

УДК 669-1:628

СРАВНИТЕЛЬНАЯ КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА Е-ОТХОДОВ

¹Жолдасбай Е.Е., ²Аргын А.А., ²Курмансейтов М.Б., ²Даруеш Г.С., ¹Ичев В.А.

¹Жезказганский университет им. О.А. Байконурова, Жезказган;

²Сатпаев университет, Алматы, e-mail: argyndaidar@gmail.com

В работе показана важность и необходимость проведения предварительной качественной оценки исходных Е-отходов перед их переработкой. Основной методологический принцип исследования, использованный в работе, – рентгенофлуоресцентный метод анализа, обеспечивающий надежное определение качественных характеристик различных по типу и составу электронных отходов. Для исследования качественной оценки отходов от ноутбука и смартфонов использован сертифицированный спектрометр РПП-12 (Т), разработанный фирмой ТОО «АспапГЕО» (г. Алматы), который широко используется на предприятиях горно-металлургического комплекса Казахстана и России. Прибор хорошо адаптирован на проведение экспресс-анализа сплавов. Сравнительный анализ расширенных энергетических участков спектров качественной оценки ноутбуков и смартфонов позволил установить в их составах широкий спектр металлов (Cu, Ag, Pb, Ni, Zn, Fe, Au, Sn) и неметалла (Br). Показано, что содержание золота и брома в ноутбуках значительно превышает аналогичные их содержания в смартфонах. Идентичный характер интенсивности линий на полученных спектрах позволяет сделать вывод о том, что по типу и составу эти образцы вполне пригодны для совместной переработки. Проведение исследований по предварительному качественному контролю Е-отходов, подвергающихся переработке, позволит: (а) с технологической стороны определить спектр возможных извлекаемых металлов и (б) с экологической точки зрения наметить пути обезвреживания потенциально опасных составляющих и вредных токсичных металлов. При правильной организации технологии, обеспечивающей комплексное извлечение ценных металлов, безотходность и экологическую безопасность, переработка Е-отходов может стать ключевым драйвером диверсификации экономики и устойчивого развития малого и среднего бизнеса.

Ключевые слова: Е-отходы, ноутбук, смартфон, переработка, качественная оценка, экология, технология, металлы, вредные вещества, окружающая среда

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2023-2025 годы по приоритетному направлению «Рациональное использование водных ресурсов, животного и растительного мира, экология» проекта AP19576638 «Разработка инновационной технологии утилизации накопленных отходов Е-лома с получением чистого золота и цветных металлов».

COMPARATIVE QUALITATIVE ASSESSMENT OF E-WASTE

¹Zholdasbay E.E., ²Argyn A.A., ²Kurmansaitov M.B., ²Daruesh G.S., ¹Ichev V.A.

¹Zhezkazgan University named after O.A. Baikonurov, Zhezkazgan;

²Satpayev University, Almaty, e-mail: argyndaidar@gmail.com

The paper shows the importance and necessity of conducting a preliminary qualitative assessment of the initial E-waste before their processing. The main methodological principle of the study used in the work is the X-ray fluorescence analysis method, which provides reliable determination of the qualitative characteristics of various types and composition of electronic waste. To study the qualitative assessment of waste from a laptop and smartphones, a certified spectrometer RPP-12 (T) was used, developed by AspapGEO LLP (Almaty), which is widely used at enterprises of the mining and metallurgical complex of Kazakhstan and Russia. The device is well adapted for rapid analysis of alloys. A comparative analysis of the extended energy sections of the spectra of qualitative assessment of laptops and smartphones allowed us to establish a wide range of metals (Cu, Ag, Pb, Ni, Zn, Fe, Au, Sn) and nonmetals (Br) in their compositions. It is shown that the content of gold and bromine in laptops significantly exceeds their similar contents in smartphones. The identical character of the intensity of the lines on the obtained spectra allows us to conclude that, by type and composition, these samples are quite suitable for joint processing. Conducting research on preliminary qualitative control of E-waste undergoing processing will allow: (a) from the technological side to determine the range of possible recoverable metals and (b) from an environmental point of view to outline ways to neutralize potentially dangerous components and harmful toxic metals. With the right organization of technology that provides comprehensive extraction of valuable metals, waste-free and environmental safety, E-waste recycling can become a key driver of economic diversification and sustainable development of small and medium-sized businesses.

Keywords: E-waste, laptop, smartphone, recycling, qualitative assessment, ecology, technology, metals, harmful substances, environment

The research was carried out within the framework of grant funding by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for 2023-2025 in the priority area “Rational use of water resources, flora and fauna, ecology” of the project AP19576638 “Development of an innovative technology for the disposal of accumulated E-scrap waste with obtaining pure gold and non-ferrous metals”.

Вовлечение в переработку вторичного сырья всегда привлекало практиков цветной и черной металлургии. Большую актуальность это направление приобретает сегодня, когда наблюдается тренд снижения запасов и качества первичного сырья. Наблюдаемые мировые глобальные политические и экономические перекосы вызывают необходимость изыскания новых месторождений и источников сырья для производства ценных металлов. В жестких экономических рамках оказались страны, где отсутствует собственная минерально-сырьевая база, экономика которых полностью была привязана к импорту металлов и сплавов. Понятно, что в таких условиях наращивание темпов роста производства за счет использования вторичного сырья становится весьма привлекательным. В настоящее время многие европейские и ряд развитых стран (США, Япония, Китай и др.) наращивают объемы извлечения драгоценных металлов из различного вида вторичного сырья, включая лом, техногенные отходы и другие источники, содержащие ценные металлы. Особый интерес представляет восполнение драгоценных металлов за счет переработки электронных отходов, к которому в настоящее время привлечено особое внимание государства, общества, ученых и экспертного сообщества [1-3].

Современное состояние мирового образования, сбора и переработки E-отходов широко освещено в научной литературе [4; 5]. Сложившаяся ситуация касательно E-отходов в мировой практике подробно изложена в обзорных статьях Baldé С.Р. и др. [6; 7]. Авторы на основании большого собранного материала приводят детальный, системный анализ состояния E-отходов, указывают причины образования и подробно излагают факторы, влияющие на рост их объемов и негативное влияние на окружающую среду.

Подробный обзор литературы по E-отходам также приведен в работе [8], где были рассчитаны распределения значений для различных образцов электронных отходов. Авторами показано, что основным экономическим драйвером переработки электронных отходов является восстановление драгоценных металлов. В статье освещается современное состояние извлечения драгоценных металлов из электронных отходов методами пиро-, гидро- и биометаллургической переработки.

Всесторонний обзор проблемы электронных отходов, стратегий управления ими и различные физические, химические и металлургические способы переработки электронных отходов, их преимущества и недостатки для достижения более чи-

стого процесса утилизации отходов, приведен в работе [9]. В обзоре описываются потенциальные опасности и экономические возможности электронных отходов. Особое внимание обращено на опасности, возникающие при переработке E-отходов из-за присутствия тяжелых металлов Hg, Cd, Pb и т.д., бромированных антипиренов и других потенциально вредных веществ в электронных отходах. Авторами акцентировано внимание на том, что из-за присутствия этих веществ электронные отходы обычно считаются опасными отходами, и при неправильном обращении, могут представлять значительный риск для здоровья человека и окружающей среды. Интересным представляется описание текущего состояния и перспективы переработки электронных отходов, вопросов характеристики и классификации. Особый интерес представляет обзор в части определения компонентов электронных отходов/печатных плат.

Большой интерес к переработке E-отходов проявляется и в Российской Федерации. Россия генерирует лишь 3,75% мирового объема электронных отходов, но эта сфера постепенно развивается и становится выгодной. Внедрение эффективных технологий в России сдерживается тем, что крупные металлургические предприятия цветной металлургии нацелены на получение исключительно драгметаллов. Для улучшения экономических показателей предприятий и получения ими максимальной прибыли необходимо внедрять технологии комплексной переработки, направленные на извлечение не только благородных металлов, но и широкого спектра других ценных металлов [10].

Цель работы – проведение сравнительной качественной оценки E-отходов (ноутбуки, смартфоны), которые на сегодняшний день представляют исключительный интерес и могут стать потенциальным источником сырья для восполнения драгоценных и других ценных металлов.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбраны E-отходы, полученные после разборки ноутбуков и смартфонов.

В основу методологии исследований положен рентгенофлуоресцентный метод анализа, позволяющий проводить качественную оценку образцов ноутбуков и смартфонов на наличие в них металлов и неметаллов. Образцы для исследований готовили путем общей разделки и отделения корпусов от внутренних частей. Далее полученные E-отходы подвергали предварительной сортировке, включающей отделение от основ-

ных частей матрицы металлической меди и деталей, с ярко выраженным присутствием чистой меди. После сортировки полученный материал разрезали на мелкие кусочки. Каждый предварительно классифицированный отдельно взятый материал E-отходов подвергали качественной оценке на содержание в них металлов и неметаллов.

Для качественной оценки использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр РПП-12 (Т), (ТОО «АспапГЕО», г. Алматы). Прибор хорошо адаптирован для сортировки и экспресс-анализа сплавов, анализа порошковых и жидких проб (Сертификат РК № 6903). Разработанный в приборе блок возбуждения и детектирования обеспечивает гибкость в выборе площади сбора аналитической информации, высокую светосилу (входная загрузка более 100 кГц) и чувствительность анализа для широкого круга элементов в нижних пределах их обнаружения [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Общий вид прибора РПП-12 (Т) представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Общий вид прибора РПП-12 (Т)

Прибор оснащен мощным методическим и программным обеспечением, что позволяет: для учёта матричных эффектов использовать фундаментальные алгоритмы, в том числе и для рассеянного излучения, учитывающие изменение геометрических условий измерения при вариациях вещественного состава и плотности анализируемых образцов; точно определять функцию отклика каждого детектора, а также спектральный состав возбуждающего излучения; очищать спектр от двойных и тройных наложений; восстанавливать спектр вторичного излучения с учётом зависимости относительных интенсивностей характеристических линий от вещественного состава. Это обеспечивает точное нахождение

истинных интенсивностей аналитических линий элементов [11].

Основные характеристики прибора [11]

- SDD детектор площадью 25 мм² с термоохлаждением. Энергетическое разрешение – 140 эВ.
- Малогабаритный рентгеновский излучатель 50 кВ, 4 Вт.
- Цифровой сигнальный процессор с входной интегральной загрузкой более 200 кГц.
- Площадь сбора аналитической информации порядка 4 см².
- Диапазон определяемых элементов от Al до U в воздушной атмосфере.
- Одновременное определение более 35 элементов.
- Интервал определяемых содержаний от предела обнаружения до 100%.
- Предел обнаружения для большинства элементов – 10⁻⁴% ÷ 10⁻³%.
- Время измерения от 5 сек.
- Полностью автоматизированный режим работы.
- Система самодиагностики.
- Время непрерывной работы прибора без подзарядки аккумуляторов не менее 10 ч.
- Пыле-, влагозащищённый корпус.
- Малые габариты и вес прибора (не более 1,5 кг).

На рисунке 2 представлен общий вид исходных материалов и их состояния после предварительной обработки и подготовки к проведению исследований.

Нетрудно видеть большое количество металлической меди в E-отходах ноутбука. В смартфоне содержание меди, по сравнению с ноутбуком, менее значительно. Это хорошо согласуется с данными литературы [8; 9]. По существующим технологиям отсортированную медь направляют на переработку на медеплавильные заводы для получения товарной меди, которая сопровождается значительными материальными и энергозатратами, связанными, прежде всего, с проведением ряда последовательных операций (плавка, рафинирование, электролиз). При такой организации технологии возникает необходимость сопряжения рядом с предприятиями по переработке E-отходов медеплавильных заводов, что сдерживает развитие производства и снижает ее эффективность. Наиболее рациональным представляется использование полученной после разделки и сортировки металлической меди непосредственно в самой общей технологии переработки E-отходов, например в части плавки материала. При этом медь выполняет функции коллектора для извлечения ряда таких драгоценных металлов, как серебро, платина и палладий. Дальнейшая переработка такой меди повысит экономическую ее привлекательность.

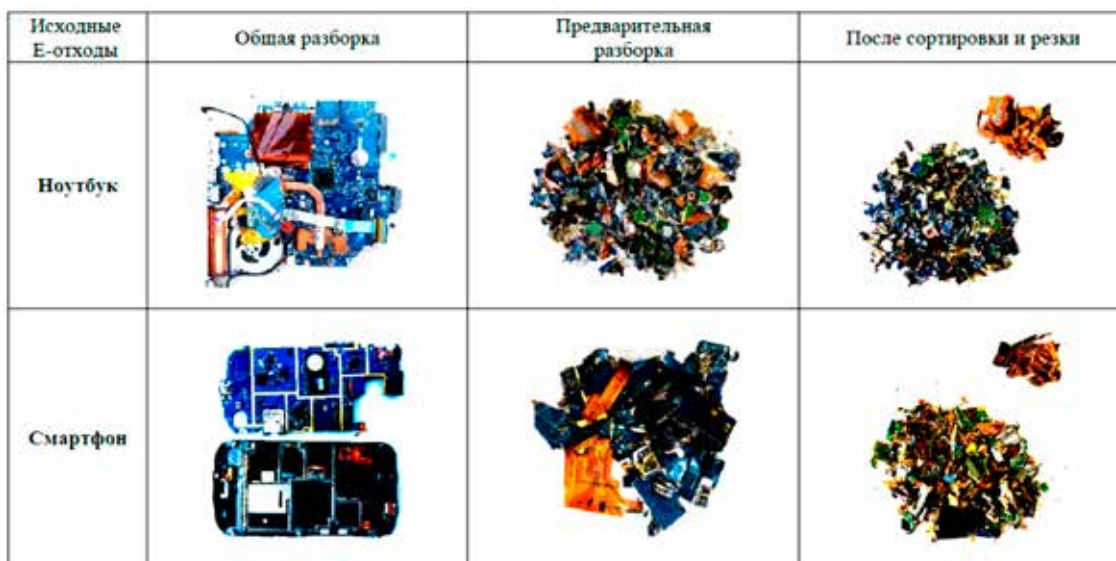


Рис. 2. Общий вид исходных материалов и их состояние после обработки

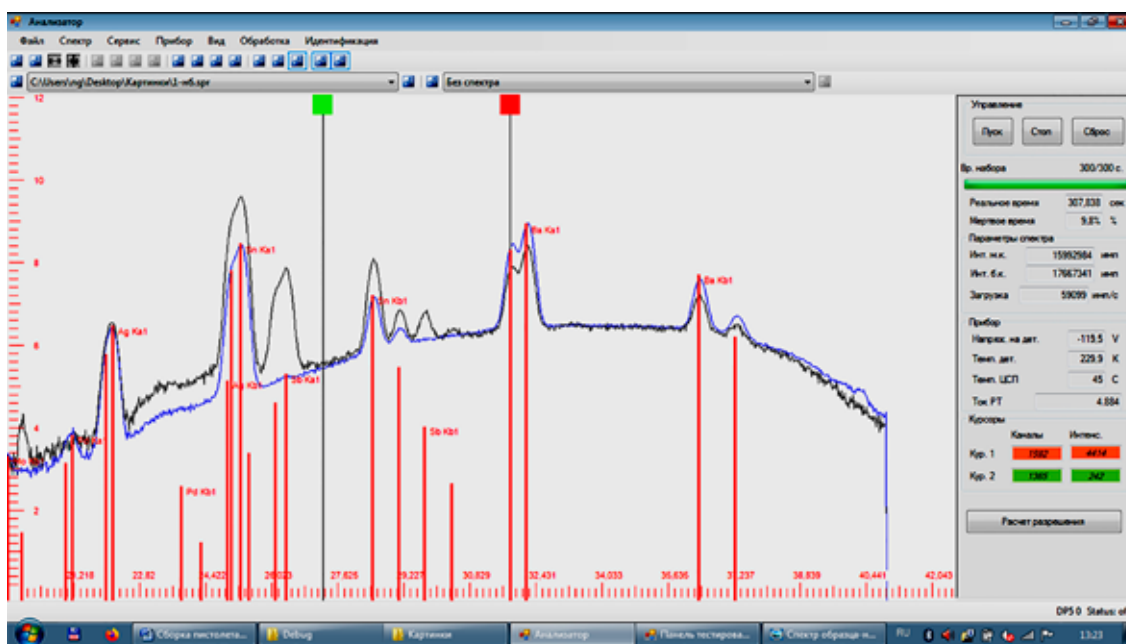


Рис. 3. Сравнительный анализ общих спектров E-отходов: ноутбук – линии черного цвета; смартфон – линии синего цвета

На рисунке 3 показаны сравнительные общие спектры E-отходов: ноутбука и смартфона, в интервале изменения энергии от 21 до 42 кэВ.

В исследованном энергетическом участке ярко выражены пики, характерные для серебра, олова и бария. Линии носят идентичный характер и показывают примерно одинаковое содержание серебра как в ноутбуке, так и в смартфонах. Как видно на рисунке 3, содержание олова и бария в ноутбуке выше, чем в смартфоне. На общем спектре излучение конкретных эле-

ментов, присутствующих в исследуемом образце в малых концентрациях, затруднено. Для более детальной качественной оценки наличия других возможных элементов нами было выполнено расширение энергетических участков. Это позволяет по уровню значений энергии идентифицировать наличие в исследуемом образце конкретного металла.

На рисунке 4 показан сравнительный анализ спектров ноутбука и смартфона на расширенном энергетическом участке в интервале изменения энергии от 6 до 13,689 кэВ.

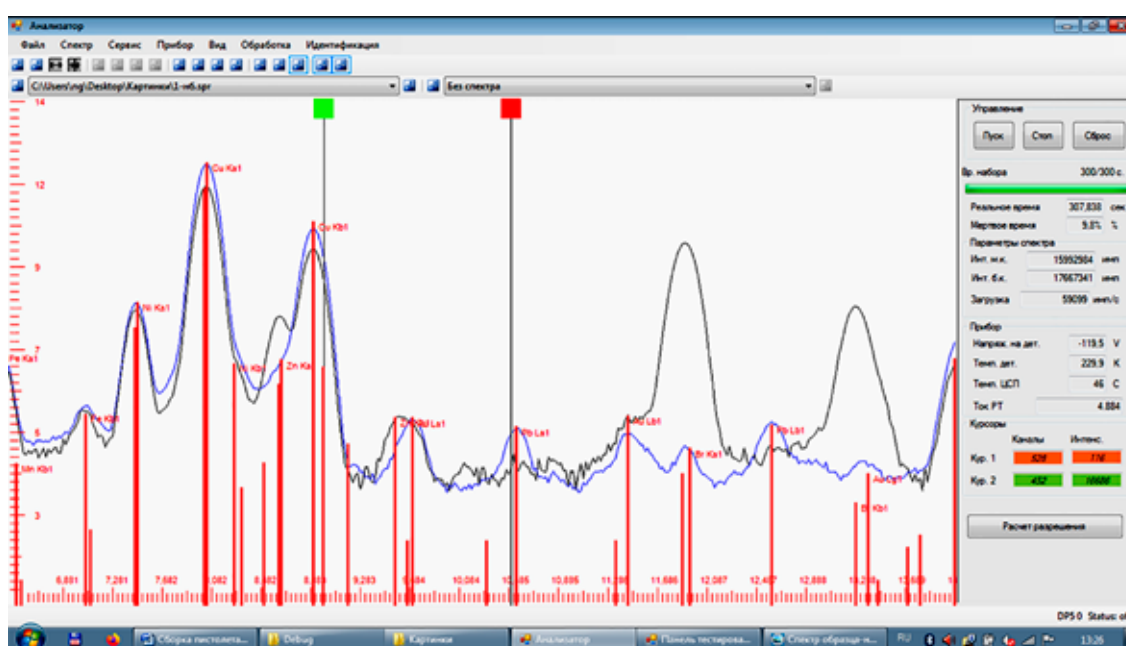


Рис. 4. Сравнительный анализ спектров ноутбука (линии черного цвета) и смартфона (линии синего цвета) на энергетическом участке от 6 до 13,689 кэВ

На рисунке 4 видны ярко выраженные пики, характерные для металлов: Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb. Из драгоценных металлов установлено наличие Au, Ag. Из неметаллов присутствует Br. Содержание цветных металлов, железа и марганца в отходах ноутбука и смартфона примерно одинаково. Содержание золота в ноутбуке намного превышает содержание в смартфоне. Ярко выраженный пик, характерный для брома в ноутбуке, свидетельствует о значительном его наличии в смартфоне.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии широкого спектра металлов в отходах ноутбука и смартфона. Из обнаруженных металлов наиболее вредными считаются свинец и бром.

Оценка содержания металлов в проведенных исследованиях носит относительный характер и является лишь качественной оценкой, так как окончательные усредненные содержания металлов в исследуемых образцах могут быть определены только после измельчения исходных образцов и детального изучения их вещественного состава. Тем не менее проведение предварительной качественной оценки очень важно и может быть использовано для выбора известных технологий и/или при разработке новых технологий по переработке конкретных видов E-отходов. Полученные результаты также могут быть полезны для выбора оптимального состава шихты, включающей различные виды E-отходов.

Результаты качественной оценки E-отходов имеют принципиальное значение для выбора и обоснования технологии их переработки с точки зрения экологической ее безопасности. Знание о наличии в отходах токсичных и вредных металлов и неметаллов позволит выбрать оптимальные пути по их обезвреживанию и предотвратить их выбросы в окружающую среду.

Ниже, на основании анализа обширного материала по переработке E-отходов и полученных в настоящей работе результатов нами сформулирован ряд ключевых моментов, которые представляются наиболее важными для последующего развития технологий, направленных на восполнение драгоценных металлов из E-отходов.

Выводы

1. Большой интерес к сбору и переработке E-отходов вызван резким ростом их объемов, истощением запасов первичного сырья и возможностью их использования в качестве потенциального источника сырья для восполнения драгоценных металлов.

2. С технологической точки зрения существующие технологии переработки E-отходов в основном направлены на извлечение золота. Среди известных технологий преобладает пирометаллургический способ их переработки.

3. Существующие технологии не обеспечивают высокой комплексности использования сырья и сильно завязаны на высо-

козатратные металлургические производства меди и свинца. Не достаточно четко оптимизированы вопросы сбора, разделки и классификации E-отходов.

4. Вопросы экологической безопасности технологий по переработке E-отходов перекрываются экономической целесообразностью получения драгоценных металлов. Ужесточение экологических требований к переработке E-отходов требует кардинального пересмотра подходов к их переработке и необходимости создания новых, экологически чистых, безотходных технологий.

5. Основным ключевым фактором должна стать предварительная качественная оценка каждого типа E-отходов, подвергающегося переработке. Это позволит с технологической стороны определить спектр потенциально возможных извлекаемых металлов, а с экологической стороны – наметить пути обезвреживания опасных, вредных токсичных металлов.

6. При правильной организации технологии, обеспечивающей комплексное извлечение ценных металлов, безотходность и экологическую безопасность, переработка E-отходов может стать ключевым драйвером диверсификации экономики и устойчивого развития малого и среднего бизнеса.

Список литературы

1. Blake V., Farrelly T., Hannon J. Is Voluntary Product Stewardship for E-Waste Working in New Zealand? A Whangarei Case Study // Sustainability (Switzerland). 2019. Vol. 11 (11). P.1–26. DOI: 10.3390/su11113063.

2. Abbasi G. Story of Brominated Flame Retardants: Substance Flow Analysis of PBDEs from Use to Waste. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://hdl.handle.net/1807/79733> (дата обращения: 21.06.2023).

3. Gadekar J. Extraction of Gold and other Precious Metals from e-waste // International Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Research. 2017. Vol. 1. P. 24-34.

4. Anand A. et al. Recycling of Precious Metal Gold from Waste Electrical and Electronic Equipments (WEEE): A review. // XIII International Seminar on Mineral Processing Technology. Bhubaneswar: CSIR-IMMT. 2013. Vol. 3. P. 916-923.

5. Duan H., Miller T.R., Gang L., Xianlai Z., Keli Y., Qifei H., Jian Z. Supporting Information for: Chilling Prospect: Climate Change Effects of Mismanaged Refrigerants in China Table of Content Tables and Figures // Environmental Science and Technology. 2018. Vol. 52 (11). P. 6350-6356. DOI: 10.1021/acs.est.7b05987.

6. Baldé C.P., Forti V., Gray V., Kuehr R., Stegmann P. The Global E-Waste Monitor 2017 // Edited by United Nations University (UNU). International Telecommunication, 2017. 109 p.

7. Baldé C.P., D'Angelo E., Forti V., Kuehr R., Van den Brink S. Waste mercury perspective, 2010-2035: from global to regional. 2018. United Nations University (UNU), United Nations Industrial Development Organization, Bonn/Vienna, 2018. 60 p.

8. Cui J., Zhang L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste // A review Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 158, Is. 2-3. P. 228-256.

9. Kaya M. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes // Waste Management. 2016. Vol. 57. P. 64-90.

10. Лолейт С.И. Разработка экологически чистых технологий комплексного извлечения благородных и цветных металлов из электронного лома: спец. 05.16.02 «Металлургия черных и цветных металлов»: дис. ... д-ра техн. Наук / Нац. исслед. технолог. ун-т «МИСиС». Москва, 2010. 245 с.

11. Досмухамедов Н.К., Лезин А.Н. Разработка отечественных приборов аналитического контроля для предприятий горно-металлургического комплекса Казахстана // Горный журнал Казахстана. 2011. № 10. С. 28-35.