

Шелешей Т.В.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Гончаренко М.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ЕКОСИСТЕМНІ ПОСЛУГИ: ВИКЛИКИ ТА СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ

У роботі розглядається актуальна проблема інтеграції екосистемних послуг у процес оцінки впливу енергетичних технологій на навколишнє середовище. Зростання глобальних викликів, пов'язаних із кліматичними змінами та деградацією природних систем, вимагає перегляду традиційних підходів до енергетичної політики, орієнтованих не лише на зниження викидів парникових газів, а й на збереження біорізноманіття та забезпечення сталого природокористування. В роботі обґрунтовується необхідність застосування концепції екосистемних послуг як інструменту комплексного аналізу взаємодії енергетичних систем із довкіллям.

Проаналізовано сучасний стан досліджень у сфері екологічної оцінки енергетичних технологій, зокрема використання життєвого циклу (LCA) та класифікації екосистемних послуг (CICES). Визначено ключові обмеження існуючих методик, зокрема недостатню кількісну оцінку повного спектру екосистемних послуг, слабку інтеграцію результатів в енергетичне планування та відсутність міждисциплінарної взаємодії.

Запропоновано системний підхід на основі концепції IPBES, що дозволяє враховувати не лише біофізичні індикатори, але й соціальні, економічні та просторові аспекти впливу енергетики на природу і суспільство. Особлива увага приділена необхідності оцінки впливу на регіональні екосистеми з урахуванням життєвого циклу енергетичних технологій та просторової неоднорідності.

Розглянуто екологічні наслідки використання традиційних джерел енергії – вугілля, нафти і природного газу, що зумовлюють значні негативні ефекти на якість повітря, водних ресурсів, ґрунтів і здоров'я населення. Підкреслено важливість переходу на більш чисті, відновлювані джерела енергії з урахуванням балансу між кліматичними перевагами та локальними екосистемними ризиками.

Дослідження спрямоване на розробку методології комплексної оцінки впливу енергетичних систем на екосистемні послуги, що сприятиме формуванню збалансованої та стійкої енергетичної політики, здатної забезпечити енергетичну безпеку, збереження біорізноманіття та покращення якості життя населення.

Ключові слова: екосистемні послуги, енергетична політика, IPBES, сталий розвиток, біопаливо, викиди, життєвий цикл.

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростаючої екологічної нестабільності питання енергетичної безпеки набуває принципово нового значення. Зростання глобальної обізнаності щодо впливу енергетики на зміну клімату та деградацію довкілля актуалізує потребу перегляду традиційних підходів до енергетичної політики та запровадження екологічно орієнтованих стратегій розвитку.

Глобальні тенденції декарбонізації визначають вектор трансформації енергетичних систем у напрямку зменшення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності та розширення

використання відновлюваних джерел енергії. У цьому контексті Україна, як відповідальний учасник міжнародного кліматичного процесу, формує власну модель енергетичного переходу. Згідно з Енергетичною стратегією України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», передбачається скорочення частки вугілля в загальному обсязі споживання первинних енергоресурсів з 30,3% (у 2015 р.) до 12,5% (у 2035 р.), що цілком узгоджується з міжнародною практикою декарбонізації.

Проте реалізація стратегій енергетичного переходу вимагає не лише технологічної

модернізації та економічної ефективності, а й врахування екологічних та соціальних наслідків, пов'язаних із трансформацією енергетичних систем. Одним із ключових підходів до комплексної оцінки таких наслідків є концепція екосистемних послуг, яка передбачає розгляд природи як джерела життєво важливих благ та функцій для суспільства. Інтеграція екосистемних послуг в енергетичну політику дозволяє виявити приховані екологічні витрати, оптимізувати використання природних ресурсів і сприяти формуванню більш збалансованих та стійких енергетичних рішень.

Таким чином, актуальність дослідження полягає в необхідності розробки інструментів оцінки впливу енергетичних технологій на екосистемні послуги, що дозволить поєднати завдання декарбонізації з цілями збереження біорізноманіття, стійкого природокористування та підвищення якості життя населення.

Сучасна енергетика постає перед подвійним викликом: необхідністю забезпечення надійного енергопостачання та одночасного зниження негативного впливу на довкілля. Традиційні джерела енергії, зокрема викопне паливо, є основним чинником зміни клімату, забруднення атмосферного повітря, деградації екосистем і втрати біорізноманіття. У той же час глобальні кліматичні ініціативи, як-от Паризька угода, передбачають швидкий перехід до низьковуглецевої економіки, що створює потребу у переосмисленні пріоритетів енергетичної політики.

Попри зростаючу увагу до відновлюваних джерел енергії, оцінювання їх впливу часто обмежується суто технічними та економічними показниками, ігноруючи просторово-екологічний контекст. У результаті рішення щодо впровадження нових енергетичних технологій нерідко супроводжуються новими ризиками – погіршенням якості середовища, конфліктами із місцевими громадами або нераціональним використанням ресурсів.

У цьому контексті актуальним є впровадження підходу, який дозволяє оцінити взаємодію енергетичних систем із природним середовищем не лише через показники викидів, а й через призму екосистемних послуг – тобто тих вигод, які суспільство отримує від функціонування екосистем. Такий підхід забезпечує інтегроване бачення енергетичних рішень, у якому враховано як екологічні, так і соціальні аспекти.

Проблема полягає у відсутності усталеної наукової методики, яка дозволила б повноцінно

включити екосистемні послуги до процесу планування, проектування та оцінки енергетичних систем. Це створює розрив між сучасними знаннями про вразливість довкілля та практикою прийняття рішень у сфері енергетики.

Таким чином, постановка проблеми безпосередньо пов'язана з вирішенням низки важливих наукових завдань, таких як розробка методів оцінювання впливу енергетичних технологій на екосистемні послуги, а також практичних завдань, включаючи підготовку рекомендацій для інтеграції цих оцінок у державну політику, інженерне проектування та корпоративне планування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання впливу енергетичних систем на навколишнє середовище та екосистеми є предметом міждисциплінарних досліджень у сфері екології, енергетичного моделювання, економіки природокористування та кліматичної політики.

Однією з ключових теоретичних засад у сучасній екологічній науці є концепція екосистемних послуг, яка була закладена у звіті Millennium Ecosystem Assessment (2005) [1]. У ньому вперше систематизовано поняття постачальницьких, регулюючих, культурних і підтримувальних послуг, які є основою для формування нових підходів до оцінки впливу господарської діяльності, зокрема енергетики.

Подальший розвиток цієї ідеї відбувався в рамках проекту TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity), який наголосив на важливості врахування економічної цінності екосистемних послуг при ухваленні політичних та бізнес-рішень [2]. Практичне застосування цієї концепції зумовило потребу в створенні уніфікованих класифікацій, зокрема CICES (Common International Classification of Ecosystem Services), яка використовується у рамках Статистичної комісії ООН [3].

У контексті енергетики особливої ваги набувають дослідження, що поєднують оцінку життєвого циклу (LCA) енергетичних технологій з аналізом їхнього впливу на довкілля. Наприклад, у роботі Е.Г. Гертвіча (E.G. Hertwich). (2015) [4] порівнюються різні джерела енергії за їхнім екологічним «слідом», включаючи вплив на біорізноманіття, використання земель, води та ресурсів.

Водночас Х.Е. Елісон (H.E. Allison) (2014) [5] порушив важливу проблему суперечностей між глобальними цілями декарбонізації та локальними екологічними впливами, що мають місце під час впровадження відновлювальної

енергетики. У статті доводиться необхідність врахування компромісів між довгостроковими кліматичними перевагами та короткостроковими ризиками для екосистем.

Вагомий внесок у теоретичну базу досліджень забезпечила Міжурядова платформа з біорізноманіття та екосистемних послуг (IPBES), яка пропонує системну рамку аналізу взаємозв'язків між природою та соціально-економічними системами [6]. Цей підхід дозволяє враховувати прямі та непрямі фактори впливу енергетичних рішень, включаючи політичні, інституційні та просторові аспекти.

Нарешті, в роботі А.М. Буле (А.-М. Boulay). (2018) [7] пропонується інтегрувати екосистемні послуги у методології оцінки життєвого циклу, зокрема через включення показників водного стресу, змін землекористування та деградації середовища, що є важливим для аналізу відновлювальних джерел енергії.

Попри значний поступ, залишається низка невирішених аспектів:

- відсутність методологій для комплексної кількісної оцінки впливу енергетичних систем на повний спектр екосистемних послуг;
- недостатня інтеграція результатів таких оцінок у стратегічне енергетичне планування;
- нестача регіонально-орієнтованих досліджень для локальних екосистем;
- слабка міждисциплінарна взаємодія між екологами, інженерами, енергетиками та політиками.

Дослідження, представлене в цій статті, спрямоване на подолання зазначених обмежень через адаптацію концепції екосистемних послуг до потреб енергетичного планування з урахуванням життєвого циклу технологій, просторових впливів і соціальних чинників.

Постановка завдання. Метою статті є розробка комплексного підходу до оцінки впливу енергетичних технологій на екосистемні послуги з урахуванням життєвого циклу технологій, просторової неоднорідності та соціальних аспектів, що дозволить інтегрувати екологічні, економічні та соціальні фактори в процес планування і реалізації енергетичної політики для забезпечення сталого розвитку і збереження біорізноманіття.

Виклад основного матеріалу. Сучасне бачення взаємозв'язків між природою та суспільством значною мірою ґрунтується на системному підході, запропонованому Міжурядовою науково-політичною платформою з біорізноманіття та екосистемних

послуг (IPBES). Концептуальна структура IPBES розглядає природу як взаємопов'язану сукупність природних процесів, функцій і благ, які підтримують життя людини через систему так званих екосистемних послуг.

Цей підхід поєднує елементи екології, соціальної науки та політики і передбачає аналіз таких ключових складових:

- Природа (біофізичне середовище, екосистеми та біорізноманіття),
- Природоорієнтовані вигоди (екосистемні послуги),
- Якість життя людини,
- Прямі чинники змін (наприклад, зміна землекористування, забруднення, зміна клімату),
- Непрямі чинники (економічні, соціальні, технологічні або політичні драйвери),
- Антропогенні активи (інфраструктура, знання, інституції тощо).

У контексті енергетичної політики така структура дозволяє поєднати технічні аспекти виробництва енергії з більш широким розумінням її соціально-екологічних наслідків. IPBES формалізує причинно-наслідкові зв'язки, що виникають між енергетичними системами та природним середовищем, і надає можливість кількісного й якісного оцінювання змін у наданні екосистемних послуг під впливом впровадження нових технологій.

Застосування цієї моделі до аналізу енергетичних стратегій відкриває нові можливості для:

- інтеграції екосистемних показників у процес планування енергетики;
- врахування непрямих соціально-економічних наслідків рішень, зокрема впливу на вразливі громади та добробут населення;
- розробки більш стійких сценаріїв розвитку енергетики, які узгоджуються з цілями збереження біорізноманіття та адаптації до кліматичних змін.

Таким чином, концепція IPBES формує методологічне підґрунтя для системного аналізу енергетичної політики, який виходить за межі оцінки викидів парникових газів і дозволяє враховувати весь спектр взаємодій між технологіями, суспільством і природним середовищем.

Оцінювання впливу енергетичних технологій традиційно ґрунтується на аналізі окремих біофізичних індикаторів, таких як викиди парникових газів (зокрема CO₂), кислотне навантаження, фотохімічне окислення та евтрофікація. Ці показники дозволяють зіставити різні енергетичні джерела за їхнім впливом на зміну клімату та

інші глобальні екологічні процеси. Однак такий підхід є неповним, оскільки не враховує просторово-часовий контекст, регіональні екосистемні особливості та соціальну вразливість територій, де впроваджуються енергетичні проекти.

Важливим обмеженням є також відсутність повного охоплення життєвого циклу енергетичних систем. Більшість оцінок фокусується на стадії експлуатації (виробництво електроенергії), тоді як впливи, що виникають на інших етапах – видобуток сировини, транспортування, будівництво, демонтаж та утилізація – залишаються поза увагою. Наприклад, видобуток рідкоземельних металів для виробництва сонячних панелей або турбін часто має значний локальний екологічний слід, який не враховується в національних енергетичних розрахунках.

Більш комплексне уявлення про вплив енергетичних технологій на природу надає підхід, що базується на екосистемних послугах. На відміну від суто біофізичних оцінок, цей підхід враховує вигоди, які екосистеми надають людині, включаючи:

- регулюючі послуги (очищення повітря і води, регуляція клімату, запобігання ерозії);
- постачальницькі послуги (біомаса, питна вода, матеріали);
- культурні послуги (рекреація, естетична цінність, духовні зв'язки з природою);
- підтримувальні послуги (плодючість ґрунтів, кругообіг поживних речовин, опилення).

Застосування такої системної оцінки потребує інтеграції просторових даних, зокрема ГІС-аналізу, та розгляду просторової неоднорідності впливів, адже екосистемна вразливість різниться залежно від регіону. Крім того, врахування часової динаміки (наприклад, ефекти, які проявляються через роки після завершення експлуатації) є критичним для формування довгострокових рішень.

Отже, для повноцінної оцінки впливу енергетичних систем необхідна методологія, яка поєднує:

- життєвий цикл технологій (LCA);
- класифікацію екосистемних послуг (наприклад, за CICES);
- просторовий та соціальний аналіз;
- індикатори стійкості природного середовища.

Такий підхід дозволить створити багатовимірну оцінку, яка не лише характеризуватиме ефективність технологій з екологічної точки зору, а й забезпечить основу для прийняття

політичних рішень, орієнтованих на сталий розвиток.

Традиційні джерела енергії – вугілля, нафта, природний газ – становлять основу глобального енергетичного балансу, але водночас є основними джерелами негативного антропогенного впливу на довкілля. Їхнє використання супроводжується низкою екологічних ризиків, які проявляються як на глобальному, так і на локальному рівнях.

Спалювання вугілля залишається одним із найбільш забруднюючих процесів серед усіх видів енергетичного виробництва. Викиди діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x), вуглекислого газу (CO_2), ртуті, миш'яку та інших важких металів призводять до: формування кислотних дощів; деградації ґрунтів та водних екосистем; збільшення концентрації твердих частинок у повітрі; значного зростання ризику захворювань дихальної та серцево-судинної систем.

Крім того, вуглецева інтенсивність вугільних ТЕС є найвищою серед усіх технологій – понад 900 г $\text{CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{год}$ виробленої електроенергії.

Нафтова промисловість також є джерелом численних екологічних загроз. У процесі видобутку, транспортування та переробки нафти в атмосферу надходять леткі органічні сполуки (ЛОС), сірчисті з'єднання, бензол, ксилен, а також нафтопродукти, що можуть потрапляти до ґрунтів і водних тіл при аваріях та витоках. Ці забруднювачі мають канцерогенні властивості та впливають на ендокринну систему людини.

Природний газ, хоча й вважається «найчистішим» серед викопного палива за рівнем викидів при згорянні, має приховані екологічні загрози, пов'язані з видобутком, зберіганням і транспортуванням. Основну проблему становить витік метану (CH_4) – газу, що має парниковий потенціал у 25–28 разів вищий за CO_2 у 100-річній перспективі. За оцінками МЕА, до 3% усього видобутого метану може витікати в атмосферу, що суттєво нівелює кліматичні переваги використання газу порівняно з вугіллям.

Крім того, викиди твердих частинок (PM_{10} і $\text{PM}_{2.5}$), озону (O_3) та оксидів азоту під час спалювання викопного палива спричиняють утворення смогів, які: знижують якість повітря в містах і промислових регіонах; погіршують здоров'я людей; сприяють втратам врожаю в аграрних районах через вплив на фотосинтез.

Такі впливи накладаються на екосистемні процеси – зокрема, порушення трофічних ланцюгів, зниження біорізноманіття, деградацію ґрунтів і водних ресурсів.

Висновки. У сучасних умовах, коли екологічні виклики та кліматичні зміни стають все більш гострими, забезпечення енергетичної безпеки потребує комплексного та системного підходу. Трансформація енергетичних систем у напрямку декарбонізації є ключовим завданням, яке має враховувати не лише зниження викидів парникових газів, а й збереження екосистемних послуг, що є основою сталого розвитку і якості життя населення.

Використання традиційних викопних джерел енергії призводить до значних негативних наслідків для навколишнього середовища, включаючи забруднення повітря, деградацію екосистем і втрату біорізноманіття. У цьому контексті інтеграція концепції екосистемних послуг у процес планування та оцінки енергетичних технологій дозволяє більш комплексно врахувати екологічні,

соціальні та економічні аспекти енергетичного переходу.

Розробка і впровадження методологій, що поєднують життєвий цикл технологій, просторовий аналіз і соціальні фактори, є необхідною для формування збалансованих, стійких та ефективних енергетичних рішень. Такий підхід сприятиме мінімізації екологічних ризиків, збереженню біорізноманіття та покращенню добробуту суспільства, що відповідає міжнародним кліматичним зобов'язанням і національним стратегіям розвитку України.

Отже, системне врахування екосистемних послуг у енергетичній політиці є важливою передумовою для успішного та екологічно безпечного енергетичного переходу, здатного забезпечити гармонійне співіснування людини і природи.

Список літератури:

1. Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005. 137 с.
2. TEEB. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. London: Earthscan, 2010. 401 с.
3. Haines-Young, R., Potschin, M. *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation document*, 2018. 36 p.
4. Hertwich, E. G., et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies // *PNAS*. 2015. Vol. 112, № 20. P. 6277–6282.
5. Allison, H. E., et al. Biodiversity offsets and climate change: An assessment of the effectiveness of mitigation hierarchy / *Conservation Letters*. 2014. Vol. 7, № 4. P. 324–330.
6. IPBES. *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn: IPBES Secretariat, 2019. 56 p.
7. Boulay, A.-M., et al. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE) / *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2018. Vol. 23, № 3. P. 368–378.

Sheleshei T.V., Honcharenko M.O. IMPACT OF ENERGY SYSTEMS ON ECOSYSTEM SERVICES: CHALLENGES AND STRATEGIC DIRECTIONS FOR DEVELOPMENT

This paper addresses the urgent issue of integrating ecosystem services into the assessment of the environmental impacts of energy technologies. The growing global challenges related to climate change and the degradation of natural systems require revising traditional approaches to energy policy, focusing not only on reducing greenhouse gas emissions but also on preserving biodiversity and ensuring sustainable natural resource use. The study substantiates the necessity of applying the ecosystem services concept as a tool for comprehensive analysis of the interaction between energy systems and the environment.

The current state of research in environmental assessment of energy technologies is analyzed, particularly the use of life cycle assessment (LCA) and the Common International Classification of Ecosystem Services (CICES). Key limitations of existing methodologies are identified, including insufficient quantitative evaluation of the full range of ecosystem services, weak integration of results into energy planning, and lack of interdisciplinary collaboration.

A systemic approach based on the IPBES framework is proposed, which allows consideration not only of biophysical indicators but also social, economic, and spatial aspects of energy's impact on nature and society. Special attention is given to the need for regional ecosystem impact assessment, accounting for the life cycle of energy technologies and spatial heterogeneity.

Environmental consequences of using conventional energy sources—coal, oil, and natural gas—are discussed, highlighting significant negative effects on air quality, water resources, soils, and public health. The importance of transitioning to cleaner renewable energy sources is emphasized, balancing climate benefits with local ecosystem risks.

The study aims to develop a methodology for comprehensive assessment of energy systems' impacts on ecosystem services, promoting a balanced and sustainable energy policy capable of ensuring energy security, biodiversity conservation, and improved quality of life.

Key words: *ecosystem services, energy policy, IPBES, sustainable development, biofuel, emissions, life cycle assessment.*