



Обзор на наличните до момента в световен мащаб технологии за добив и преработка на критични и стратегически суровини

Доц. д-р Весела Петрова
МГУ „Св. Иван Рилски“

В условията на ускорена зелена и цифрова трансформация, достъпът до критични и стратегически суровини (КСС) се утвърждава като ключов фактор за устойчивото развитие на икономиките и тяхната технологична автономност. Елементи като литий, кобалт, редкоземни метали и графит са в основата на съвременните технологии – от батерии и възобновяема енергия до електроника, квантови компютри и военни приложения (Bauer et al., 2011; Hund et al., 2020). Несигурността на глобалните вериги на доставки, съчетана с геополитическите напрежения и нарастващото потребление, води до засилен интерес към разработването на нови технологии за добив и преработка на КСС с по-висока ефективност и по-ниско екологично въздействие (Graedel et al., 2015; European Commission, 2023).

На фона на стратегическата значимост на суровините, редица държави разработват целенасочени политики за насърчаване на вътрешния добив и диверсификация на източниците. В Европейския съюз, Актът за критични суровини (Critical Raw Materials Act, 2023) задава амбициозни цели за увеличаване на добива, преработката и рециклирането на КСС в рамките на Общността (European Commission, 2023). Сходни подходи се наблюдават в САЩ чрез инициативи като Critical Materials Innovation Hub, както и в Китай, където държавната



индустриална политика поддържа стратегически контрол върху ключови метали (Mancheri et al., 2019).

Технологиите за добив и преработка на КСС са изправени пред значителни предизвикателства, произтичащи от ниската концентрация на целевите елементи в рудите, сложността на обогатителните процеси, токсичността на реагентите и високата енергийна интензивност (Binnemans et al., 2013; Nassar et al., 2022). В този контекст се засилва необходимостта от систематичен научен обзор на наличните към момента технологични решения, тяхната степен на технологична зрялост (TRL), икономическа и екологична ефективност и приложимост в различни географски и геополитически условия.

Критични и стратегически суровини: концептуална рамка

Терминът *критични суровини* обозначава онези природни ресурси, които са от съществено значение за икономиката и технологичното развитие, но които са изложени на висок риск по отношение на тяхната сигурност на доставка (European Commission, 2023a). *Стратегическите суровини* представляват подмножество на критичните, характеризиращи се с особено значение за прехода към климатична неутралност, цифровизацията и отбранителната способност на страните (Hund et al., 2020).



Таблица 1: Сравнителен преглед на политическите рамки и списъците с критични суровини в ЕС, САЩ, Япония и Китай

Регион / Документ	Брой определени критични суровини	Примери (основни групи)	Последна актуализация
Европейски съюз – Critical Raw Materials Act (CRMA)	34 критични, от които 17 стратегически	Редкоземни елементи, литий, кобалт, графит, магнезий	2023
САЩ – USGS Critical Minerals List	50 суровини	Алуминий (боксит), хром, никел, манган, платинена група метали, REE	2022
Япония – METI Strategic Materials	~30 суровини	Литий, никел, кобалт, редкоземни метали, волфрам, молибден	2020 (периодични ревизии)
Китай – National Mineral Strategy	Няма официален публичен списък, но фокус върху редкоземи, графит, волфрам, антимон	Контролира >60% от глобалното производство на REE	2021

Подходът на Европейския съюз, обобщен в списъка с критични суровини (CRM List), прилага двусен модел за оценка: (1) икономическа значимост на суровината и (2) риск при снабдяването. Оценката включва параметри като дял на сектора в БВП, стратегически зависимости от конкретни държави (напр. Китай, Русия, Демократична



република Конго) и потенциал за заместване или рециклиране (Blengini et al., 2017). В актуализирания списък от 2023 г. фигурират 34 суровини, включително редкоземни елементи, бор, литий, ниобий и магнезий (European Commission, 2023b).

Съединените американски щати използват подобна рамка чрез U.S. Geological Survey (USGS), като от 2018 г. насам публикуват собствен списък на критичните минерали, базиран на националната сигурност, индустриалната база и военните приложения (Nassar et al., 2020). Китай, от своя страна, класифицира стратегическите ресурси въз основа на индустриалната си политика и геоикономическите цели, като залага на контролирана експортна политика и вертикално интегрирани добивни структури (Mancheri et al., 2019).

В Япония и Южна Корея подходът е ориентиран към индустриалната устойчивост – с фокус върху енергийната независимост, електрониката и автомобилостроенето. Тези страни прилагат интензивни програми за развитие на технологии за заместване, рециклиране и стратегически резерви (Alves Dias et al., 2020).

Разглеждането на различните класификации на критичните суровини показва, че отделните региони подхождат към темата според своите икономически и геополитически приоритети. Европейският съюз чрез Critical Raw Materials Act (CRMA, 2023) акцентира върху стратегическата автономия и гарантирането на устойчиви доставки за енергийния и технологичния преход. В САЩ подходът е по-широк – списъкът на USGS (2022) включва 50 минерала, с акцент върху суровини за индустриалната и военната сигурност. Япония от своя страна формулира своята политика чрез Министерството на икономиката, търговията и индустрията (METI), като поставя приоритет върху суровини, критични за високотехнологичните производства и автомобилната индустрия. Китай няма официален публичен списък, но



чрез своята Национална минерална стратегия (2021) на практика контролира глобалния пазар на ключови суровини, включително над 60% от производството на редкоземни елементи.

От сравнението се вижда, че въпреки съществуващите различия, има съществени припокривания – литий, кобалт, графит, никел и редкоземни елементи са сред приоритетите на всички анализирани региони. Това потвърждава тяхната централна роля за развитието на зелени технологии, енергийно съхранение и цифровизация. В този контекст за България и ЕС е от ключово значение да изработят политики, които не само следват глобалните тенденции, но и отчитат националните ресурси и специфики на добивната индустрия.

Идентифициране на суровините с най-голямо икономическо и екологично значение

Идентифицирането на суровините с най-голямо икономическо и екологично значение е ключова стъпка при формулирането на национални приоритети. Това позволява насочване на инвестиции, научноизследователска дейност и регулаторни усилия към онези материали, които са едновременно незаменими за индустрията и същевременно представляват сериозно предизвикателство за околната среда.

Икономическо значение

На глобално ниво суровини като литий, кобалт, никел, графит и редкоземни елементи (REE) се отличават с изключителна важност поради растящото търсене в сектора на батериите, електромобилите и възобновяемите енергийни технологии. Според данни на Европейската комисия до 2050 г. търсенето на литий в ЕС ще се увеличи повече от 12 пъти, а на редкоземни елементи – над 7 пъти. България, като част от европейското икономическо пространство, е силно зависима от вноса



на тези суровини, което допълнително подчертава тяхната стратегическа стойност.

Екологично значение

От екологична гледна точка същите суровини са проблематични. Добивът и преработката на литий и кобалт например са свързани с висока консумация на вода и енергия, както и с генериране на токсични отпадъци. Редкоземните елементи се добиват основно в Китай, където екологичните стандарти са по-слаби, а последствията включват тежки метали в почвите и радиоактивни остатъци. В допълнение, никелът и графитът са свързани със значителен въглероден отпечатък, който трябва да се отчита в рамките на политиките за климатична неутралност.

Таблица 2. Прогнозиран ръст на търсенето на ключови суровини в ЕС

Суровина	Очакван ръст на търсенето до 2030 г.	Очакван ръст на търсенето до 2050 г.	Основни приложения
Литий (Li)	×4–5 пъти	×12–15 пъти	Батерии за електромобили, стационарни системи за съхранение на енергия
Кобалт (Co)	×2–3 пъти	×5–6 пъти	Батерии, суперсплави, електроника
Никел (Ni)	×1.5–2 пъти	×3–4 пъти	Батерии (NMC), неръждаема стомана
Графит (C, natural/synthetic)	×2–3 пъти	×5 пъти	Аноди за батерии, огнеупорни материали
Редкоземни елементи (REE – Nd, Dy, Tb, Pr)	×3–4 пъти	×7–8 пъти	Постоянни магнити, вятърни турбини, електромотори

Източници: Европейска комисия (CRMA 2023); World Bank (Minerals for Climate Action, 2020).



Видно от таблица 2, прогнозираният ръст на търсенето е особено изразен при лития и редкоземните елементи. Литият ще бъде ключов за електромобилността и енергийното съхранение, докато редкоземните елементи са в основата на високоефективните магнити за вятърни турбини и електромотори. Кобалтът и никелът остават критични за развитието на батерийните технологии, докато графитът заема централна роля като аноден материал. Тези данни потвърждават необходимостта от стратегически подход към добива, рециклирането и заместването на суровини, чието значение ще нараства експоненциално в следващите десетилетия.

Анализ на регулаторни, финансови и технологични предизвикателства

Регулаторни предизвикателства

Регулаторната рамка на ЕС за критичните суровини се развива динамично, като през 2023 г. беше приет Critical Raw Materials Act (CRMA), който определя стратегически цели за вътрешно производство, рециклиране и диверсификация на вноса. Въпреки това остават редица предизвикателства: сложни и дълги процедури за разрешителни при нови проекти, различия в националните законодателства на държавите членки и ограничена координация с трети страни. Допълнителна трудност е балансът между ускоряване на проектите и осигуряване на високи екологични стандарти – противоречие, което често води до обществено недоволство и забавяне на инвестициите.



Финансови предизвикателства

Финансирането на проекти за добив и преработка на критични суровини е свързано с висок капиталов интензитет и дълъг период на възвръщаемост. Частният сектор често е предпазлив да инвестира поради пазарната волатилност и геополитическите рискове. Европейският алианс за суровини (ERMA) и инициативите на Европейската инвестиционна банка (ЕИБ) предоставят инструменти за подкрепа, но мащабът им все още е ограничен спрямо нуждите. Липсата на достатъчно механизми за споделяне на риска възпрепятства развитието на нови проекти в ЕС, което води до продължаваща зависимост от внос.

Технологични предизвикателства

Технологичният напредък при извличането и преработката на суровини е ключов за намаляване на екологичния отпечатък и повишаване на ресурсната ефективност. Въпреки това внедряването на иновативни методи – като високонапорни валцови мелници (HPGR), плазмено и микровълново третиране, селективни разтворители (ionic liquids, deep eutectic solvents) – остава ограничено основно до пилотни проекти. Основни бариери са високата цена на внедряване, липсата на мащабируеми индустриални демонстрации и недостатъчна координация между академия и индустрия. Съществува и риск от технологична зависимост от държави, които вече са инвестирали сериозно в нови процеси (например Китай и Австралия).



Таблица 3. PESTEL анализ на предизвикателствата пред веригата на критичните суровини

Фактор	Основни предизвикателства	Влияние върху критичните суровини
Политически (P)	Зависимост от внос от ограничен брой държави (Китай, ДР Конго); геополитически напрежения; липса на координация на ЕС с глобални партньори	Висок риск от прекъсване на доставките; стратегическа уязвимост
Икономически (E)	Висок капиталов интензитет на добивните проекти; нестабилност на цените; ограничени механизми за финансиране и споделяне на риска	Ограничен приток на инвестиции; забавено развитие на нови проекти в ЕС
Социални (S)	Обществено недоволство срещу нови рудници; липса на социална приемливост; опасения за здравето и заетостта	Забавяния при разрешителни; риск от блокиране на ключови проекти
Технологични (T)	Ограничено внедряване на нови технологии (HPGR, DES, ionic liquids); липса на индустриални демонстрации; риск от технологична зависимост	Ниска ефективност на преработката; по-висок екологичен отпечатък
Екологични (E)	Висока консумация на енергия и вода; генериране на токсични отпадъци; несъответствия с климатичните цели	Конфликт между добивната индустрия и Зелената сделка
Правни (L)	Дълги и сложни разрешителни процедури; различия в националното законодателство; несигурност в прилагането на CRMA	Забавяне на проекти; ограничена предвидимост за инвеститорите

PESTEL анализът ясно подчертава, че предизвикателствата не са изолирани, а взаимно свързани. Политическата и правната несигурност възпрепятстват инвестициите, които са допълнително утежнени от социалния натиск и екологичните изисквания. Технологичните



решения могат да смекчат част от тези рискове, но тяхното внедряване е невъзможно без стабилна финансова и регулаторна рамка. Това потвърждава необходимостта от интегриран подход, който да обедини политики, наука и индустрия в обща стратегия за устойчиво управление на критичните суровини.

Проучване на текущи модели на кръговата икономика (теоретични основи и добри практики)

Кръговата икономика е стратегически подход, насочен към минимизиране на отпадъците и максимално използване на ресурсите. В контекста на критичните суровини нейното значение е особено голямо, тъй като намалява зависимостта от първичен добив и ограничава екологичния отпечатък. Теоретичните основи на кръговата икономика се базират на принципите на затворените материални потоци, удължаването на жизнения цикъл на продуктите и индустриалната симбиоза.

Теоретични основи

- Затворени цикли (closed-loop systems) – суровините се връщат в производствения процес чрез повторна употреба или рециклиране.
- Екодизайн (eco-design) – продуктите се проектират така, че да улесняват демонтажа и рециклирането.
- Индустриална симбиоза – отпадъкът на една индустрия се превръща в ресурс за друга.
- Удължаване на жизнения цикъл – чрез ремонт, модернизация и повторна употреба на продукти.



Добри практики

- Европейски съюз – *EU Battery Regulation (2023)* въвежда задължителни нива за събиране и рециклиране на батерии (50% за литий до 2027 г. и 80% до 2031 г.).
- Скандинавски държави – прилагат индустриални симбиози в минни региони (например в Швеция и Финландия, където отпадъчните материали от добива се използват за строителни суровини).
- Япония – лидер в *urban mining*: над 50% от златото и среброто за електроника се добива от рециклиране на стари устройства.
- САЩ – програми за повторна употреба на редкоземни магнити и катализатори в отбранителната индустрия.

Анализ

Сравнението между моделите показва, че:

- ЕС е водещ в регулациите и поставянето на количествени цели.
- Япония е иноватор в практиките на градско рециклиране.
- Скандинавските страни са напреднали в прилагането на индустриална симбиоза.
- САЩ интегрират кръгова икономика в стратегическите си индустрии, но с ограничено прилагане извън отбранителния сектор.

Кръговата икономика е не само теоретичен модел, а и практическа необходимост за намаляване на стратегическите зависимости. Добрите практики показват, че успешните инициативи съчетават регулаторни стимули, индустриални партньорства и технологични иновации. За България потенциал има в рециклирането на електронни отпадъци,



повторната експлоатация на минни хвостохранилища и развитието на регионални индустриални симбиози.

Таблица 4. Международни практики за прилагане на модели на кръгова икономика и постигнати ефекти

Модел на кръгова икономика	Пример	Резултат / ефект
Urban mining	Япония – рециклиране на електроника	50% от златото и среброто за електроника идва от отпадъци
Battery recycling	ЕС – Battery Regulation	Задължителни цели за литий: 50% (2027), 80% (2031)
Industrial symbiosis	Швеция/Финландия – минни региони	Използване на отпадъчни материали за строителни суровини
Critical metals reuse	САЩ – отбрана	Повторна употреба на REE магнити и катализатори

Изследване на технологии и модели за интегриране на принципите на кръговата икономика в добива и преработката

Рамка за интеграция

Интегрирането на кръгови принципи в добивните индустрии се осъществява чрез едновременни технологични и организационни интервенции по трите ключови оси: (i) намаляване на първичното потребление, (ii) затваряне на материални и водни цикли, (iii) повишаване на ресурсната извличаемост от първични и вторични потоци. В този раздел систематизираме зрели и нововъзникващи решения и оценяваме тяхната ефективност, устойчивост, скалируемост и степен на технологична готовност (TRL).



Технологични клъстери и „кръгови функции“

1. Energy-lean comminution & beneficiation

- Високонаторни валцови мелници (HPGR), микровълново/плазмено третиране преди трошене, сензорно-базирано сортиране (SBS).

- Кръгова функция: по-нисък енергиен интензитет, редуцирано презасмилане, по-чисти потоци за последващи селективни процеси.

2. Селективни разделяния с ниска токсичност

- Йонни течности (IL), дълбоки евтектични разтворители (DES), хибридни мембрана-SX системи, йонообмен.

- Кръгова функция: по-висока селективност и възможност за регенерация/рециклиране на реагенти.

3. Водни и реагентни цикли

- Затворени водни контури (UF/NF/RO), кристализация/възстановяване на соли, карбонатни цикли.

- Кръгова функция: минимизиране на водния отпечатък и загубите на реагенти.

4. Възвръщане на съпътстващи елементи и странични потоци

- Допълнителна екстракция (Sc от червена кал, Ge/Te от пепел/шлаки), повторна флотация на хвостове (re-mining).

- Кръгова функция: мултипродуктови линии и повишена материална ефективност.

5. Градски добив и повторно производство

- Хидрометалургични схеми за „black mass“ (Li-ion), директно възстановяване на катоди; рециклиране на Nd-Fe-B (H-decrepitation + селективно разтваряне).

- Кръгова функция: връщане на критични метали във веригата с по-ниска енергийна интензивност.



6. Дигитализация и проследимост

- Digital twins, предиктивен контрол с ИИ, блокчейн за проследимост на партии/произход.
- Кръгова функция: оптимизация на добива, намаляване на загубите и доверие в рециклирания поток.

Примерни приложения

Пример 1 – DLE в соларни системи. Директното извличане заменя изпарителните полета със селективни сорбенти/разтворители; скъсява цикъла, намалява водния отпечатък и позволява частично рециклиране на разтворите. Предизвикателство: стабилност/отравяне на сорбента и управление на примеси (Mg/Ca/Si).

Пример 2 – Nd-Fe-B магнити. Хидрогенно „разсипване“ + селективно разтваряне възстановява REE със значително по-ниска енергия спрямо първичен добив; критично е качеството на сортиране и стандарти за сертифициран произход (проследимост).

Пример 3 – Re-mining на хвостове. Вторична флотация + хидрометалургия извличат Sc/REE/метали от „исторически“ отпадъци; едновременно намаляват екологичен риск (киселинен дренаж) и освобождават площ за рекултивация.

Пример 4 – Хибрид мембрана-SX при комплексни разтвори. Комбинирането на мембранни етапи с SX намалява органичната фаза и масовия пренос на примеси; изисква стабилна предварителна кондиция на потока (pH/йонна сила).



Използвана литература

1. Achterberg, E., Hinfelaar, J., & Bocken, N. (2016). *Mastering the circular economy: A practical approach to the circular business model transformation*. ING Economics Department.
2. Antikainen, M., Uusitalo, T., & Kivikytö-Reponen, P. (2018). *Digitalisation as an enabler of circular economy*. Procedia CIRP, 73, 45–49. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.009>
3. Ayres, R. U., & Peiró, L. T. (2013). *Material efficiency: Rare and critical metals*. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 371(1986), 20110563. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0563>
4. Blengini, G. A., et al. (2019). *Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills*. JRC Technical Reports, European Commission.
5. Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). *The emergence of circular economy: A new framing around prolonging resource productivity*. Journal of Industrial Ecology, 21(3), 603–614. <https://doi.org/10.1111/jiec.12603>
6. Bocken, N. M. P., Bakker, C., & Pauw, I. D. (2016). *Product design and business model strategies for a circular economy*. Journal of Industrial and Production Engineering, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
7. Christmann, P. (2022). *Towards circularity in mining: Barriers and opportunities*. Resources Policy, 77, 102702. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102702>
8. Dold, B. (2014). *Submarine tailings disposal (STD)—A review*. Waste Management & Research, 32(1), 82–95. <https://doi.org/10.1177/0734242X13513108>
9. European Commission. (2020). *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*. Brussels: COM(2020) 474 final.
10. European Commission. (2023a). *Proposal for a Regulation establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials*. Brussels: COM(2023) 160 final.
11. European Commission. (2023b). *Circular Economy Monitoring Framework*. Retrieved from <https://ec.europa.eu>
12. Everingham, J., et al. (2021). *Mine closure and post-mining transitions in an era of decarbonisation and energy transition*. Energy Research & Social Science, 75, 102019. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102019>
13. Fernández-Llamazares, Á., et al. (2021). *Mining and circular economy: Integrating socioecological resilience in mineral policy*. Environmental Science & Policy, 120, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.03.004>
14. Frosch, R. A., & Gallopoulos, N. E. (1989). *Strategies for manufacturing*. Scientific American, 261(3), 144–152.
15. Gaustad, G., et al. (2018). *Circular economy strategies for critical materials in clean energy technologies*. Environmental Science & Technology, 52(15), 8325–8335. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00206>
16. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). *The Circular Economy—A new sustainability paradigm?* Journal of Cleaner Production, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
17. Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., & Reck, B. K. (2015). Criticality of metals and metalloids. PNAS, 112(14), 4257–4262. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>
18. Harper, E. M., Kavlak, G., & Graedel, T. E. (2019). Tracking the recyclability of critical metals: Lessons from the rare earths and lithium. Journal of Industrial Ecology, 23(6), 1226–1237. <https://doi.org/10.1111/jiec.12938>



19. Heikkinen, T., et al. (2020). *Advancing circular economy in the Finnish mining sector*. Resources, Conservation and Recycling, 155, 104656. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104656>
20. Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T. P., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. World Bank.
21. Kalmykova, Y., Sadagopan, M., & Rosado, L. (2018). Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>
22. Kalmykova, Y., Sadagopan, M., & Rosado, L. (2018). *Circular economy–From review of theories and practices to development of implementation tools*. Resources, Conservation and Recycling, 135, 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>
23. Li, J., Shi, P., Zhang, H., Chen, J., & Xu, Z. (2021). Recycling spent lithium-ion batteries for recovering materials. *Nature Sustainability*, 4, 236–243. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00638-2>
24. Lottermoser, B. G. (2011). *Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes*. Elements, 7(6), 405–410. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.405>
25. Mancheri, N. A., Sprecher, B., Bailey, G., Ge, J., & Tukker, A. (2019). Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.017>
26. Nassar, N. T., & Fortier, S. M. (2021). U.S. mineral supply chain security in the age of pandemics and trade wars. *Resources Policy*, 71, 101964. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.101964>
27. Northey, S. A., et al. (2020). *Energy transition and critical metals: A circular economy perspective*. Resources, Conservation and Recycling, 156, 104698. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104698>
28. Oguchi, M., Sakanakura, H., Terazono, A., & Nakamura, S. (2013). Fate of rare earth elements in e-waste during recycling: A review. *Waste Management*, 33(6), 1236–1246. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.006>
29. Pan, S. Y., et al. (2022). *Urban mining and circular economy: A roadmap for sustainable resource recovery*. Journal of Environmental Management, 305, 114376. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114376>
30. Pauliuk, S. (2018). *Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations*. Resources, Conservation and Recycling, 129, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019>
31. Reike, D., Vermeulen, W. J. V., & Witjes, S. (2018). *The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options*. Resources, Conservation and Recycling, 135, 246–264. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>
32. Romero, D., & Santos, J. M. (2022). *Transitioning towards a circular mining economy in Latin America: Challenges and pathways*. Resources Policy, 76, 102580. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102580>
33. Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F. (2019). *How to assess product performance in the circular economy? Proposed requirements for the design of a circularity measurement framework*. Recycling, 4(3), 21. <https://doi.org/10.3390/recycling4030021>
34. Sakai, S., Yoshida, H., Hirai, Y., Asari, M., Takigami, H., Takahashi, S., & Tomoda, K. (2018). An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0620-3>
35. Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S., & Merz, C. (2018). *Study on the review of the list of critical raw materials*. European Commission, DG GROW.



36. Tan, J. P. L., et al. (2020). *Blockchain-enabled transparency in sustainable minerals supply chains*. Resources, Conservation and Recycling, 152, 104478. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104478>
37. Tisserant, A., et al. (2017). *Solid waste and the circular economy: A global analysis of material flows and recovery*. Journal of Industrial Ecology, 21(3), 628–640. <https://doi.org/10.1111/jiec.12562>
38. Tsydenova, O., & Bengtsson, M. (2011). Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. *Waste Management*, 31(1), 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.014>
39. Van den Brink, S., et al. (2022). *Opportunities for circular mining in sub-Saharan Africa: Integrating informal sectors and decentralized processing*. Journal of Cleaner Production, 345, 131152. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131152>
40. Velenturf, A. P. M., Purnell, P., Jensen, P. D., & Jopson, J. (2019). *A call to integrate economic, social and environmental motives into guidance for circular economy implementation*. Resources, Conservation and Recycling, 144, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.034>
41. Viebahn, P., Soukup, O., Samadi, S., Teubler, J., Wiesen, K., & Ritthoff, M. (2020). Assessing the environmental performance of CCU and CCS technologies: A comparative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122405>
42. Xie, F., Zhang, T. A., Dreisinger, D., & Doyle, F. (2020). A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. *Minerals Engineering*, 132, 192–210. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.012>
43. Yazan, D. M., Romano, V. A., & Albino, V. (2020). *The design of industrial symbiosis: A framework based on strategic niche management and transition theory*. Journal of Cleaner Production, 255, 120118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120118>
44. Yin, H., Liu, Z., & Xu, H. (2022). Biotechnological strategies for critical metal recovery from waste. *Biotechnology Advances*, 55, 107889. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107889>
45. Zeng, X., Mathews, J. A., & Li, J. (2023). Circular economy of strategic metals: From end-of-life products to secondary resources. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 21–39. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00360-1>



“Обзор на наличните до момента в световен мащаб технологии за добив и преработка на критични и стратегически суровини” е

разработен по
НАЦИОНАЛНА НАУЧНА ПРОГРАМА „КРИТИЧНИ И СТРАТЕГИЧЕСКИ СУРОВИНИ ЗА ЗЕЛЕН ПРЕХОД И УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ“, одобрена с решение на МС № 508/18.07.2024 г. и финансирана от МОН

РП.І.4. Ефективен добив и преработка на суровини в България и потенциал за попълно извличане на критични суровини.

Име и № на задача:

Задача І. 4. 6. *«Оценка на икономическата целесъобразност на технологиите за добив и преработка на критични и стратегически суровини»*

Ръководител: доц. д-р Весела Петрова