

УДК 502.628:504.052

Andrii Buchka, PhD student of Ecology and Environmental Protection Department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1447-9027> **e-mail:** andriibuchka@gmail.com

Veronika Prykhodko, PhD (Geography), Associate Professor, Associate Professor of Ecology and Environmental Protection Department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3854-6693> **e-mail:** vks26@ua.fm

Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

PHOTOVOLTAIC PANEL WASTE: FACTORS, RISKS AND FORECAST OF ACCUMULATION

Abstract. *The article is devoted to the analysis of the processes and prospects of photovoltaic panel waste generation in the context of the intensive development of solar energy. The aim of the study is to assess and forecast the generation of photovoltaic panel waste as a component of waste electrical and electronic equipment, and to identify the main problems and risks associated with the accumulation of this waste in the environment. The research methods include the analysis and systematization of information on assessing factors and forecasting photovoltaic panel waste generation based on different models.*

The study of the panel waste growth under various scenarios, including to the overall electronic waste flow, has shown that the volume and share of such waste are increasing rapidly. In 2014, the share of photovoltaic panel waste in the total amount of waste electrical and electronic equipment was 0.1%; in 2022 – 1%. However, by 2030, the annual volume of panel waste is projected to reach 2.4 million tonnes, and by 2050 – 6.5 million tonnes, which corresponds to 3% and 6% of the projected total amount of waste electrical and electronic equipment. The main reasons for panel waste generation are the approved average lifespan of 25 years, premature degradation of the encapsulant, extreme weather conditions, early modernization of operating panels, etc.

The structural features of panels that influence their resource potential and recycling complexity are considered. The main barriers to effective waste management are identified: underdeveloped recycling infrastructure, complex panel structure, low profitability of valuable component extraction, and others.

The theoretical significance of the presented study is in the systematization of information on photovoltaic panel waste generation, including projections up to 2050 based on various models. According to the obtained results, the volume of waste will grow rapidly, and under conditions of low recycling rates, this will lead to the accumulation of such waste in the environment and, consequently, to contamination with toxic components from the waste. The practical significance of the obtained results is in substantiating the need to develop sustainable models for the use of panels and waste management to prevent significant risks in the future.

The value of the study is in the comprehensive comparison of photovoltaic panel waste growth forecasts, including in relation to the dynamics of the overall flow of electronic waste. Further research may be aimed at improving recycling systems and developing effective policies for photovoltaic panel waste management.

Keywords: waste electrical and electronic equipment, recycling, management, photovoltaic module.

А.В. Бучка, В.Ю. Приходько

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса, Україна

ВІДХОДИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ: ФАКТОРИ, РИЗИКИ ТА ПРОГНОЗ НАКОПИЧЕННЯ

Анотація. Стаття присвячена аналізу процесів та перспектив утворення відходів фотоелектричних панелей в умовах інтенсивного розвитку сонячної енергетики. Метою дослідження є оцінка та прогнозування утворення відходів фотоелектричних панелей як складової частини відходів електричного та електронного обладнання, визначення основних проблем та ризиків, пов'язаних з накопиченням даних відходів у довкіллі. Методи дослідження полягають у аналізі та систематизації інформації щодо оцінки факторів та прогнозування утворення відходів фотоелектричних панелей за різними моделями.

Дослідження динаміки росту обсягів відходів панелей за різними сценаріями, в тому числі відносно динаміки зростання загального потоку електронних відходів, показали, що кількість та частка таких відходів швидко зростають. Так, у 2014 році частка відходів фотоелектричних панелей у загальній масі відходів електричного та електронного обладнання склала 0,1%; в 2022 році – 1%. Проте на період до 2030 року прогнозується збільшення річного обсягу відходів панелей до 2,4 млн т, та до 2050 року – до 6,5 млн т, що відповідає 3% та 6% від прогнозованої загальної маси відходів електричного та електронного обладнання. Основними причинами утворення відходів панелей є затвердшений у середньому 25-річний термін експлуатації, передчасна деградація інкапсулянта та екстремальні погодні умови, дострокова модернізація працюючих панелей тощо.

Розглянуто конструкційні особливості панелей, що впливають на їхній ресурсний потенціал і складність утилізації. Визначено основні бар'єри ефективного управління такими відходами: недосконала інфраструктура переробки, складність структури панелей, низька рентабельність вилучення цінних компонентів і інші.

Теоретичне значення представленого дослідження полягає в систематизації інформації щодо утворення відходів фотоелектричних панелей, в т.ч. на перспективу до 2050 року за різними моделями. За отриманими результатами, кількість відходів буде стрімко зростати, що, за умов низького рівня переробки, призведе до накопичення таких відходів у довкіллі, отже, до забруднення токсичними компонентами, що є у складі відходів. Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні необхідності розробки сталих моделей використання панелей та поводження з відходами для попередження значних ризиків у майбутньому.

Цінність дослідження полягає у комплексному зіставленні результатів прогнозів зростання відходів фотоелектричних панелей, в тому числі в порівнянні із динамікою загального потоку електронних відходів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на удосконалення систем переробки та формування ефективної політики управління відходами фотоелектричних панелей.

Ключові слова: відходи електричного та електронного обладнання, переробка, управління, фотоелектричний модуль.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.29-44>

Вступ

Розвиток людства нерозривно пов'язаний із постійним зростанням споживання енергії, що закономірно призводить до збільшення залежності від традиційних енергоресурсів, таких як вуглеводні та ядерне паливо. Екологічні ризики та проблеми, пов'язані з використанням викопного палива, полягають у забрудненні довкілля продуктами горіння, в т.ч. парниковими газами, утворенні радіоактивних відходів та виснаженні запасів корисних копалин. Ці виклики змушують людство до пошуку та впровадження альтернативних джерел енергії. Світовою спільнотою заявлений шлях відмови від викопного палива та переходу до відновлювальних джерел енергії. Так, в 2023 році на кліматичній конференції ООН (COP 28) та саміті G20 в Нью-Делі країни зобов'язалися втричі збільшити потужності відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) до 2030 року з метою обмежити зростання середньої температури до 1,5 °C відносно доіндустріального рівня [1, 2]. Інвестиції у відновлювальну енергетику підтверджують ці наміри, хоч і спостерігається регіональна диспропорція у фінансуванні. Так, протягом 2023 року світові інвестиції у впровадження нових потужностей ВДЕ досягли 570 млрд доларів США, що перевищує показник 2022 р. на 27%, з найбільшими осередками фінансування в Китаї, США, Бразилії та Індії [1].

Одним із ключових напрямів переходу від традиційних до ВДЕ є сонячна енергетика, яка є найбільш динамічно зростаючою галуззю відновлювальної енергетики в світі. У 2023 році частка встановлених нових потужностей склала 77% від загального встановленого обсягу ВДЕ. В той же час, частка виробленої фотоелектричними панелями (ФЕП) електроенергії склала 5,4% від глобальної генерації електроенергії [3].

Виробництво фотоелектричних модулів у 2023 році досягло рекордних 612 ГВт, що на 38% більше, ніж у 2022 році, і на цілих 60% більше, ніж у 2021 році (рис. 1) [4].

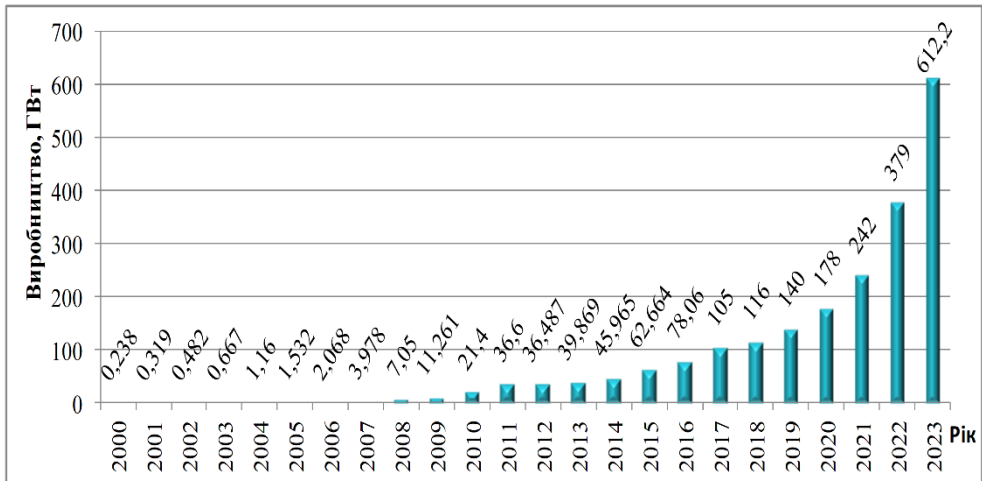


Рис. 1. Динаміка зростання виробництва фотоелектричних панелей у світі за 2000-2023 роки [4]

Провідне місце в розвитку глобальної сонячної енергетики займає Китай, утримуючи лідируючі позиції як з виробництва, так і зі встановлення фотоелектричних модулів. У 2023 році його частка складала 84,6% від світового виробництва модулів [5], а загальна встановлена потужність ФЕП досягла 649 ГВт [6]. Відповідно до оновлених даних Міжнародного енергетичного агентства (International Energy Agency, IEA), у 2024 році сукупна потужність всіх ФЕП у Китаї перевищила позначку в 1 ТВт ($\approx 1048,5$ ГВт), що становить 46,7% від загальної встановленої потужності ФЕП у світі [7].

Такий результат став можливим завдяки масштабній державній підтримці та стимулюванню розвитку відновлювальної енергетики, розвитку та вдосконаленню виробничої інфраструктури і доступу до запасів сировинних ресурсів. Для порівняння зауважимо, що друге місце за виробництвом модулів у 2023 році належало В'єтнаму з часткою лише в 3,4% [5]. Отже, Китай має беззаперечне домінування у глобальному впровадженні сонячної енергетики, що, в свою чергу, обумовлює значний вплив Китаю на виробничий та екологічний напрями розвитку даної галузі в цілому.

За даними IEA [7], у 2024 році в світі було змонтовано 602 ГВт потужностей сонячних електростанцій, досягнувши сумарної встановленої потужності ФЕП в 2,3 ТВт (рис. 2). Частка Китаю складала 59% від нових встановлених генерацій.



Рис. 2. Динаміка зростання сумарної потужності фотоелектричних панелей у світі за 2010-2024 роки (побудовано на основі даних [7])

Проте така тенденція динамічного розвитку сонячної енергетики має зворотну сторону – це утворення відходів ФЕП та закономірне зростання обсягів їх накопичення. ФЕП класифікуються як відходи електричного та електронного обладнання (ВЕЕО). ВЕЕО вже стали глобальною проблемою, так як є найбільш зростаючою категорією відходів у світі. За даними звіту Global E-waste Monitor 2024 [8], у 2022 році було утворено приблизно 62 млн т таких відходів, і лише 22% задокументовані як такі, що офіційно перероблені. Станом на 2022 р., частка відходів ФЕП складає 0,6 млн т від загальної маси відходів. В середньому, термін експлуатації ФЕП становить 25-30 років, після чого їх використання вважається економічно недоцільним. Втрата ефективності панелей через деградацію матеріалів та механічні пошкодження пришвидшує їх вихід з експлуатації. Тож в 2030-х роках очікується різке

зростання відходів ФЕП, які наближаються до завершення свого терміну експлуатації. За прогнозами [8], в 2030 році утвориться близько 2,4 млн т відходів ФЕП, і це значення буде постійно зростати відповідно до встановлених установок генерації. Виходячи з обсягів попередніх установок та темпів розвитку сонячної енергетики, відходи ФЕП з часом стануть однією з найбільших складових потоку ВЕЕО.

Невідповідне управління відходами ФЕП створює потенційні екологічні ризики, в тому числі через вміст небезпечних речовин і, відповідно, прогнозований обсяг даних відходів. Проте ефективне управління цими потоками через переробку відходів та відновлення компонентів дозволяє як зменшити негативний вплив на довкілля, так і використовувати повторно цінні матеріали. Актуальність представленого дослідження обумовлена необхідністю у своєчасній підготовці до майбутнього зростання обсягів відходів ФЕП з метою запобігання появи і посиленню еколого-економічних наслідків впровадження сонячної енергетики. Управління ВЕЕО в розрізі проблеми зростання відпрацьованих ФЕП полягає у формуванні глобальної інфраструктури для збору, переробки та повторного використання вилучених компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика управління відходами ФЕП протягом останнього десятиліття привертає все більше уваги міжнародних організацій та представників наукової спільноти. Так, у 2016 році Міжнародне агентство з відновлювальної енергетики (International Renewable Energy Agency, IRENA) в співпраці з програмою IEA-PVPS представили світу прогноз щодо обсягів утворення відходів ФЕП, попереджаючи про поступове, але невідворотне утворення та накопичення десятків мільйонів тонн панелей, які вийдуть з ладу до середини цього століття [9]. Деякі аналітики прогнозують, що в разі впровадження сценарію розвитку сонячної енергетики в рамках інтенсивного розвитку ВДЕ обсяг відходів ФЕП може зрости понад 200 млн т [10], тоді як у 2022 році фактично утворено 0,6 млн т відходів ФЕП [8]. В аналітичних звітах IRENA зазначається, що, відповідно до «сценарію 1,5 °C», до 2050 року сукупна потужність встановлених ФЕП може досягти десятків терават. Тому наголошується, що за відсутності своєчасного запровадження належних комплексних заходів з утилізації відпрацьованих ФЕП даний тип відходів перетвориться на один із найвагоміших типів енергетичних відходів вже в найближчі десятиліття. Це також вплине на загальне утворення ВЕЕО [10].

Паралельно з прогнозуванням утворення обсягів відходів ФЕП, все більше уваги приділяється питанню необхідності їх переробки. Розглядаються можливості вилучення і повернення у виробничий цикл матеріалів та зменшення негативного впливу на довкілля. Так, Mirletz та ін. [11] зазначають, що оптимізація переробки і створення ефективних систем, які полягають у повторному використанні матеріалів, вилучених з відходів ФЕП, є однією з основних стратегій в напрямі досягнення стійкості в розвитку сонячної енергетики на рівні тераватного масштабу генерації енергії. Також акцентується увага на тому, що якщо не створити системну галузь переробки та не забезпечити зниження втрати ресурсів в процесі переробки відходів, то зростання сонячної енергетики неминуче супроводжуватиметься значними екологічними ризиками, а це прямо суперечить кінцевій цілі розвитку й впровадження даної технології – зменшення негативного впливу на довкілля.

Аналіз результатів останніх досліджень вказує на актуальність вищезначених проблем в сонячній енергетиці. Прогнозовані обсяги утворення відходів ФЕР в контексті їх хіміко-морфологічного складу, наявності цінних та небезпечних компонентів, що є притаманним для категорії ВЕЕО, обумовлюють необхідність системних та сталих рішень в контексті життєвого циклу продукту. З цього виникає необхідність в подальших дослідженнях сировинного потенціалу відпрацьованих ФЕР та відповідних екологічних ризиків.

Методологія дослідження полягає в аналітичному огляді сучасних статистичних звітів, прогнозних матеріалів міжнародних організацій (IRENA, IEA і ін.) та наукових публікацій. Застосовано методи систематизації та порівняльного аналізу: узагальнено дані щодо динаміки встановлення потужностей сонячної енергетики, матеріального складу ФЕР та нормативних практик в різних країнах.

Для кількісного оцінювання масштабів проблеми використані актуальні статистичні дані щодо виробництва та встановлення ФЕР і сценарії прогнозів утворення відходів ФЕР до 2050 року.

Метою дослідження є оцінка та прогнозування утворення відходів ФЕР як складової частини ВЕЕО, визначення основних проблем та ризиків, пов'язаних з накопиченням даних відходів у довкіллі. Об'єкт дослідження – ФЕР як частина ВЕЕО. Предмет дослідження – процеси утворення відходів ФЕР.

Результати дослідження

Конструкція та матеріальний склад ФЕР. Основна маса сучасних ФЕР ($\approx 98\%$) представляють собою кремнієві кристалічні панелі монокристалічного типу, решта – тонкоплівкові панелі [3]. Проте ще десятиліття тому частки монокристалічних і полікристалічних панелей від загальної кількості кристалічних панелей складала 45% і 55% відповідно [9].

Типова кремнієва панель конструкційно є багатокомпонентною структурою, шари якої міцно спаяні та спресовані в так званий «сендвіч», який складається з таких матеріалів (у % від загальної маси): 76% – скло, яке захищає лицьову частину; 10% – полімерні компоненти (переважно етиленвінілацетат та поліетилентерефталат), які використовуються для ламінування та ізоляції фотоелементів; 8% – алюмінієва рама, що забезпечує механічну жорсткість; 5% – кремнієві фотоелементи; 1% – мідні провідники; $< 0,1\%$ припадає на контактні лінії зі срібла (Ag) та припій, що містить олово (Sn) та свинець (Pb) [9]. Таким чином, основними компонентами ФЕР є скло, а також полімери та алюміній, які вважаються нетоксичними. Проте є мала частка матеріалів, таких як свинець та олово, які відносяться до важких металів і є токсичними для живих організмів. Срібло, до того ж, є дорогоцінним металом.

На основі даних про склад ФЕР представимо об'ємну структуру модуля (рис. 3).

Тонкоплівкові ФЕР, на які припадає близько 2% ринку, відрізняються від кристалічного типу панелей більш простою та тоншою конструкцією. Даний тип являє собою тонкий шар фотоелектричного матеріалу у вигляді аморфного кремнію, телурид кадмію (CdTe) та мідь-індій-галій-селенід (CIGS), які нанесені на підкладку – скло, метал чи полімер. Так, наприклад, CdTe панелі

складаються приблизно на 96% зі скла, 3% полімерів (етиленвінілацетат і поліамід), до 1% з напівпровідникового матеріалу (кадмій, телур) та провідників, що містять такі метали, як мідь, свинець, цинк, олово. CIGS панелі складаються на 88-89% зі скла, 7% алюмінію, 4% полімерів (етиленвінілацетат, поліетилентерефталат, силікон) і менш ніж 1% припадає на напівпровідниковий шар (індій, галій, селен, мідь) [9].

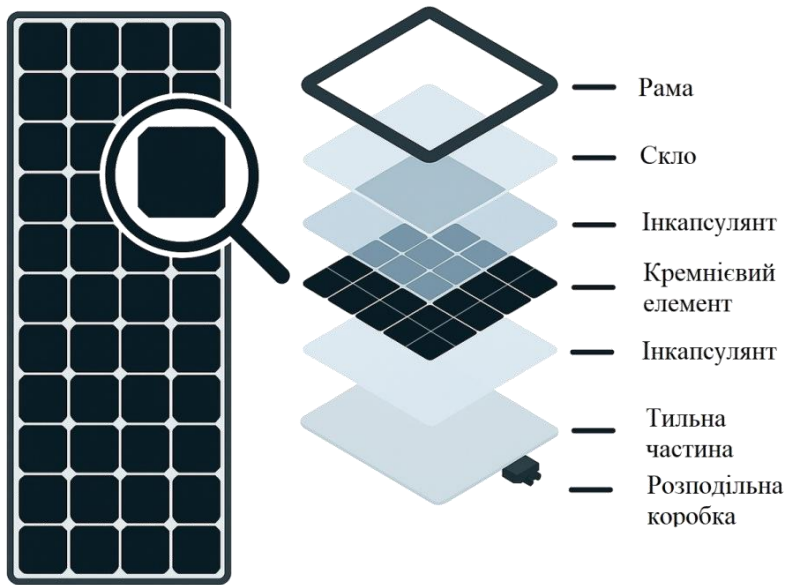


Рис. 3. Схематична структура типової фотоелектричної панелі

Як було зазначено вище, ФЕП є багатокомпонентною структурою, а це ускладнює демонтаж та вилучення матеріалів з відпрацьованих панелей. Приблизно 90% їх маси – це некритичні матеріали, тоді як цінні та потенційно небезпечні компоненти хоча й присутні в малій частці, проте нерозривно інтегровані в саму структуру панелі. Ця особливість панелей обумовлює економічну модель утилізації (низька концентрація цінних металів впливає на рентабельність переробки) та екологічні ризики, які пов'язані з наявністю в складі небезпечних, токсичних навіть у малих кількостях металів, що вимагає розробки спеціалізованих моделей управління даними відходами.

Середній термін експлуатації кремнієвих ФЕП становить орієнтовно 25-30 років, що відповідає гарантійному періоду від виробника, протягом якого зберігається ефективність панелей в межах 70-80% від початкового стану. Деградація фотоелементів є повільним процесом і, в середньому, складає 0,5-0,8% на рік [12, 13]. Попри те, що фактичний термін експлуатації ФЕП може перевищувати 30 років, після цього строку значна частка модулів потребує заміни внаслідок поступового зниження продуктивності, фізичного пошкодження чи морального старіння. Існуюча тенденція до підвищення вихідної потужності модулів сприяє як зростанню їх генеруючого потенціалу, так і ускладнює процеси демонтажу.

Сучасні тенденції у виробництві включають не лише вдосконалення кремнієвих ФЕП, а й розроблення нових типів модулів, в тому числі

перовскітних, які відзначаються нижчою собівартістю, високою ефективністю та гнучкістю, проте наразі є проблеми зі стабільністю, що призводить до передчасного виведення з ладу, та наявністю в складі токсичних сполук свинцю, що ускладнює їх утилізацію. Дослідження свідчать, що наявний у складі таких панелей свинець може легко проникати до ґрунту та рослин, а це створює ризик для довкілля та здоров'я людини. Тому наразі активно досліджуються можливості зменшення такого ризику шляхом зниження передчасної деградації структури таких панелей та ефективних методів їхньої утилізації [14]. Зазначимо, що на сьогодні основна частина ФЕП на ринку не пристосована до легкого розбирання на складові компоненти, а це вимагає розвитку та впровадження відповідних технологій утилізації та знешкодження небезпечних складових.

Аналіз основних факторів утворення відходів ФЕП. У найближчі десятиліття основним джерелом формування відходів ФЕП буде планове виведення з експлуатації великої кількості панелей, що були встановлені на початку та в середині 2000-х років. Після закінчення ≈ 25 -річного періоду експлуатації, ці панелі підлягають заміні, а їх виведення з експлуатації, в свою чергу, призведе до утворення значного потоку відповідних відходів. Очікується, що перші значні об'єми таких відходів від сонячних електростанцій припадуть на 2030-ті роки. Так, за даними Global E-waste Monitor 2024 [8] в 2030 році прогнозується утворення 2,4 млн т, тоді як у 2022 році було утворено 0,6 млн т. Окрім природного старіння, до утворення відходів панелей призводить передчасний вихід з ладу ще до завершення терміну експлуатації. Модулі можуть виходити з ладу через виробничі дефекти і деградацію захисного шару через дію ультрафіолету та вплив підвищеної температури, тобто перегрів самого модуля. До того ж, важливим фактором передчасного виходу з ладу панелей є екстремальні погодні умови. Стихійні явища, як-то град крупного розміру та шквальні пориви вітру (ураган), здатні в короткі строки пошкодити чи призвести до повної руйнації панелей, виводячи з ладу всю генеруючу потужність установок, незалежно від їх технічного стану. Так, у контексті збільшення частоти та інтенсивності екстремальних погодних подій, які обумовлені кліматичними змінами, ймовірність передчасного вибуття з експлуатації ФЕП внаслідок дії природних чинників зростає, що, в свою чергу, також потребує врахування при розробці стратегії управління даними відходами [15, 16].

Додатковим фактором утворення відходів ФЕП є дострокова модернізація сонячних електростанцій. Зростання ефективності та зниження вартості панелей створює економічні стимули для оновлення вже встановлених модулів ще задовго до закінчення їх виробничого ресурсу. При появі на ринку нових панелей з вищою потужністю, заміна старих може бути економічно доцільною. Це особливо актуально за умов постійного зниження вартості панелей. Так, ще в першому прогнозі IRENA [11] за сценарієм «дострокового вибуття» (early-loss scenario), обсяги відходів ФЕП при масовій модернізації сонячних станцій можуть зрости до 78 млн т до 2050 року, що на 30% перевищує обсяги відходів, що утворюються за базового сценарію – 60 млн т. Тож, дострокова заміна панелей, що не використали свого ресурсу, як підвищує ефективність роботи сонячних електростанцій, так і призводить до додаткового утворення відходів ФЕП.

Ризики для довкілля. Зростання обсягів утворення відпрацьованих ФЕП збільшує актуальність проблеми управління відходами як конкретно ФЕП, так і ВЕЕО в цілому. За відсутності системи управління, яка включає інфраструктуру для переробки та нейтралізації небезпечних властивостей таких відходів, їх утворення призводить до ряду екологічних ризиків.

Відпрацьовані ФЕП можуть класифікуватися як небезпечні відходи чи як ВЕЕО, залежно від законодавства країни, в якій вони утворилися. Так, відповідно до Директиви 2012/19/ЄС [17], ФЕП відноситься до 4 категорії електричного та електронного обладнання «Велике обладнання».

Через відсутність системи управління ВЕЕО, відпрацьовані ФЕП можуть надходити на полігони та нелегальні звалища разом з іншими відходами, що призводить до забруднення довкілля небезпечними речовинами. Основним компонентом ФЕП є скло, яке є нейтральним, аморфним матеріалом, що не піддається природному розпаду. Проте, до складу ФЕП входять й такі небезпечні сполуки, як свинець, що присутній у припоях разом з оловом, чи кадмій з телуrom. При цілісній структурі панелі важкі метали не виділяються у довкілля через наявність шару інкапсулянту, який запобігає цьому [18], однак при порушенні цілісності панелей, наприклад, на звалищах, важкі метали можуть вилугувуватися, що створює ризик забруднення ґрунтів та ґрунтових вод. В результаті виникає загроза для живих організмів, в тому числі й для людини, в організм якої важкі метали надходять через трофічні ланцюги. Так, свинець, який є високотоксичним металом, призводить до порушення роботи центральної нервової, кровотворної та серцево-судинної систем. У випадку дітей навіть малі концентрації призводять до порушення когнітивних функцій та зниження інтелектуальних здібностей [19].

Окрім наявності небезпечних компонентів, відходи ФЕП є також джерелом вторинної сировини, яка може бути втрачена в результаті захоронення на полігонах та звалищах, замість відповідної переробки та залучення у виробничі цикли. До складу панелей входить високоякісне скло, алюміній, кремній, мідь, срібло, свинець, олово – це матеріали, які мають потенціал для повторного використання як для виробництва нових ФЕП, так і інших продуктів [9]. Середня маса однієї кремнієвої ФЕП становить приблизно 20 кг [20] і, враховуючи відсоткове співвідношення вмісту матеріалів, виходить, що близько 15,2 кг припадає на скло, 2 кг на полімери (в основному етиленвінілацетат та поліетилентерефталат), 1,6 кг алюмінію, 1 кг кремнію, 0,2 кг міді та 0,002 кг срібла та олова зі свинцем. Такі показники дозволяють не лише оцінити реальний ресурсний потенціал однієї ФЕП, але й екстраполювати це на глобальному рівні (табл. 1).

Зважаючи на це, навіть при відносно невеликій масі окремо взятих компонентів, загальний обсяг утворених відходів ФЕП на рівні сучасного використання панелей створює величезні матеріальні потоки цінних вторинних ресурсів. Також зазначимо, що відсутність переробної інфраструктури призведе до масового захоронення відпрацьованих ФЕП чи їх частин після кустарної переробки, що, враховуючи їхню об'ємність, вимагатиме значних площ на звалищах.

Таблиця 1. Орієнтовна маса компонентів типової кремнієвої фотоелектричної панелі [9]

Компонент	Маса в одній панелі, кг	Маса в 1 тонні панелей, кг
Скло	15,2	760
Полімери (EVA, PET)	2	100
Алюміній	1,6	80
Кремній (фотоелементи)	1	50
Мідь	0,2	10
Срібло та олово, свинець	0,02	1
Всього	20	≈1000

Так, за прогнозами IRENA відповідно до «сценарію 1,5 °C», до 2050 року з відходів ФЕП у результаті переробки можна отримати більше 17,7 млн т вторинної сировини, що еквівалентно 8,8 млрд доларів США [10].

Таким чином, відсутність ефективних механізмів управління відходами ФЕП, як і в цілому ВЕЕО, супроводжується рядом екологічних загроз, серед яких – ймовірність емісії в довкілля небезпечних компонентів, втрата ресурсного потенціалу і залучення територій для захоронення. Сукупність даних факторів свідчить про необхідність впровадження належних підходів до демонтажу та переробки ФЕП.

Фотоелектричні панелі в контексті відходів електричного та електронного обладнання. В цілому, ВЕЕО оцінюються як найбільш динамічно зростаюча категорія відходів у світі. Дані Global E-waste Monitor 2024 [8] свідчать, що у 2022 році обсяг утворених відходів досягнув рівня 62 млн т, що на 83% більше, ніж у 2010 році, коли було утворено 33,8 млн т ВЕЕО. За період 2010-2022 рр. щорічне зростання маси ВЕЕО склало, в середньому, 2,4 млн т [21]. Зростання обсягу утворення даних відходів продовжиться і надалі. Так, відповідно до прогнозів [8, 22, 23], маса ВЕЕО до 2030 року збільшиться до 82 млн т на рік, у 2040 році перевищить 100 млн т, а до 2050 року зросте до 110-120 млн т на рік (рис. 4), що свідчить про експоненціальний характер зростання щорічного утворення ВЕЕО.

Утворення самих відходів ФЕП на сьогодні відбувається дещо повільно відносно ВЕЕО загалом, так як масове встановлення ФЕП почалося досить недавно, а стандартний термін експлуатації панелей складає 25-30 років.

ФЕП, як один із типів ВЕЕО, характеризуються рядом спільних ознак з «класичними» ВЕЕО, в той же час мають конструктивні та функціональні відмінності, що впливає на підходи до їх управління. Спільним є наявність у складі небезпечних, але й водночас ресурсноцінних компонентів, таких як свинець, олово, кадмій, срібло, алюміній, мідь, які доцільно повертати у виробничі цикли. Як і більшість видів побутової електроніки, ФЕП переходять до категорії відходів після закінчення свого терміну експлуатації і вимагають відповідного збору та переробки.

Проблема низького рівня переробки характерна для всіх видів ВЕЕО. Так, за даними [8], в 2022 році з 62 млн т утворених ВЕЕО лише 22,3% було зібрано та перероблено відповідно до встановлених стандартів. Частка ФЕП склала 0,6 млн т від загальної утвореної маси ВЕЕО, з них зібрано та перероблено близько 0,1 млн кг або 17%. Це свідчить, що відходи ФЕП недостатньо охоплені системою управління ВЕЕО.

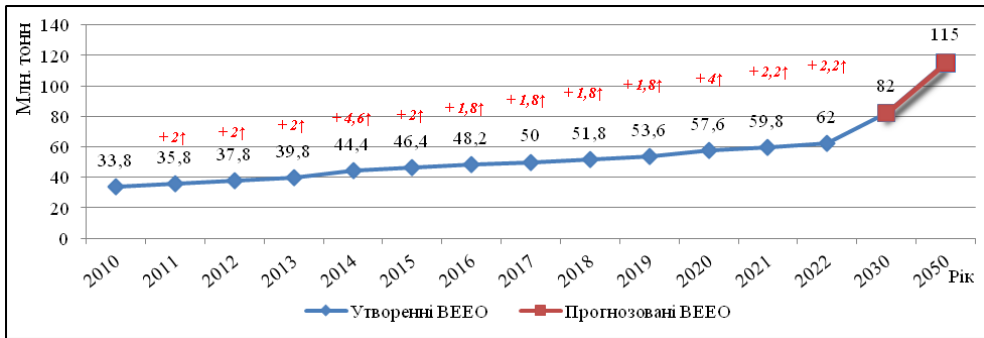


Рис. 4. Динаміка утворення та прогнозування обсягів утворення ВЕЕО за період 2010-2050 роки [21]

Відмінні риси ФЕП від більшості ВЕЕО обумовлені, в першу чергу, їх конструкційними особливостями і матеріальним складом. На відміну від такого обладнання, як смартфони, офісна та побутова техніка, які є своєрідною візитною карткою ВЕЕО і є більш компактними у своїй структурі, містять багато компонентів, як-то друковані плати, дисплей, корпус, провідники і т.д., ФЕП – це великогабаритна конструкція, в складі якої переважає обмежена кількість матеріалів (скло, пластик та алюміній). Це є сприятливим фактором для запровадження технологій з утилізації відходів ФЕП. Так, скло можна переробляти традиційними технологіями, алюмінієві рами переплавляти. Вся складність полягає в розділенні на складові частини та вилученні дрібних, рівномірно розподілених по площі цінних та токсичних металів (срібло, свинець, олово), що є типовим для ВЕЕО. Ключовою особливістю ФЕП є відсутність розбірної конструкції. Навпаки, ФЕП представляють собою герметичні, ламіновані модулі, виготовлені без урахування принципів екодизайну. Шари скла, полімерів та напівпровідникових елементів (рис. 3) склеєні між собою при температурі 150-200 °C [24] та за високого тиску з утворенням цілісної структури, що унеможливорює розділення без температурного, хімічного або механічного впливу. Така особливість ФЕП відрізняє від звичайних ВЕЕО, де конструкція в тій чи іншій мірі передбачає можливість повного чи часткового розбирання на складові, що дозволяє відремонтувати чи замінити зламану деталь, тим самим продовжити термін експлуатації обладнання і, як наслідок, сприяти збереженню ресурсів та зменшенню негативного впливу на довкілля відповідно до концепції циркулярної економіки (3.0) [25].

Порівняльний аналіз вторинної сировини з ФЕП та інших ВЕЕО показав, що середня матеріальна цінність однієї тонни відходів ФЕП значно нижча, ніж аналогічна маса друкованих плат чи мобільних телефонів, до складу яких входять різноманітні сполуки та метали, в тому числі дорогоцінні, концентрація та різноманітність яких значно вища. Приміром, у відпрацьованих комп'ютерах та смартфонах середня частка золота складає близько 280 г/т, яке, в основному, зосереджене в платах [22]. У кристалічних ФЕП з дорогоцінних металів є лише срібло, вміст якого менше 0,1%.

Як наслідок, такий морфологічний склад і конструкційна будова ФЕП обумовлюють низьку економічну доцільність переробки, отже, виникає необхідність у впровадженні нормативних і фінансових механізмів

стимулювання утилізації відпрацьованих панелей. На практиці переробка часто зводиться до вилучення алюмінієвої рами для переплавки, подрібнення скла з вилученням якоїсь частки вторинної сировини, а решта відправляється на звалище. Формально, через переважання скла та алюмінію в конструкції, частка вилученої сировини від загальної маси досягає високого значення. До того ж, зменшення вмісту срібла в складі ФЕП знижує економічну вигоду від переробки ФЕП.

Аналіз результатів прогнозування утворення ФЕП. Згідно з першим прогнозом IRENA та IEA-PVPS [9], що був зроблений ще в 2016 році, очікувалося, що за звичайного сценарію, в 2030 році сумарні обсяги відходів ФЕП досягнуть 1,7 млн т та 60 млн т у 2050 році. За даними Глобального моніторингу електронних відходів [8], прогнозується утворення ФЕП на рівні 2,4 млн т.

За сценарію дострокового вибуття, тобто при виході з ладу частини панелей ще до закінчення 30-річного терміну експлуатації, у 2030 році сумарні обсяги відходів ФЕП досягнуть 8 млн т та 78 млн т у 2050 році. Змодельовані щорічні обсяги утворення відходів ФЕП після закінчення терміну експлуатації показують зростаючу тенденцію. Так, наведені дані щодо прогнозування обсягів утворених у 2030 році відходів ФЕП на рівні 0,36 млн т за звичайного сценарію та 1,26 млн т за сценарію дострокового вибуття при встановленні нових 9 млн т ФЕП. У 2040 році такий обсяг становитиме від 2,5 до 3,5 млн т відповідно до звичайного сценарію та передчасного вибуття при встановленні нових 6,5 млн т ФЕП (рис. 5). До 2050 року ситуація набуде ще більш складного характеру. Прогнозується утворення від 5,5 до 6 млн т відходів ФЕП, в залежності від сценарію, при щорічній встановленій масі нових ФЕП у 7 млн т. Таким чином, обсяги утворених відходів складатимуть 80-89% від маси нових встановлених ФЕП. Тобто річний обсяг утворених відходів ФЕП наближається до обсягу встановлених ФЕП.

Прогнозна модель IRENA та IEA-PVPS [9] з сумарним обсягом відходів ФЕП 60-78 млн т у 2050 році розраховувалася на оцінках сумарної встановленої потужності фотоелектричних панелей, яка очікувалася на рівні приблизно 4,5 ТВт у 2050 році. Проте реальний розвиток сонячної енергетики значно випереджає попередні прогнози. Так, у 2024 році сумарна встановлена потужність ФЕП уже досягла 2,3 ТВт [7], а до 2050 року цей показник буде значно більше 4,5 ТВт, відповідно до прогнозу [26] близько 8,5 ТВт. В 2022 році IRENA представила новий прогноз сумарних відходів ФЕП до 2050 року за «сценарієм 1,5 °C» [10], відповідно до якого сумарні обсяги відходів ФЕП у 2030 році складуть близько 4 млн т, а в 2050 році перевищать 200 млн т (рис. 5). Оновлений прогноз свідчить, що очікувальні обсяги відходів ФЕП збільшаться більше ніж у тричі, порівняно з прогнозом 2016 року. Враховуючи, що сучасний розвиток сонячної енергетики значно перевищує попередні прогнози [9] у 4,5 ТВт у 2050 році, прогнозована маса сукупних відходів ФЕП у понад 200 млн т (рис. 5) виглядає більш реалістичною.

Отримані результати дають змогу краще зрозуміти роль ФЕП у формуванні БВЕО. Аналіз показує, що наразі частка відходів ФЕП у БВЕО невелика, однак можна стверджувати, що в майбутньому ситуація значно зміниться. Про це свідчить переорієнтація енергетичного сектору від традиційної енергетики на ВДЕ, зокрема, на сонячну енергетику, що підтверджується постійним ростом інвестицій як в дослідження, так і впровадження сонячної енергетики.

Прогнози IRENA та IEA-PVPS [9] про те, що до 2030 року сукупний обсяг відходів ФЕП досягне 8 млн т і до 200 млн т у 2050 році, тільки підтверджують це. Таким чином, частка ФЕП у складі ВЕЕО дуже швидко збільшиться, перетворившись з незначної на одну з основних складових частин ВЕЕО.

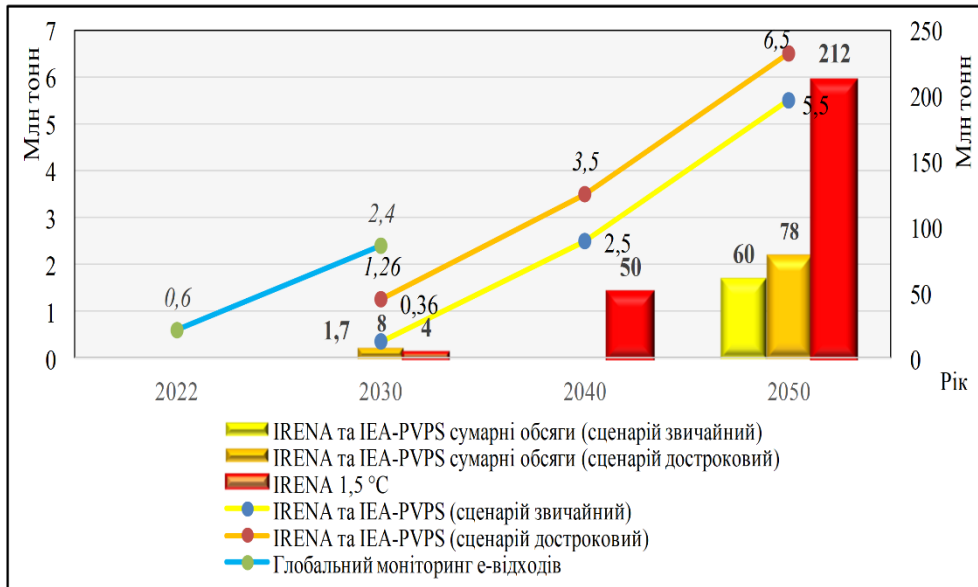


Рис. 5. Прогнозування обсягів утворення відходів ФЕП до 2050 року за різними моделями [8, 9, 10]

Підходи до управління відходами ФЕП знаходяться на стадії розробки. Ще у 2012 році Європейський Союз, відповідно до Директиви 2012/19/ЄС [17], запровадив принцип розширеної відповідальності виробника (РВВ), який зобов'язує виробників та імпортерів ФЕП фінансувати збір та переробку відпрацьованих ФЕП у Європейському Союзі. Проте, через тривалий життєвий цикл ФЕП, незначні обсяги утворення відходів ФЕП та оцінювання їх утворення сукупно для всієї категорії «Велике обладнання» ВЕЕО, відсутня статистична інформація з оцінки ефективності запровадження РВВ [27].

Однак у більшості країн ФЕП не відносяться до категорії ВЕЕО. Так, наприклад, в деяких штатах США ФЕП класифіковані як «універсальні відходи» з метою спрощення методів регулювання. Також відпрацьовані ФЕП можуть підпадати під категорію «небезпечні відходи» через наявність в складі свинцю та кадмію, але все залежить від концентрації [28].

Отже, перепонами до запровадження ефективної системи управління відходами ФЕП в контексті циркулярної економіки виступає ряд чинників, серед яких найбільш вагомими є економічні. Переробка панелей потребує витрат, які часто не окуповуються через складність структури і низький вміст цінних компонентів. Не налагоджений централізований збір відпрацьованих панелей. Також важливу роль відіграють обсяги утворення відходів, які лише набирають обертів. Однак наявна інфраструктура без відповідного розвитку буде не спроможна до належного управління майбутніми обсягами відходів ФЕП, які будуть стрімко зростати.

Узагальнимо, що удосконалення управління відходами ФЕР включає наступні пункти: запровадження екологічного дизайну – проектування панелей з урахуванням можливості переробки, за рахунок зменшення/використання безпечних компонентів та спрощення конструкції; стандартизація демонтажу та переробки панелей; розробка та впровадження регуляторної системи щодо управління відходами ФЕР.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Результати проведених досліджень обсягів утворення відходів ФЕР показали, що наразі абсолютні та відносні обсяги таких відходів у складі групи БЕР незначні. Проте з 2030 року прогнозується стрімке зростання: з 0,6 млн т у 2022 році до 5,5-6,5 млн т у 2050 році. Очікується накопичення відходів ФЕР на рівні 212 млн т у 2050 році. Факторами, які обумовлюють таку ситуацію, є розвиток ВДЕ і сонячної енергетики зокрема, завершення планового строку експлуатації першого масового запуску панелей у 2000-х роках, акцент на економічну ефективність панелей тощо.

Відходи ФЕР становлять значні екологічні ризики для довкілля через наявність токсичних компонентів та низький рівень утилізації панелей (17%). Останній фактор обумовлений складністю багатокomпонентної конструкції панелей, що ускладнює процес декомпозиції та підвищує вартість отриманої вторинної сировини. Цінні компоненти з відходів ФЕР мають чи не найнижчу собівартість серед інших БЕР. Через відсутність належної системи управління БЕР та прозорих механізмів запровадження РВВ, основна частина відходів ФЕР не переробляється, а відправляється на складування чи захоронення на звалищах. Без запровадження ефективної системи управління такими відходами очікується посилення негативних ефектів для довкілля через загрозу значних обсягів утворення таких відходів в найближчі роки.

Виходячи з цього, постає питання в необхідності впровадження системного та еколого-економічного підходу до управління відходами ФЕР. Якщо заходи з впровадження будуть відкладатися, то в наступні десятиліття відновлювальна енергетика спричинить парадокс – технологія, що впроваджувалася для зменшення негативного впливу на довкілля, стане джерелом забруднення довкілля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. IRENA. (2024). World energy transitions outlook 2024: 1.5°C pathway. International Renewable Energy Agency. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2024.pdf
2. REN21. (2024). Renewables 2024 global status report collection: Global overview. REN21 Secretariat. URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf
3. de l'Epine, M., & Kaizuka, I. (2024). Trends in Photovoltaic Applications 2024. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. <https://doi.org/10.69766/jnew6916>
4. Annual solar module production worldwide 2023| Statista. (2024). Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/668764/annual-solar-module-manufacturing-globally/>
5. Regional distribution of solar module production | Statista. (2024). Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/668749/regional-distribution-of-solar-pv-module-manufacturing/>

6. Existing capacity of solar PV worldwide by select country 2023| Statista. (2025). Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/264629/existing-solar-pv-capacity-worldwide/>
7. Masson, G., Van Rechem, A., de l'Epine, M., & Jäger-Waldau, A. (2025). Snapshot of Global PV Markets 2025. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. <https://doi.org/10.69766/pbhv9141>
8. Baldé, C., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., Angelo, E., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., & Khatriwal, D. (2024). The global e-waste monitor 2024. URL: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/03/GEM_2024_18-03_web_page_per_page_web.pdf
9. Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. A. (2016). End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). <https://doi.org/10.2172/1561525>
10. IRENA. (2022). World energy transitions outlook 2022: 1.5°C pathway. International Renewable Energy Agency. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf
11. Mirletz, H., Ovaith, S., Sridhar, S., & Barnes, T. M. (2024). Prioritizing circular economy strategies for sustainable PV deployment at the TW scale. EPJ Photovoltaics, 15, 18. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2024015>
12. Solar Energy Technologies Office Photovoltaics End-of-Life Action Plan. (2022). Office of Scientific and Technical Information (OSTI). URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-03/Solar-Energy-Technologies-Office-PV-End-of-Life-Action-Plan.pdf>
13. Deline, C., Jordan, D., Sekulic, B., Parker, J., Mcdanold, B., & Anderberg, A. (2022). PV Lifetime Project - 2021 NREL Annual Report. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81172.pdf>
14. Suo, J., Pettersson, H., & Yang, B. (2025). Sustainable Approaches to Address Lead Toxicity in Halide Perovskite Solar Cells: A Review of Lead Encapsulation and Recycling Solutions. EcoMat, 7(1). <https://doi.org/10.1002/eom2.12511>
15. Jordan, D. C., Perry, K., White, R., & Deline, C. (2023). Extreme Weather and PV Performance. IEEE Journal of Photovoltaics, 1–6. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2023.3304357>
16. Ali, H. B., Kamran, M. A., Gul, R. M., Yasir, M., Alabdullah, F. T., Usman, C., & Tariq, A. (2024). Mechanical integrity of photovoltaic panels under hailstorms: Mono vs. poly-crystalline comparison. Heliyon, 10(4), e25865. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25865>
17. European Parliament & Council of the European Union. (2012). Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). EUR-Lex. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32012L0019>
18. Solar Panel Frequent Questions | US EPA. (2024). US EPA. URL: <https://www.epa.gov/hw/solar-panel-frequent-questions>
19. Kim, H.-C., Jang, T.-W., Chae, H.-J., Choi, W.-J., Ha, M.-N., Ye, B.-J., Kim, B.-G., Jeon, M.-J., Kim, S.-Y., & Hong, Y.-S. (2015). Evaluation and management of lead exposure. Annals of Occupational and Environmental Medicine, 27(1). <https://doi.org/10.1186/s40557-015-0085-9>
20. AL-Zoubi, O. H., Shawaqfah, M., Almomani, F., Damash, R. A., & Al-Zboon, K. (2022). Photovoltaic Solar Cells and Panels Waste in Jordan: Figures, Facts, and Concerns. Sustainability, 14(20), 13313. <https://doi.org/10.3390/su142013313>
21. Buchka, A. (2024). Classification of waste electrical and electronic equipment by ecological hazard. [Бучка, А. (2024). Класифікація відходів електричного та електронного обладнання за ознакою екологічної небезпеки]. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 337(3(2)), 265–272. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-40> (in Ukrainian).

22. Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam. URL: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf.
23. Coalition, E. W. (2019). A new circular vision for electronics: time for a global reboot. World Economic Forum. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf
24. Oliveira, M. C. C. d., Diniz Cardoso, A. S. A., Viana, M. M., & Lins, V. d. F. C. (2018). The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 2299–2317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.039>.
25. 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 the 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>.
26. Asmelash, E., & Prakash, G. (2019). Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 1-73. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf
27. New weee forum paper: Issues with PV panels & compliance with EPR legislation. WEEE Forum. (2021). URL: https://weee-forum.org/ws_news/weee-forum-releases-pv-paper/
28. End-of-Life Solar Panels: Regulations and Management | US EPA. (2025). US EPA. URL: <https://www.epa.gov/hw/end-life-solar-panels-regulations-and-management#:~:text=Some%20states%20have%20enacted%20laws,,impacting%20solar%20panel%20waste,%20including>

Стаття надійшла до редакції 05.12.25, надійшла після рецензування 27.01.26, прийнята 03.03.26

The article was received 05.12.25, received after revision 27.01.26, accepted 03.03.26

Бучка Андрій Володимирович

аспірант кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

Адреса робоча: вул. Львівська, 15, 65016 м. Одеса, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1447-9027> **e-mail:** andriibuchka@gmail.com

Приходько Вероніка Юрївна

к.геогр.н., доцент, доцент кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

Адреса робоча: вул. Львівська, 15, 65016 м. Одеса, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3854-6693> **e-mail:** vks26@ua.fm