбора и утилизации электронных отходов, заинтересованы в ломе с наибольшим содержанием драгоценных металлов.

Электронные отходы с низким содержанием драгоценных металлов зачастую не интересуют коммерческие организации и не подвергаются переработке из-за низкой рентабельности [4].

Цель исследования заключается в изучении теоретических основ переработки ОЭЭО, анализ существующих методов обращения с ними в России и за рубежом, а также на выявление перспективных направлений развития и предложение экологически безопасной технологии переработки ОЭЭО с низким содержанием драгоценных металлов.

Задачи исследования:

- изучить, применить и протестировать в домашних условиях доступную, экологически безопасную технологию переработки ОЭЭО;
- самостоятельно провести переработку ОЭЭО с получением ценных компонентов (металлов);
- оценить эффективность технологии переработки ОЭЭО с низким содержанием драгоценных металлов.

Объектом исследования являются технологии обращения с отходами электронного и электротехнического оборудования.

Предметом исследования являются процессы обращения и переработки ОЭЭО.

Гипотеза заключается в том, что имеется множество технологий, с помощью которых возможна переработка ОЭЭО. Оптимальной может являться лишь та технология, которая принесёт наибольшую экономическую выгоду при минимальных затратах на получение конечного продукта и на обращение с отходами, которые возможно образуются по результатам переработки.

Новизна исследования состоит в проведении химических экспериментов с целью выявления наиболее эффективных методов утилизации ОЭЭО с низким содержанием драгоценных металлов, учитывающих необходимость комплексной переработки всех видов электронных отходов.

Методы исследования: использование информационных источников и их анализ, наблюдение, проведение химических опытов.

Практическая значимость исследования имеет в своей основе разработку и тестирование в бытовых условиях доступной технологии переработки ОЭЭО. Результатом исследования станет возможность самостоятельной переработки ОЭЭО с целью получения ценных компонентов, таких как металлы.

ГЛАВА I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МАТЕРИАЛА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Понятие и классификация электронных отходов и лома

Согласно ГОСТ Р 55102-2012 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководство по безопасному сбору, хранению, транспортированию и разборке отработавшего электротехнического и электронного оборудования, за исключением ртутьсодержащих устройств и приборов».

Термин «отработавшее электротехническое и электронное оборудование» обозначает изделие, утратившим свою функциональность или ставшим непригодными для использования.

Объектом ОЭЭО признается оборудование, предназначенное для эксплуатации при напряжении не выше 1000 вольт для переменного тока и 1500 вольт для постоянного тока. К ОЭЭО также относятся составные части и элементы указанного оборудования (таблица №1).

В связи с тем, что ОЭЭО являются отходами, то их классификация представлена в Федеральном классификационном каталоге отходов (ФККО) России (таблица №2).

Кроме того, ОЭЭО классифицируют отходы по следующим критериям:

- содержанию драгоценных металлов;
- составу материала основы;
- физическим признакам;
- по месту образования;
- элементному составу и другим признакам.

Следует отметить, что электронный лом отличается особым многообразием состава и другими физико-химическими характеристиками [2].

1.2 Основные причины неприемлемости захоронения ОЭЭО

Опасность электронных отходов определяется их составом согласно Федеральному классификационному каталогу отходов (ФККО). В зависимости от содержания конкретных компонентов электроники они могут быть отнесены к различным классам опасности для окружающей среды: от 4 класса, представляющего наименьшую угрозу, до 1-3 классов, характеризующихся значительным негативным воздействием.

Состав электронных устройств очень разнообразен и различается для разных видов оборудования. Он может содержать более тысячи различных веществ и соединений, в том числе черные, цветные, драгоценные, редкие, редкоземельные металлы, пластмассы, стекло, деревянные компоненты, печатные платы, керамику, резину и другие вещества (Рис.1).

В разных компонентах электронных устройств содержатся десятки химических элементов, например:

- сенсорные экраны работают благодаря индию, входящему в состав их слоев стекла и пластика;
- в производстве LCD-экранов используются редкоземельные металлы, такие как лантан, гадолиний, европий, тербий, диспрозий и празеодим;
- электронные компоненты устройств создаются с применением различных материалов, включая тантал, галлий и никель. Галлий используется

в процессе производства полупроводниковых устройств, а тантал является ключевым элементом электролитических конденсаторов;

- в конструкции динамиков, микрофонов и вибромоторов используют различные соединения, содержащие никель, а также редкоземельные элементы, такие как празеодим, гадолиний, неодим, тербий и диспрозий;

- для изготовления корпусов чаще всего используют пластик, алюминий и углеродное волокно. Кроме того, для защиты от электромагнитных помех применяются никель и магниевые сплавы;

- большинство смартфонов работают на литий-ионных аккумуляторах, содержащих также кобальт и никель [2].

1.2.1 Цены на металлы на бирже

Согласно данным интернет-ресурса <https://ru.investing.com> за последние три года цены на медь выросли на 42,06%, олово на 31,35%, на свинец на 7,27% (Рис.2).

В 2023 году объем мирового рынка редкоземельных металлов составил 15,3 миллиарда долларов США. Прогнозируется, что этот рынок будет расти среднегодовой скоростью более 10,8% в период с 2024 по 2032 год.

За последний трёхлетний период наблюдалось существенное повышение цен на драгоценные металлы. Стоимость золота увеличилась на 89,80%, серебра на 90,03%, а платины на 54,67% [5].

1.2.2 Влияние некоторых металлов на организм человека

Металлы и их соединения являются существенными загрязнителями окружающей среды, оказывающими негативное влияние на живые организмы. Несмотря на то, что незначительное количество некоторых металлов (за исключением токсичных и радиоактивных) играет важную роль в поддержании нормальной жизнедеятельности организма, их избыток может привести к различным нарушениям здоровья. Даже в малых дозах металлы способны накапливаться в пищевых цепях, что может вызвать дисбаланс микроэлементов в организме и нарушить его естественное функционирование (таблица №3).

Все тяжелые металлы обладают склонностью к биоаккумуляции, вследствие чего многократно усиливается их способность поражать жизненно важные системы человеческого организма. Учитывая значительное содержание ядовитых веществ в отходах электроники, необходимо разработать методы переработки, направленные на существенное снижение степени риска для живых организмов [3].

1.3 Современные способы переработки и утилизации ОЭЭО

Из-за большого количества различного оборудования и его конфигураций эффективная переработка электронного лома требует использования комплекса разнообразных технологий.

Существует несколько распространённых способов для осуществления переработки:

- механический;

- гидрометаллургический [6];
- пирометаллургическое восстановление;
- биотехнологическая переработка.

Наиболее приемлемый способ переработки выбирают в зависимости от типа электронных отходов и их состава. Описание каждого метода представлено в приложении [5].

Выводы по теоретической части исследования

Изучив теоретический материал по теме исследования, мы делаем вывод о том, что объём подлежащих переработке и утилизации ОЭЭО в ближайшей перспективе будет только возрастать.

Захоронение отходов на полигонах ОЭЭО недопустимо по следующим причинам:

Экологическим: захоронение ОЭЭО наносит непоправимый вред окружающей среде, в конечном итоге – здоровью человека.

Социальным: недовольство населения переполненными мусорными полигонами и стихийными свалками, поскольку все стремятся к проживанию в экологически благоприятном регионе.

Экономическим: ОЭЭО содержит широкий спектр ценных материалов, которые целесообразно и необходимо вовлекать во вторичный оборот.

Законодательным: обращение с ОЭЭО регламентируется нормативно-правовыми актами Российской Федерации, а также является частью международных обязательств, принятых нашей страной.

Выбор оптимального метода переработки печатных плат является сложным и зависит от множества переменных, таких как состав используемых компонентов и материала основания. Определение наилучшего способа переработки определяется целым рядом факторов, включая состав самой платы и содержания ценных металлов в ее компонентах.

ГЛАВА II. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Сбор и подготовка материала для экспериментов

Большинство материалов в сети Интернет и рассматриваемые в них методы переработки ОЭЭО сосредоточены на извлечении драгоценных металлов. Однако актуальным остается вопрос о дальнейшем использовании остальных отходов, таких как обедненные печатные платы. К ним относятся платы, с которых удалены (сняты) все детали, содержащие драгоценные металлы, или же платы, изначально не содержавшие их.

Целью нашего исследования является разработка рациональных методов переработки отходов, обладающих меньшей ценностью, но все же представляющих интерес. Оптимальный метод переработки не должен приводить к образованию новых химически опасных (токсичных) веществ.

Получение исходных материалов не вызвало для нас затруднений. На сайте с объявлениями в течение первого дня мы нашли несколько предложений по безвозмездной передаче устаревших (но ещё рабочих) телевизоров. В итоге, нами было получено четыре телевизора в первый день, два – во второй и один – в третий день поиска. Коллеги папы с радостью избавлялись от своих устаревших компьютеров, передавая их нам в исправном состоянии (Рис. №3).

Первоначально перед нами стояла сложная задача: разобрать технику, выделить отдельные компоненты и рассортировать их. (Рис. № 4).

Пластиковые элементы корпусов с электронно-лучевыми трубками из-за высокого содержания в них токсичных веществ мы передали на переработку в Мурманский региональный центр комплексной утилизации (Мурманск, Домостроительная улица, 16/1в. 2gis.ru/2gis.ru).

На печатных платах присутствуют алюминиевые радиаторы, медные проводники, стальные корпуса отдельных плат и рамки, которые не требуют дополнительной переработки. Детали, которые могли бы содержать драгоценные металлы, также были удалены [5]. Все демонтированные элементы печатных плат рассортированы.

В результате первичной обработки получены:

- 255 грамм компонентов, потенциально содержащих драгоценные металлы (планки оперативной памяти, чипы, микросхемы и др.);
- 1 килограмм 700 грамм алюминиевых радиаторов;
- 4 килограмма 150 грамм медных проводников и медных радиаторов.

Эти компоненты не требуют дополнительной подготовки для переработки (Рис. №5).

Полученный лом не является предметом нашего исследования, а скорее дополнительным преимуществом. Доходы от его реализации возможно использовать для приобретения химических реактивов, необходимых для переработки печатных плат.

Объем исходного целевого материала (печатных плат, извлечённых из техники и первично обработанных) составил 10 килограмм.

Экспериментальная часть

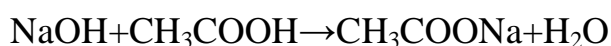
Опыт №1. Очистка печатных плат от лака

До начала процесса переработки печатных плат возникла необходимость удаления защитного слоя лака, покрывающего их поверхность. Для снятия лака мы использовали каустическую соду (натр едкий гранулированный (NaOH)).

В мерную емкость объемом пять литров мы засыпали 300 грамм NaOH и добавили пять литров холодной воды. Так как щелочь растворяется в воде с выделением большого количества тепла, низкие температуры жидкости не позволят раствору кипеть и разбрызгиваться. Раствор тщательно перемешали до полного растворения NaOH.

Полученный раствор перелили в пластиковую ёмкость объёмом 20 литров, где уже были размещены печатные платы. После этого с помощью лакмусового индикатора было проведено измерение pH полученного раствора, которое составило 14, что свидетельствует о сильной щелочной среде (Рис. №6).

Ёмкость с печатными платами, залитыми раствором NaOH, была помещена в прохладное темное помещение на 5 дней для растворения лакового покрытия. По истечении 5-ти дней визуальный осмотр подтвердил полное растворение лака со всех плат без дополнительных методов воздействия [7]. Отработанный раствор мы слили из ёмкости и нейтрализовали уксусной эссенцией. Реакция нейтрализации отработавшей щелочи:



После снятия лака с печатных плат была проведена их очистка с последующим промыванием проточной водой. На этом подготовка к переработке была завершена. (Рис. №7).

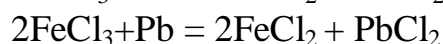
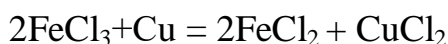
Опыт №2. Растворение меди и припоя

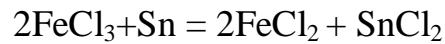
Для растворения меди и припоя мы использовали хлорное железо (FeCl_3). Выбор хлорного железа обусловлен рядом факторов: доступная стоимость, низкая токсичность и возможность его регенерации для повторного применения. В целях определения оптимального варианта мы проводим эксперименты как с уже приготовленным раствором хлорного железа, так и самостоятельно приготовленным раствором из «сухого» хлорного железа.

Для повышения удельной поверхности и достижения оптимального заполнения мерного стакана был произведен процесс измельчения плат.

Измельченный материал переложили в мерную емкость вместимостью пять литров и залили раствором готового хлорного железа. Заполненный раствором мерную емкость мы поместили на плиту и довели раствор до кипения с целью полного растворения образующегося хлорида свинца (PbCl_2) (Рис. №8).

Растворение металлов на платах должно проходить по следующим реакциям:





Железо переходит в степень валентности II, на что указывает изменение цвета раствора с зеленовато-коричневого на зелёный.

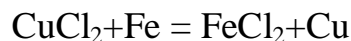
В процессе четырехчасового визуального наблюдения за растворением всех металлов с поверхности печатных плат, мерная емкость была снята с плиты и оставлен для охлаждения, рассчитывая на выпадение осадка хлорида свинца. Однако, после охлаждения и наблюдения в течение суток, никаких признаков выпадения осадка в объеме или на дне емкости не было обнаружено. Мы продолжили детальное исследование и уже были готовы признать эксперимент неудачным. Однако, впоследствии выяснилось, что в современном зарубежном оборудовании свинец в припое не используется [9].

Полученный раствор профильтровали через ткань. В результате на поверхности ткани остались текстолитовые основы печатных плат и небольшое количество пластиковых элементов, отделенных в процессе растворения припоя. Все металлические составляющие плат были переведены в раствор (Рис. №9).

Опыт №3. Цементация меди из раствора

С целью извлечения меди из полученного раствора были использованы два стальных стержня диаметром 10-12 мм. Стержни были предварительно очищены от загрязнений и ржавчины, после чего были погружены в раствор.

Реакция цементации меди заключается в превращении ионов меди в растворе в металлическую медь в присутствии твёрдого железа. Железо окисляется, и ионы меди восстанавливаются за счёт переноса электронов, происходит следующая реакция:



Через определенное время мы наблюдали, что стальные стержни покрываются медью. Процесс реакции продолжался в течение двух суток. Для обеспечения продолжения процесса осевшую медь периодически удаляли с прутков и возвращали их в раствор. После того, как медь перестала выпадать, раствор был повторно отфильтрован, а образовавшийся осадок меди был собран [9]. В результате высушивания осадка из первой партии было получено 364 грамма чистой меди. В ходе переработки 10 килограмм плат общая масса полученной чистой меди составила 838 грамм (Рис. №10, 12).

Опыт №4. Электролиз олова

Следующим технологическим этапом стал процесс осаждения олова путём электролиза.

В эксперименте в качестве электродов (катода и анода) использовались так же стальные стержни, ранее применявшиеся в процессе цементации меди. Источником тока послужило зарядное устройство, предназначенное для зарядки автомобильных аккумуляторов. Сила тока была установлена на максимальное значение, равное 16 ампер, и процесс проводился в течение всей ночи.

В ходе электролиза, олово выделилось на катоде в двух формах: в виде мелкодисперсной губчатой массы и коралловидных наростов. Кроме того,

часть олова выпала в осадок на дно емкости. После фильтрации раствора оставшееся олово было собрано со дна емкости (Рис. №11, 12).

В результате переработки 10 килограмм печатных плат удалось получить 321 грамм олова.

Фильтрат зелёного цвета, оставшийся после извлечения целевых металлов (меди и олова), представляет собой раствор двухвалентного хлорного железа. Его можно регенерировать путём пропускания хлора.

2.2. Выводы по результатам экспериментов

Процесс удаления лака с поверхности печатных плат возможно оптимизировать путем использования щёлочи меньшей концентрации и изменения времени выдержки до полного растворения лака.

Наиболее эффективные результаты растворения меди и припоя были получены с использованием готового раствора хлорного железа. В тоже время, самостоятельно приготовленный раствор из сухого порошка, примененный для обработки второй партии печатных плат, показал более низкий показатель выхода целевых компонентов. Вероятно, причиной этого различия является наличие примесей в порошке, используемом для приготовления раствора.

Перед началом процесса растворения важно понимать, содержит ли используемый припой свинец. В случае его отсутствия, как это наблюдается в нашем случае, можно оптимизировать этап нагрева раствора.

Метод цементации, использованный для извлечения меди из полученного раствора, продемонстрировал высокую эффективность. Этот метод позволил получить значительный объем целевого компонента меди при минимальных затратах и процессах.

В процессе электролиза было выделено олово с получением целевого продукта. Для дальнейшего повышения эффективности процесса необходимо подобрать оптимальное значение силы тока.

2.3. Выводы по практической части исследования

В ходе исследований нами был разработан и апробирован технологический процесс, позволяющий получить ценные компоненты из «обеднённого» сырья. Все предложенные этапы переработки печатных плат технологически просты и осуществимы.

Нами были получены исходные компоненты в чистом виде: медь и олово. Свинец не был извлечен, так как в современном зарубежном оборудовании свинец в припое не используется. Выход получаемых компонентов зависит от вида используемого исходного сырья и ключевых реагентов, участвующих в процессе.

Все полученные компоненты (включая отработавшие растворы) имеют класс опасности не выше четвертого.

Необходимым условием для успешной реализации технологии является контроль качества как исходного сырья, так и применяемых реагентов на каждом этапе переработки. В качестве основного технологического реагента используется раствор хлорного железа, демонстрирующий высокую эффективность. Возможность его регенерации позволяет применять его многократно без ограничений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в настоящем исследовании.

Согласно имеющимся данным, объем образования ОЭЭО в мире демонстрирует постоянный рост, превышая 50 миллионов тонн в год. В России ежегодно образуется от 1,0 до 1,5 миллиона тонн подобных отходов, однако лишь незначительная часть, примерно 5-7% подвергается переработке.

Сложность переработки многокомпонентного сырья.

Многокомпонентность сырья является ключевым фактором, затрудняющим выбор оптимальной технологии для утилизации ОЭЭО. Анализ применяемых технологий показывает, что лидирующие компании применяют комплексные подходы к переработке, направленные на извлечение не только драгоценных металлов, но и широкого спектра всех составляющих компонентов.

Ограниченность существующих технологий в России.

В настоящее время предприятия промышленности Российской Федерации используют технологии переработки печатных плат, направленные на извлечение благородных металлов.

Анализ результатов технологии.

Предложенная и апробированная нами технология переработки ОЭЭО с низким содержанием драгоценных металлов технологически проста, осуществима и эффективна. Масштабирование и дальнейшая отработка предложенной технологии позволит применять ее в промышленности как оптимальный способ утилизации ОЭЭО с низким содержанием драгоценных металлов.

Применённые в технологии переработки ОЭЭО химические вещества имеют класс опасности не выше четвертого. Основной химический реактив – хлорное железо, возможно подвергать регенерации для последующего многократного применения.

Необходимость совершенствования законодательной базы.

Для обеспечения переработки всех видов электронных отходов требуется дополнительное законодательное регулирование и контроль за исполнением имеющихся нормативных актов, направленных на недопущение захоронения ОЭЭО на полигонах.

Стратегическая цель – замкнутый цикл обращения с электронной продукцией.

С целью сохранения ресурсов и окружающей среды каждое электронное устройство, когда-либо произведенное человеком, должно быть переработано, а его компоненты возвращены в оборот.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Директива 2002/96/ЕС Европейского парламента и Совета Европейского союза от 27 января 2003 г. об отходах электрического и электронного оборудования (WEEE). – URL: <https://base.garant.ru/2564446/> (дата обращения: 12.08.2025 г.)
2. Дистанова А.А., Воскобойникова В.В., Комплекс для переработки радиоэлектронного лома. / Твердые бытовые отходы, 2012, №5, с.60-62.
3. Guidance on Best Available Treatment Recovery and Recycling Techniques (BATRRТ) and treatment of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). November 2006. - London, Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA).– URL: <https://www.hse.gov.uk/waste/waste-electrical.htm> (date of request: 09.06.2025)
4. E-waste. Volume I, II: Inventory Assessment Manual. United Nations Environmental Programme. Division of Technology, Industry and Economics. International Environmental Technology Centre. Osaka/Shiga, 2007. – URL: <https://www.unep.org/resources/report/e-waste-vol-1-inventory-assessment-manual> (date of request: 09.06.2025)
5. Калашников Е.А., Лолейт С.И., Голев А.Н., Погосян А.Т. Программно-алгоритмический комплекс расчёта себестоимости золота системы состав-схема. // Руда и металлы. Цветные металлы. 2007 г. № 4. С.74-80.
6. Маковская О.Ю., Колмачихина О.Б., Лобанов В.Г., Польшгалов С.Э. Теория гидрометаллургических процессов: учебное пособие / под общ. ред. канд. техн. наук, доц. О.Ю. Маковской; М-во науки и высшего образования РФ. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022.— 152 с.
7. Стрижко Л.С., Калашников Е.А., Погосян А.Т. Оптимизация структуры переработки электронного лома. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2006 г. № 6. С. 21-27.
8. Стрижко Л.С., Погосян А.Т., Мурзагалиев П.С. Оптимизация структуры переработки электронного лома. // Тезисы доклада на 60-й научной конференции студентов, г. Москва, 2005. – URL: https://www.elibrary.ru/ip_restricted.asp?rpage=https%3A%2F%2Fwww%2Eelibrary%2Eru%2Fitem%2Easp%3Fid%3D11731908 (дата обращения: 12.08.2025 г.)
9. Роцин В.Е., Роцин А.В. Общая электронная теория восстановления (окисления) металлов. ISSN: 0368-0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Том 63. № 3-4. С. 271 – 285.

Таблица 1 - Категории ОЭЭО согласно ГОСТ Р 55102-2012

№ п/п	Наименование	Обозначение
1.	Крупногабаритное бытовое оборудование (холодильное оборудование, стиральные машины, оборудование для кондиционирования)	А.1.
2.	Малогабаритное бытовое оборудование (пылесосы, утюги, тостеры).	А.2.
3.	Телекоммуникационное оборудование (оргтехника, персональная вычислительная техника)	А.3.
4.	Оборудование для записи и воспроизведения звука или изображений, включая сигналы и другие технологии (радиоприемники, видеокамеры, магнитофоны)	А.4.
5.	Осветительные лампы	А.5.
6.	Хозяйственное электрооборудование (дрели, пилы, швейные машины)	А.6.
7.	Игрушки и оборудование для развлечений и спорта (электрические железные дороги, видеоигры, спортивное оборудование с электрическими или электронными компонентами, игровые автоматы)	А.7.
8.	Медицинские устройства (за исключением имплантированной и инфицированной продукции)	А.8.
9.	Оборудование и приборы для мониторинга и контроля	А.9.
10.	Торговые автоматы и банкоматы	А.10.

Таблица 2 - Классификация ОЭЭО по Федеральному классификационному каталогу отходов (ФККО) России

№ п/п	Наименование отхода	Код по ФККО
Компьютерная техника		
1.	Отходы производства компьютеров, электронных и оптических изделий	37100000000
2.	Оборудование компьютерное, электронное, оптическое, утратившее потребительские свойства	48100000000
3.	Компоненты электронные и платы, утратившие потребительские свойства	48110000000
4.	Компьютеры и периферийное оборудование, утратившие потребительские свойства	48120000000
5.	Системный блок компьютера, утративший потребительские свойства	48120101524
6.	Отходы от демонтажа компьютерного, телевизионного и прочего оборудования	74140000000
Бытовая потребительская техника		
7.	Техника бытовая электронная, утратившая	48140000000

	потребительские свойства	
8.	Приборы бытовые	48250000000
Прочее		
9.	Лом электротехнических изделий из алюминия	46220002515

Таблица 3 - Основные металлы, применяемые в электронике и их возможное воздействие на организм человек

№ п/п	Наименование элемента (вещества)	В каких компонентах электроники встречаются	Возможное воздействие на организм
1.	Свинец (Pb)	Припой, покрытие контактных площадок печатных плат и выводов электронных компонентов	Свинец относится к наиболее известным ядам. Все соединения свинца токсичны. Хроническое отравление свинцом и накопление его в организме человека даже при низких уровнях содержания приводит к снижению коэффициента интеллекта, ослаблению внимания, потере работоспособности, гиперактивности, расстройству поведения, отставанию в развитии. Особенно опасно воздействие свинца на маленьких детей, оно вызывает умственную отсталость и хроническое заболевание мозга
2.	Медь (Cu)	В проводах и кабелях, печатных платах, системах охлаждения и магнитах	В высоких концентрациях медь оказывает крайне негативное влияние на работу ЦНС, вплоть до развития болезни Альцгеймера. Происходит снижение активности образования, либо полная инактивация некоторых ферментов. Замедляется поступление кислорода в клетки крови, появляется головная боль, затрудняется дыхание, учащается сердцебиение, возникает тревожность. Возможно развитие диареи, тошноты, болей в животе и сильного увеличения печени.
3.	Олово (Sn)	Припой, покрытие для	Металлическое олово малотоксично при поступлении в

		компонентов и в качестве проводника	организм, так как слабо усваивается в пищеварительной системе и выводится из организма в неизменённом виде.
4.	Железо (Fe)	Трансформаторы, электродвигатели, постоянные магниты и кабели	При попадании в организм в больших количествах, железо вызывает повреждение клеток и тканей, приводя к формированию свободных радикалов, нарушению метаболизма и повреждению желудочно-кишечного тракта, печени, сердца и центральной нервной системы.
5.	Никель (Ni)	Печатные платы, жёсткие диски, конденсаторы	В некоторых исследованиях говорится о негативном влиянии никеля на выработку лизоцима (антибактериального агента, действующего на клеточные стенки бактерий и некоторых вирусов) макрофагами. Тем самым снижается жизнеспособность этих клеток и, как следствие, защитных сил организма. В результате чего происходит снижение иммунитета, что повышает риск появления ГРИПа, ОРВИ и прочих заболеваний.
6.	Алюминий (Al)	Радиаторы охлаждения, корпуса устройств, элементы печатных плат, кабельная продукция, антенны и экраны, конденсаторы.	Алюминий не имеет биологической функции в организме человека, и его попадание в организм не приносит положительного действия. Длительное воздействие алюминия и его соединений может быть связано с кроветворными, скелетными, респираторными, иммунологическими, неврологическими и функциональными неблагоприятными эффектами.



Рисунок 1 – Примерное содержание компонентов в мобильном телефоне

Способы переработки и утилизации ОЭЭО

Механический метод переработки

Метод включает несколько этапов:

- измельчение печатных плат специальными ножами;
- магнитное отделение черных металлов от общей массы измельченных отходов печатных плат;
- измельчение отходов печатных плат до состояния порошка в шаровой мельнице;
- просеивание порошка;
- рециркуляция частиц посредством электростатики;
- вторичное измельчение и сортировка отходов, не поддающихся обработке.

Метод механической переработки подходит для обработки печатных плат с демонтированными радиодетальями и компонентами.

Органическая фракция отходов, не подлежащая обработке существующими методами, может быть подвергнута пиролизу. Данный метод позволит не только извлечь металлы, но также получить ценные продукты пиролиза [6].

Гидрометаллургический метод переработки

Гидрометаллургический метод переработки применяется для выщелачивания металлов из отходов печатных плат с помощью кислот.

Метод хорошо подходит для утилизации необработанных печатных плат, но имеет ряд ограничений:

- высокий расход реагентов и химикатов для растворения металлов;
- большая масса лома, подвергаемого обработке, 2/3 из которого составляют полимеры;

- низкое содержание драгоценных металлов при высоком содержании примесей в осадках;
- возможное выделение в воздух токсичных продуктов реакции [7].

Метод пирометаллургического восстановления

При пирометаллургическом восстановлении используются высокие температуры для разделения и извлечения различных металлов.

Процесс включает в себя высокотемпературные операции, такие как плавка или сжигание.

Метод особенно эффективен при восстановлении цветных металлов, таких как медь и олово. Однако, при применении этого метода переработки могут выбрасываться вредные вещества в окружающую среду и образовываться опасные побочные продукты [8].

Биотехнологическая переработка

В перспективе для селективного извлечения металлов может быть использован метод, основанный на биологическом действии микроорганизмов или ферментов. Эта технология, обладающая потенциалом экологически чистого и энергоэффективного восстановления металлов, в настоящее время находится в стадии интенсивных исследований и разработок, но пока не внедрена в промышленную практику.

Фьючерсные цены на металлы

Котировки	Статистика	Теханализ						Обычный
Название	Месяц	Послед.	Макс.	Мин.	Изм.	Изм. %	Время	
Алюминий		2.592,25	2.592,90	2.574,85	+22,60	+0,88%	19:13:27	
Золото	Авг. 25	3.305,55	3.355,52	3.295,85	-37,25	-1,11%	19:13:34	
Медь	Сент. 25	5,0078	5,0715	4,973	-0,0182	-0,36%	19:13:35	
Медь		9.801,10	9.889,00	9.774,15	-17,10	-0,17%	19:13:32	
Никель		15.009,13	15.162,00	14.981,25	-125,00	-0,83%	19:10:40	
Олово		33.315,00	33.350,00	33.315,00	-422,00	-1,25%	07/07	
Палладий	Сент. 25	1.111,50	1.139,75	1.108,25	-3,20	-0,29%	19:13:08	
Платина	Окт. 25	1.364,80	1.402,15	1.357,30	-8,50	-0,62%	19:13:34	
Свинец		2.059,63	2.060,57	2.034,15	+21,25	+1,04%	19:13:16	
Серебро	Сент. 25	36,513	37,09	36,498	-0,392	-1,06%	19:13:35	
Цинк		2.732,25	2.733,50	2.677,40	+45,80	+1,70%	19:13:27	

Котировки фьючерсов США

Название	Месяц	Послед.	Макс.	Мин.	Изм.	Изм. %	Время
US Steel Coil c3	Сент. 25	845,00	846,00	841,00	+5,00	+0,60%	18:47:48
Micro Silver c2	Авг. 25	36,43	36,90	36,34	-0,30	-0,82%	18:58:40
Micro Gold c2	Окт. 25	3.334,40	3.377,00	3.324,20	-36,30	-1,08%	19:02:28
Aluminum c3	Сент. 25	2.517,50	2.526,50	2.505,50	+2,75	+0,11%	18:55:54
Уран	Авг. 25	75,95	75,95	75,95	0,00	0,00%	01:35:28
Железная руда (62% Fe)	Июль 25	95,55	95,55	95,22	+0,33	+0,35%	18:07:02

Рисунок 2 – Фьючерские цены на металлы



Рисунок 3 – Сбор материала



Рисунок 4 – Разборка и подготовка плат





Рисунок 5 – Сортировка, взвешивание, отделение плат





Рисунок 6 – Удаление защитного слоя лака



Рисунок 7 – Платы готовые к переработке



Рисунок 8 – Растворение меди и припоя



Рисунок 9 – Платы до и после растворения металлов



Рисунок 10 – Цементация меди и фильтрация раствора



Рисунок 11 – Электролиз олова из раствора



Рисунок 12 – Полученные образцы металлов