



Науковий вісник Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.
Серія: Сільськогосподарські науки

Scientific Messenger of Lviv National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies.
Series: Agricultural sciences

ISSN 2519–2698 print
ISSN 2707-5834 online

doi: 10.32718/nvlvet-a10305
<https://nvlvet.com.ua/index.php/agriculture>

UDC 631.95:620.9:662.6:621/.3

Agroecological aspects of bioenergy

N. Kashchak^{1,2✉}, K. Malysheva¹, O. Shtapenko¹, V. Butsyak¹

¹Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv, Ukraine

²Institute of Cell Biology, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

Article info

Received 09.06.2025

Received in revised form

10.07.2025

Accepted 11.07.2025

Stepan Gzhytskyi National
University of Veterinary
Medicine and Biotechnologies,
Pekarska Str., 50, Lviv,
79010, Ukraine.
Tel.: +38-068-791-33-80
E-mail:
nataliya.kashchak@gmail.com

Institute of Cell Biology, National
Academy of Sciences of Ukraine,
Drahomanova Str., 14, Lviv,
79005, Ukraine.

Kashchak, N., Malysheva, K., Shtapenko, O., & Butsyak, V. (2025). Agroecological aspects of bioenergy. Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural sciences, 27(103), 36–57. doi: 10.32718/nvlvet-a10305

Bioenergy occupies a prominent place in debates on the global energy transition, yet its role requires critical reappraisal. Despite the intuitive appeal of biomass as a renewable carbon source, current energy yields per unit area and energy return on investment (EROI) indicate that bioenergy cannot serve as a system-forming foundation for the energy sector; rather, it should be regarded as a supplementary instrument, useful in certain applications but unable to deliver the scale and efficiency of fossil fuels or of other renewables, notably solar and wind. An analysis of greenhouse-gas emissions in the pre-industrial and industrial eras from AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use) and from fossil-fuel use indicates that the climate neutrality of bioenergy is not an inherent property but is shaped by ecological context and management practices. Within these constraints, particular avenues merit attention. Microalgae exhibit exceptionally high biomass productivity per unit area, yet their low technological readiness and unfavorable energy balances currently limit their broad deployment as a carbon feedstock for energy and chemical industries. Lignocellulosic resources remain the most realistic option for large-scale integration, provided conversion processes are optimized and land use is managed sustainably. Additional promising directions include coupling bioenergy with phytoremediation, where plants both accumulate contaminants and produce biomass that can be valorized for energy. Bioengineering approaches to develop plants that combine hyperaccumulation capacity, enhanced contaminant tolerance, deep and branched rooting systems, and high biomass yields are emphasized. The cultivation of perennial herbaceous energy crops and short-rotation woody coppice on marginal lands can contribute to soil carbon sequestration and improved soil quality. Energy recovery from biowaste is a further application area, but it requires a careful balance between energy extraction and the return of nutrients to soils. In conclusion, bioenergy should not be considered a universal substitute for fossil fuels; rather, it is a context-dependent, auxiliary tool that can generate synergies with ecosystem services such as soil restoration and the utilization of biowaste.

Keywords: bioenergy, EROI, surface power density, AFOLU, carbon sequestration, phytoremediation.

Агроекологічні аспекти біоенергетики

Н. Кашчак^{1,2✉}, Х. Малишева¹, О. Штапенко¹, В. Буцяк¹

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, м. Львів, Україна

²Інститут біології клітини, Національна академія наук України, м. Львів, Україна

Біоенергетика посідає помітне місце в дискусіях про глобальний енергетичний перехід, проте її роль потребує критичного переосмислення. Попри інтуїтивну привабливість біомаси як відновлюваного джерела вуглецю, сучасні показники виходу енергії з одиниці площі та коефіцієнти енергетичного виходу на вкладену енергію (EROI – energy return on investment) свідчать, що біоенергетика не може стати системоутворювальною основою енергетики. Натомість її варто розглядати як допоміжний елемент, корисний у певних застосуваннях, але неспроможний забезпечити масштаб і ефективність, притаманні викопному паливу чи іншим відновлюваним джерелам, зокрема сонячній та вітровій енергетиці. Аналіз рівня викидів парникових газів у доіндустріальну та індустріальну еру від AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use – сільське господарство, лісівництво та інші землекори-

ствання) і від використання викопного палива свідчить про те, що кліматична нейтральність біоенергетики не є заданою характеристикою, а формується залежно від екологічного контексту та практик управління. За цих обмежень біоенергетики окремі напрями заслуговують на особливу увагу. Мікрводорості мають винятково високий вихід біомаси з одиниці площі, проте низький рівень технологічної готовності та несприятливий енергетичний баланс поки що обмежують їхнє широке застосування як джерела вуглецю для енергетики та хімічної промисловості. Лігноцелюлозні ресурси залишаються найбільш реалістичним варіантом для масштабної інтеграції в енергосистему за умови оптимізації процесів перетворення та стійкого землекористування. Додаткові перспективні напрями охоплюють поєднання біоенергетики з фіторе mediaцією, коли рослини, що акумулюють забруднювачі, дають біомасу, при утилізації якої можна отримати додатковий енергетичний ресурс. Підкреслено необхідність використання біоінженерних підходів для створення рослин, що поєднують здатність до гіперакумуляції токсинів, підвищену стійкість до них, глибоку розгалужену кореневу систему та високий вихід біомаси. Інший перспективний напрям – це вирощування багаторічних енергетичних трав'яних та короткоротаційних деревних культур на маргінальних землях, що може сприяти секвестрації вуглецю в ґрунтах та підвищенню їхньої якості. Рекуперация енергії при утилізації біовідходів – це одна сфера застосування біоенергетики, але при цьому потрібно зберігати тонкий баланс між отриманням енергії та поверненням поживних речовин в ґрунт. У підсумку, біоенергетика має розглядатися не як універсальна заміна викопного палива, а як контекстно обумовлений, допоміжний інструмент, який створює синергії з екосистемними послугами, як-от відновлення ґрунтів чи утилізація біовідходів.

Ключові слова: біоенергетика, EROI, поверхнева густина потужності, AFOLU, секвестрація вуглецю, фіторе mediaція.

Вступ

Біоенергетика тривалий час розглядається як базовий елемент стійкого енергетичного переходу. Прихильники підкреслюють її очевидну циклічність: у процесі росту біомаси вилучається атмосферний вуглекислий газ, який може бути перетворений на паливо та інші ресурси для різних секторів економіки. У такому вигляді біоенергетика обіцяє мультифункціональний шлях, що одночасно сприяє пом'якшенню змін клімату, енергетичній безпеці та розвитку сільських територій. Вона часто подається як універсальне рішення, здатне поєднати екологічні та соціально-економічні вигоди. У політичних документах і наукових дослідженнях біоенергетиці відводиться провідна роль як джерелу відновлюваної енергії з широким спектром позитивних ефектів. Її розглядають не лише як інструмент енергетичної трансформації, але і як важливий чинник зміцнення продовольчої та екологічної стійкості. На цю сферу покладають великі очікування в контексті глобальних зусиль із досягнення кліматичної нейтральності.

Результати та їх обговорення

Біопаливо, земельні ресурси та енергоефективність. Біомаса – це відновлюваний ресурс, що виглядає дуже привабливим для заміни викопного палива, адже щороку в процесі фотосинтезу з атмосфери поглинається та фіксується рослинами близько 120 Гт вуглецю, а за вирахуванням дихання чиста первинна продуктивність становить 60 Гт вуглецю, що майже в шість разів перевищує його викиди в атмосферу внаслідок використання викопного палива (Watson et al., 2000; Friedlingstein et al., 2023). Якщо використати частку потенціалу біомаси в енергетиці, то можна запобігти накопиченню надлишкового вуглекислого газу в атмосфері, замінивши викопне паливо. Чи реальність є такою простою?

У 2021 р., за даними (International Energy Agency, 2021), близько 70 млн га земель, що використовуються для вирощування сільгоспкультур (*croplands*), було зайнято під енергетичні культури спеціального призначення (*dedicated energy crops*), а за даними (UFOP, 2023), для цього використовували близько 8 % світових *croplands* (112 млн га), що забезпечувало менше

1 % глобального споживання первинної енергії – близько 4,3–4,5 ЕДж на рік (International Energy Agency, 2025; FAO, 2025). Це означає, що середній енергетичний вихід з одного гектара таких культур становив приблизно 40–60 ГДж. 4,4 ЕДж – це споживання первинної енергії в Україні в 2014 р. (United Nations Statistics Division, 2014). У 2022 р. первинне споживання енергії в Україні становило 2,6 ЕДж (United Nations Statistics Division, 2022). Площа України (60,4 млн га) менша за площу, що використовувалася у світі для вирощування енергетичних культур. Варто нагадати, що загальна площа суходолу Землі становить 14,9 млрд га, з яких близько 10,9 млрд га вважаються придатними для життя. Майже половина цієї придатної для життя території вже використовується для сільського господарства й близько 1,4 млрд га припадає на рілля (Dias et al., 2021). Таким чином, на одного мешканця планети сьогодні припадає приблизно 1,33 га придатної для життя землі та 0,17 га ріллі.

На офіційній вебсторінці Міжнародного енергетичного агентства станом на липень 2025 р. остання доступна статистика щодо світового енергетичного балансу стосується 2022 р. (International Energy Agency, 2025). Так, за цими даними, у 2022 р. світове споживання первинної енергії становило приблизно 622 ЕДж, що в перерахунку на душу населення відповідає середньому річному споживанню близько 78 ГДж. У країнах Європейського Союзу цей показник становить 131 ГДж на особу на рік (Eurostat, 2024), тоді як у США він сягає близько 267 ГДж (United Nations Statistics Division, 2022).

Прості розрахунки показують, що теоретично при такому енергетичному виході з гектара, як спостерігається зараз у світі в середньому при вирощуванні енергетичних культур, для продукції близько 500 ЕДж енергії (80 % первинної енергії, що забезпечується викопним паливом (International Energy Agency, 2024), потрібно задіяти площу, що співмірна з площею землі, придатною для життя. Це те, що впливає теоретично із реальних показників при простій екстраполяції. Крім того, дані щодо споживання енергії на душу населення в ЄС та США дозволяють припустити, яким було би споживання енергії в усьому світі при зростанні енергетичних потреб.

Слід зазначити, що зараз спеціально призначені енергетичні культури в основному використовуються для отримання рідкого палива, а пряме спалювання біомаси дає в кілька разів вищий енергетичний вихід (Campbell et al., 2009; Ioelovich, 2015), що варто враховувати при розрахунках енергетичного потенціалу біомаси (табл. 1).

Таблиця 1

Річний вихід енергії з 1 га для біопаливної сировини та вітрових і сонячних електростанцій. Узагальнено за даними (Kreutz et al., 2008; Schmer et al., 2008; Manochio et al., 2017; Khalin et al., 2020; Rakhmetova et al., 2020)

Джерело енергії	Річний вихід енергії, ГДж/га
Етанол із кукурудзяного крохмалю	≈ 65–80
Етанол із цукрової тростини	≈ 144–170
Целюлозний етанол	≈ 60
Синтетичне біопаливо (реакція Фішера-Тропша)	≈ 90
Біодизель (ріпакова олія)	≈ 44
Біодизель (сосва олія)	≈ 17
Біодизель (пальмова олія)	≈ 137
Біодизель (водорості)	≈ 500–850
Пряме спалювання біомаси	≈ 190–350
Сонячні панелі	≈ 7 200
Вітрові турбіни	≈ 2 700

У світі біомаса забезпечує близько 56 ЕДж первинної енергії (Colla et al., 2022), і це значною мірою так зване традиційне використання доступної біомаси (дров, рослинних залишків, гною) для приготування їжі та опалення за допомогою відкритих вогнищ та недосконалих печей без вентиляції в країнах з низьким рівнем доходу, що приносить значну шкоду здоров'ю та спричинило 3,2 млн передчасних смертей у 2020 р., серед яких 237 тис. смертей дітей віком до 5 років (World Health Organization, 2024). Всесвітня організація охорони здоров'я, Програма ООН з навколишнього середовища та Міжнародне енергетичне агентство наголошують, що відмова від традиційної біомаси є необхідною умовою забезпечення права на чисте повітря, зменшення передчасної смертності та досягнення цілей сталого розвитку. Традиційні способи використання біоенергії спричиняють локальне, концентроване забруднення поблизу місця спалювання, у той час як сучасні установки з високими димовими трубами викидають продукти згоряння у верхні шари атмосфери, де відбувається більша дисперсія забруднювальних речовин, хоч це також приносить шкоду довкіллю та здоров'ю людей.

Існують різні розрахунки енергетичного потенціалу біомаси для заміни викопного палива, і величини можуть відрізнятись більше ніж на два порядки — від <50 до >1000 ЕДж на рік. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (International Renewable Energy Agency, IRENA) оцінювало потенціал біоенергії від 97 до 147 ЕДж на рік до 2030 р. (IRENA, 2014). Від 500 ЕДж до 1500 ЕДж на рік до 2050 р. оцінювали потенціал біомаси IRENA та IEA-ETSAP — International Energy Agency's Energy Technology

Systems Analysis Programme (Програма аналізу енергетичних технологічних систем Міжнародного енергетичного агентства) (IEA-ETSAP & IRENA, 2013). Наведемо лише деякі з інших даних щодо потенційної кількості енергії, що можна отримати за рік з біомаси — 60–120 ЕДж (Searle & Malins, 2016), 110–245 ЕДж (Wu et al., 2024), 130–270 ЕДж (Beringer et al., 2011), 70–360 ЕДж (Strapasson et al., 2017), 33–1135 ЕДж (Berndes et al., 2003), 215–1275 ЕДж (Smeets et al., 2007). Оцінки глобального енергетичного потенціалу біомаси є вкрай варіативними. Це пов'язано зі значними відмінностями в допущеннях при оцінці придатних земель, урожайності, технологічного прогресу, екологічних обмежень, соціальних пріоритетів. У дослідженнях (Dias et al., 2021; Errera et al., 2023) потенціалу біоенергії для 2050 р. розглядається сценарій повної адаптивної відповіді, за яким при глобальному первинному річному споживанні енергії у 848 ЕДж потенціал біомаси навіть дещо перевищує цю кількість. При цьому майже вся енергія буде походити зі спеціально призначених енергетичних культур, для вирощування яких передбачено 30,5–42 % придатної для життя землі, що в 2–3 рази перевищує теперішню площу всіх орних земель (у 2022 р. для вирощування енергетичних культур використовували 1,17 % придатної для життя землі, що давало 4,3–4,5 ЕДж енергії та забезпечувало 0,71 % річного первинного споживання енергії). Для харчування людей за тим сценарієм передбачається 43,0 ЕДж біоенергії (у 2019 р. — 44,2 ЕДж). Автори зазначають, що половина придатних для проживання земель світу використовується під сільське господарство. Більш ніж три чверті цієї площі припадає на виробництво продукції тваринництва, яке забезпечує лише 18 % калорій і 33 % загальної кількості білків у світовому раціоні. Для повного забезпечення глобальних енергетичних потреб біомасою (головним чином за допомогою спеціально вирощених культур) автори пропонують не залучати ліси (3,9 млрд га), чагарники (1,2 млрд га) зберегти за можливістю, а пропонують залучити здеградовані землі (близько 1 млрд га). Оскільки пасовища займають три чверті сільськогосподарських земель, то пропонується відмова від м'яса жуйних тварин, скорочення площ, що використовуються для виробництва інших білків тваринного походження та вирощування харчових рослин (звільнивши таким чином понад 2 млрд га), додавання в раціон білків з комах, повне уникнення їстівних харчових відходів (зараз близько 30 % їжі, придатної для споживання, викидається). Для досягнення цілей також пропонується підвищити продуктивність продовольчих та енергетичних культур. Якщо 32–44 млрд га землі буде використовуватися для виробництва 848 ЕДж і більше первинної енергії, то середній енергетичний вихід з гектара повинен бути 192–265 ЕДж на рік, що зараз теоретично можливо, але при прямому спалюванні біомаси. Різні автори наводять значення енергетичних виходів з гектара на рік, які відрізняються від діапазонів, зазначених вище та в таблиці 1. Це пов'язано з різною оцінкою енергетичного внеску при виробництві біопалив.

У таблиці 2 наведено дані, щодо поверхневої густини потужності різних джерел енергії. Ця величина описує потужність, яку можна отримати з одиниці площі земної поверхні, що займає певна енергетична система, включно з усією допоміжною інфраструктурою, виробництвом, видобутком палива (якщо це застосовно) та виведенням з експлуатації. Викопні види палива та ядерна енергетика характеризуються високою густиною потужності, що означає можливість отримання значних обсягів енергії з електростанцій, які займають відносно невелику площу. Джерела відновлюваної енергії мають густину потужності щонайменше на три порядки нижчу, і для забезпечення того самого енергетичного виходу їм потрібно займати відповідно більші території, що може бути суттєвим лімітуючим фактором.

Таблиця 2

Поверхнева густина потужності різних енергосистем. Узагальнено за даними (Dijkman & Benders, 2010; van Zalk & Behrens, 2018; Saunders, 2020)

Енергосистема	Поверхнева густина потужності, Вт/м ²
Природний газ	482
Атомні електростанції	241
Нафта	195
Вугілля	135
Сонячні панелі	6,63
Вітрові турбіни	1,84
Гідроелектростанції	0,14
Біомаса (середнє)	0,08
цукрова тростина	0,414
міскантус	0,152
інші трави	0,100
верба	0,113
органічні відходи	0,02

Ці дані свідчать про дуже великий земельний слід (*land footprint*) біоенергії.

У роботі (Eggers et al., 2009) досліджено потенційні впливи зміни біопаливної політики ЄС на біорізноманіття Європи, зокрема через зміни в землекористуванні та вибір культур для біопалив. Автори використовували 313 видів з різних таксономічних груп, щоб оцінити зміни в їхньому поширенні та середовищах існування при різних сценаріях політики біопалив. Результати показали, що збільшення цілей щодо біопалив може призвести до того, що більше видів постраждає від втрати середовищ існування, ніж отримає користь, а скасування цілей щодо біопалив може мати переважно позитивні ефекти для біорізноманіття.

Найважливішим обмеженням для масштабного використання біоенергетики, що потребує значних земельних площ, є наявність вільної землі. Малоімовірно, що така біоенергетика стане конкурентоспроможним джерелом енергії в довгостроковій перспективі. Зростання чисельності населення та дедалі більше усвідомлення цінності збереження природних і майже природних екосистем свідчать про посилення дефіциту землі в майбутньому. Прогнозують, що,

якщо сільськогосподарська продуктивність і далі зростатиме такими ж темпами, як за останні 50 років, і при цьому жодної землі не буде виділено для виробництва біоенергії, все одно доведеться розширити площі ріллі й пасовищ приблизно на 10 % до 2050 р. (Searchinger et al., 2018). Оскільки земля є дефіцитною, якщо ми все ж змушені використовувати її для виробництва енергії, то повинні робити це з максимальною ефективністю. Наприклад, фотоелектричні панелі можуть забезпечити набагато ефективніше використання землі: кількість електроенергії, яку можна отримати з одиниці площі поверхні за допомогою сонячних панелей, щонайменше у 50–100 разів перевищує відповідну кількість енергії з біомаси (European Academies Science Advisory Council, 2019). Проте в стратегіях заміщення викопного палива важливо враховувати не лише його енергетичну функцію. Викопне паливо виконує також критичну роль як сировина для хімічної промисловості, оскільки є джерелом вуглецевих сполук, необхідних для виробництва широкого спектру хімічних речовин (International Energy Agency, 2018).

До того ж рідкі вуглеводні мають суттєві переваги як енергоносії завдяки високій об'ємній енергетичній густині, зручності транспортування та накопичення. Тому пошук сталих альтернатив викопному паливу повинен включати як енергетичну, так і сировинну компоненти. Бензин і дизельне паливо мають високу об'ємну й масову енергетичну густину (приблизно 35 МДж/л). Літій-іонні акумулятори, які найчастіше розглядають як альтернативу в транспортних застосуваннях, мають об'ємну енергетичну густину лише в межах 0,25–2,63 МДж/л, тобто приблизно в 10–30 разів меншу за бензин або дизель (табл. 3).

Хоча існують прототипи літій-іонних і літій-металевих акумуляторів із дещо вищими показниками енергетичної густини, вони поки що не впроваджені в масове виробництво. Теоретичні дослідження припускають можливість створення літій-повітряних акумуляторів із об'ємною енергетичною густиною, співмірною з бензином і дизельним паливом, однак це наразі залишається радше гіпотетичним сценарієм (Itani & De Bernardinis, 2023; Parvizi et al., 2025). Зріджений водень та стиснений газоподібний водень, який має дуже високу гравіметричну енергетичну густину, також має значно нижчу об'ємну енергетичну густину, ніж бензин та дизельне паливо.

Слід зазначити, що літій-іонні технології, а також сонячні панелі й вітрові турбіни при їх масовому використанні потребуватимуть значних обсягів літію, кобальту, рідкісноземельних металів та інших критичних матеріалів. Географія видобутку та переробки критичних матеріалів є дуже концентрованою, при цьому домінуючу роль відіграє обмежена група країн. У видобутку критичних матеріалів провідні позиції займають Австралія (літій 47 %), Чилі (мідь 24 % та літій 30 %), Китай (графіт 65 %, диспрозій 49 %), Демократична Республіка Конго (кобальт 70 %), Індонезія (нікель 49 %) та Південна Африка (платина 74 %, іридій 89 %) (International Energy Agency, 2021a). Ця концентрація стає ще більш очевидною на стадії переробки, де Китай наразі забезпечує 100 %

переробленого природного графіту та диспрозію, 70 % кобальту та майже 60 % літію й марганцю. Домінуюча позиція Китаю як виробника більшої частини світового обсягу рідкісноземельних мінералів та швидке зростання їх споживання через появу нових технологій у сфері чистої енергії та оборонних технологій у поєднанні з рішеннями Китаю обмежувати

експорт рідкісноземельних елементів викликали зростання занепокоєння щодо майбутньої їх доступності. Як наслідок, промислово розвинені країни, такі як Японія, США та країни ЄС, стикаються з обмеженим постачанням та зростанням цін на рідкісноземельні елементи (Fan et al., 2023; Ghorbani et al., 2025).

Таблиця 3

Об’ємна енергетична густина різних енергоносіїв. Узагальнено за даними (Mazlumi & Crandima, 2012; International Energy Agency, 2023; Itani & De Bernardinis, 2023; Parvizi et al., 2025)

Вид палива/матеріалу	Об’ємна енергетична густина, МДж/л
Бензин	32–34
Дизельне паливо	35–38
Біодизель	33
Етанол	24
Метанол	15,6
Зріджений аміак	11,5
Зріджений водень	8,5
Водень (газ) (1 бар, атм. тиск)	0,010–0,012 (120–142 МДж/кг)
Водень (газ) (350 бар)	1,2–1,4
Водень (газ) (700 бар)	2,3–2,7
Природний газ	0,0364 (53,6 МДж/кг)
Літій-іонні акумулятори	0,25–2,63
Літій-іонні акумулятори NanoGraf 18650 (2022) (прототип)	2,88
Твердотільні літій-металеві акумулятори (прототип)	3,85
Літій-повітряні акумулятори (прототип)	4,3
Літій-повітряні акумулятори (теоретичний потенціал)	12–43

Щоб уникнути надмірного використання біомаси як запасного шляху задоволення енергетичних потреб у разі дефіциту технологічних компонентів, стратегічним пріоритетом має стати деконцентрація та диверсифікація ланцюгів постачання критичних матеріалів: розбудова регіональних потужностей з видобутку та переробки, масштабування повторного використання, а також підтримка альтернативних матеріалів і технологічних маршрутів. Концентрація переробних потужностей і тривалі часові затримки від відкриття родовища до комерційного виробництва роблять швидко компенсацію дефіциту малореальною, а тому без системних інвестицій у матеріальну незалежність країни ризик переходу до інтенсивного вилучення біомаси з відповідними екологічними наслідками різко зростає. При цьому навіть оптимістичні оцінки резервів корисних копалин (Dou & Xu, 2022; U.S. Geological Survey, 2024; Ku et al., 2024; Chen et al., 2024) не знімають ризиків, пов’язаних із просторовою концентрацією ресурсних і переробних потужностей та можливим використанням доступу до них як інструмента політичного тиску; отже політики мають інтегрувати заходи диверсифікації і рециркуляції в національні плани енергетичного переходу (International Renewable Energy Agency, 2023; Fan et al., 2023; Lee et al., 2024).

Як уже зазначалося, істотною проблемою біопалива є дуже низька поверхнева густина потужності, що зумовлює потреби у великій кількості землі. Більший енергетичний вихід з одиниці площі можна отримати з мікрводоростей порівняно з іншими видами біопалива.

Як вказують (Shirvani et al., 2011) для біодизеля, виробленого з водоростей, з виходом 850 ГДж/га/рік, щоб замінити світове виробництво 1,1 млрд тонн дизеля на основі нафти на рік, знадобилась би площа 57,3 млн га, що приблизно відповідає території трохи більшої за Іспанію та меншій за Техас, і це значно кращі показники порівняно з іншими видами біопалива. Продуктивність олії з водоростей на одиницю площі оцінюється від 58 700 до 136 900 л/га/рік залежно від вмісту ліпідів, що в 10–23 рази перевищує продуктивність наступної за ефективністю культури – пальмової олії – яка становить 5950 л/га/рік (Atabani et al., 2012).

Програма водних видів Міністерства енергетики США (The U.S. Department of Energy’s Aquatic Species Program – ASP) регулярно переглядала питання доступних ресурсів для виробництва біодизелю з мікрводоростей. Це нетривіальне завдання. Такі оцінки ресурсів потребують комплексного аналізу відповідного клімату, земельних площ та наявності ресурсів. Аналізи показали, що існують значні потенційні ресурси землі, води та вуглекислого газу для підтримки цієї технології. Припускали, що біодизель з водоростей міг би легко забезпечити кілька «квадів» біодизелю – значно більше, ніж можуть дати існуючі олійні культури. Як зазначено у звіті ASP, системи з мікрводоростей використовують значно менше води, ніж традиційні олійні культури. Земля майже не є обмеженням. 200 000 гектарів (менше 0,1 % кліматично придатних земель у США) могли б виробити один «квад» палива (Sheehan et al., 1998), щоправда, у звіті не вказано, за який час, але, найімовірніше, за десять років.

Програма ASP діяла з 1978 по 1996 рік. Її метою було дослідити можливість виробництва біодизелю з мікроводоростей, культивованих у відкритих ставках та біореакторах, у тому числі з використанням CO₂ викидів теплових електростанцій. Було зібрано більше 3000 штамів водоростей, 51 із яких детально охарактеризовано як перспективні для виробництва олії. Ціллю програми було досягнення продуктивності до 50 г/м² на добу з вмістом ліпідів 50–60 % сухої маси, але стресові умови, що підвищували жирність, водночас пригнічували ріст клітин, що знизило загальну продуктивність. Звіт узагальнює лабораторні дослідження з біохімії, генетичних модифікацій та відбору високоефективних штамів, але, як показано, жоден штам одночасно не демонстрував високу продуктивність та максимальний рівень ліпідів. У 1998 р. висновки зазначали, що навіть за оптимальних умов біодизель з мікроводоростей стане економічно виправданим лише в разі подвоєння цін на нафту (порівняно з рівнем 1998 р.) У рамках ASP було витрачено близько 25 мільйонів доларів за 18 років, але при тому не досягнуто комерційної рентабельності.

Проте інтерес до біопалива з водоростей не згас, і в червні 2017 р. Офіс технологій біоенергетики (Bioenergy Technologies Office (BETO)) Міністерства енергетики США оголосив про програму DISCOVER з метою прискорення та здешевлення виробництва біопалива з водоростей (U.S. Department of Energy, 2017). Дослідники Морської наукової лабораторії Тихоокеанської національної лабораторії на північному заході США (Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)) у Сєквімі, штат Вашингтон, працюють над зменшенням вартості виробництва біопалива з водоростей, використовуючи внутрішню систему, яка імітує умови зовнішніх ставків. Проект DISCOVER (Development of Integrated Screening, Cultivar Optimization, and Validation Research) створив інтегровану платформу скринінгу для швидкого виявлення високопродуктивних штамів водоростей, здатних до стійкого річного вирощування на відкритому повітрі з використанням ротації культур. Припускають, що водорості мають великий потенціал як сировина для біопалива, і за сприятливих умов їх продуктивність може перевищувати продуктивність целюлозних джерел біоенергетики до 100 разів. Визначення високопродуктивних штамів водоростей може сприяти зниженню вартості виробництва біопалива. Програма Advanced Algal Systems від BETO ставила за мету продемонструвати проміжну врожайність біопалива з водоростей у 2 500 галонів на акр на рік до 2018 р. та 5000 галонів на акр на рік до 2022 р. Додатковою метою є зниження загальних витрат на виробництво біопалива з мікроводоростей до еквівалента \$3 за галон бензину до 2030 р., незалежно від наявності або відсутності супутніх продуктів. Дослідники вважають, що біопаливо з водоростей має потенціал стати надійним, внутрішнім джерелом палива, що дозволить зменшити залежність США від імпортової нафти (U.S. Department of Energy, 2017).

Однак, як видно з таблиці 4, де вказано енергетичний вихід на вкладену енергію (EROI – Energy return on investment), водорості, попри високу врожайність,

часто мають дуже низький EROI (через енерговитрати на циркуляцію води, освітлення, обробку біомаси, дегідратацію) за невеликими винятками, як-от у випадку гідротермального зрідження та піролізу, що можуть мати EROI близько 5 (Phillip & Goyal, 2024).

Таблиця 4

Енергетичний вихід на вкладену енергію (EROI). Узагальнено за даними (Hall et al., 2008, 2009, 2011; Gupta et al., 2011; Hall et al., 2014; Delannoy et al., 2021; Ferroni et al., 2017; Rana et al., 2020; Delannoy et al., 2021; Murphy et al., 2022; Nøland et al., 2022; Papagianni et al., 2024; Sahin et al., 2024; World Nuclear Association, 2025)

Джерело енергії	EROI
Нафта	18–43
Природний газ	28
Вугілля	29
Гідроелектростанції	110
Атомні електростанції	75
Сонячні панелі	6,5
Вітрові турбіни	19,8
Біопаливо (середнє)	3,9
біодизель (ріпакова олія)	2
біоетанол (пшениця)	1,53
біоетанол (тритикале)	1,3
біоетанол (цукровий буряк)	4,77
біоетанол (сорго)	1,85–3,2
біоетанол (цукрова тростина)	3–8
біоетанол (кукурудза (високоінтенсивна агрокультура))	1,7
біоетанол (кукурудза (низькоінтенсивна агрокультура))	5,4–5,9
біогаз (кукурудза (високоінтенсивна агрокультура))	14,7–22,4
біогаз (кукурудза (низькоінтенсивна агрокультура))	2,2–10,2
біоетанол (трави)	4
біоетанол (агровідходи)	1,59–7,2
біоетанол (агровідходи (стебла сорго, сік і багаса цукрової тростини))	5,1–17,1
біогазолін (деревні відходи)	2,7–4,3
біоетанол (водорості)	0,09–1,57
біодизель (водорості)	0,01–1,18
біонафта (водорості)	0,19–5

Енергетичний вихід на вкладену енергію є важливим показником для джерел енергії, що визначає їхню здатність підтримувати економічний розвиток і функціонування соціальних інститутів. Сучасне індустріальне суспільство було побудоване на основі високоефективних джерел енергії із високим EROI. Викопне паливо – зокрема нафта, газ і вугілля – забезпечувало надлишок енергії, що дозволив створити складні виробничі ланцюги, транспортну інфраструктуру, системи охорони здоров'я, освіти, науки та культури. Індустріальна революція стала можливою завдяки паливу з EROI, що часто перевищував 50:1 (White & Kramer, 2019). За словами (Hall et al., 2009), для того, щоб енергоносієм був життєздатним джерелом енергії для суспільства, потрібно, щоб його EROI був не менше 3:1 – це критична межа для цивілізації. У більш пізніх дослідженнях (Hall et al., 2014) показують, що для стійкого рівня життя та розвитку сучасної

цивілізації EROI має бути на рівні близько 14:1, а значення між 3 і 7:1 – це зона “енергетичної вразливості”. (Fizaine & Court, 2016) оцінили енергетичні витрати економік США та світу у 1850–2012 рр. Періоди високих витрат на енергію відносно ВВП (1850–1945 рр.) або різкі “стрибки” (1973–1974 та 1978–1979 рр.) асоціюються з низькими темпами економічного зростання, тоді як періоди низьких або спадних витрат відповідають високим і зростаючим темпам економічного розвитку (наприклад, 1945–1973 рр.). У 1960–2010 рр., для яких доступні безперервні щорічні дані щодо контрольних змінних (нагромадження капіталу, чисельність населення, рівень безробіття), оцінки показують, що статистично економіка США не може підтримувати позитивне зростання, якщо витрати на енергію перевищують 11 % ВВП. З огляду на сучасну енергоємність економіки США, це відповідає мінімальному суспільному показнику EROI приблизно 11:1 або максимально допустимій середній ціні енергії, що вдвічі перевищувала поточний рівень (Fizaine & Court, 2016).

За даними (World Nuclear Association, 2025), середнє значення EROI у США для всіх технологій генерації становить близько 40:1, а EROI на рівні близько 7:1 вважається економічним порогом для розвинених країн, оскільки він забезпечує достатній надлишок енергії для підтримання складної соціально-економічної системи.

Як видно з таблиці 4, середнє значення EROI для біопалива становить лише 3,9, а для окремих його видів може бути близько 1 і навіть нижче. Це поступає пороговим значенням, які, за оцінками різних авторів, є критичними для збереження складності сучасних економік. Біопаливо з таким EROI навряд чи здатне стати системоутворювальною основою енергетичного переходу, а його роль доцільніше розглядати у форматі допоміжних застосувань.

Переоцінка ролі біоенергетики. Упродовж останніх двох десятиліть біоенергетику – зокрема виробництво рідких біопалив із сільськогосподарської сировини – розглядали як важливу складову енергетичного переходу та інструмент зниження викидів парникових газів. Особливе місце в глобальній стратегії декарбонізації займала етанольна та біодизельна промисловість, яка активно підтримувалася через державні політики як у США, так і в ЄС. Однією з найбільш амбітних програм такого типу є Renewable Fuel Standard (RFS) – Стандарт відновлювального палива, започаткований у 2005 р. та значно розширений у 2007 р. в рамках Energy Independence and Security Act (EISA), який вимагав щорічного збільшення обсягів біопалив у транспортному паливі, зокрема етанолу з кукурудзяного зерна (U.S. Congress, 2007). Ідея RFS полягала в тому, що біопаливо, замінюючи викопне паливо, дозволить зменшити викиди вуглекислого газу, стимулюватиме розвиток сільськогосподарства, зменшить залежність США від імпорту нафти й сприятиме інноваціям у галузі відновлюваних джерел енергії. Планувалося поступово збільшити обсяг змішування біоетанолу в бензині – від 4 млрд галонів у 2006 р. до 7,5 млрд галонів у 2012 р. Це був етанол із зерна кукурудзи. У 2007 р. EISA

розширив програму (RFS2), встановивши зобов’язання досягти 36 млрд галонів до 2022 р., зокрема не більш ніж 15 млрд галонів від кукурудзяного етанолу й мінімум 16 млрд з альтернативних джерел: целюлозних, біодизелю, та інших передових біопалив. Прагнучи стимулювати розвиток передових біопалив, RFS2 зіткнулася з численними труднощами: виробництво целюлозного етанолу значно відставало від планів, а частка передових біопалив виявилася набагато менша за передбачену законом (у 2022 р. фактичний обсяг целюлозного біопалива був нижчим за статутний показник більше ніж на 96 %). У звіті (Government Accountability Office, 2016) зазначалося, що RFS навряд чи досягає своїх цілей зі зниження викидів парникових газів через низьке виробництво передових біопалив. Найвищі обсяги Renewable Volume Obligations були встановлені у 2023–2025 роках: сумарні відновлювальні палива понад 20 млрд RIN (Renewable Identification Numbers) з поступовим зростанням целюлозного біопалива з 0,84 млрд RIN до 1,38 млрд RIN. Програма RFS еволюціонувала від стратегічного стимулу кукурудзяного етанолу до складної системи обмежень, кількісних цілей і системи сертифікації (Congressional Research Service, 2023), проте зіткнулася з критикою за непрогнозованість розвитку передових біопалив і значні виклики, пов’язані з прямою та непрямою зміною землекористування.

RFS визначає обсяги використання біопалива у США, і таким чином опосередковано регулює 38 % світового виробництва біопалива. Проте наслідки цього ключового інструменту кліматичної та екологічної політики залишаються незрозумілими. Як показує дослідження (Lark et al., 2022) ця політика виявилася далеко не однозначною у своїх екологічних наслідках. У цьому дослідженні автори поєднали економічний аналіз, спостереження за змінами землекористування та біофізичне моделювання, щоб оцінити фактичні ефекти RFS – як у цілому, так і на рівні окремих сільськогосподарських полів у межах США. Виявлено, що RFS призвів до зростання цін на кукурудзу на 30 %, а цін на інші сільськогосподарські культури на 20 %. Це, у свою чергу, спричинило розширення площ під кукурудзою на 2,8 млн га (8,7 %) та загальних орних земель на 2,1 млн га (2,4 %) у період після впровадження політики (2008–2016). Такі зміни зумовили зростання щорічного споживання мінеральних добрив на 3–8 %, підвищення рівня забруднення води на 3–5 % і такі обсяги викидів вуглецю внаслідок зміни землекористування в межах США, що сумарна вуглецева інтенсивність етанолу з кукурудзи, виробленого відповідно до вимог RFS, не нижча за бензин, а ймовірно щонайменше на 24 % вища. Це без урахування ймовірного міжнародного ефекту від зміни землекористування. Авторів зазначають, що ці компроміси мають бути ретельно зважені поруч із потенційними перевагами біопалива при ухваленні рішень щодо майбутнього політики відновлюваної енергетики та здатності таких палив, як кукурудзяний етанол, сприяти стримуванню змін клімату, а для досягнення задекларованих екологічних переваг виробництва і використання біопалива необ-

хідні суттєві технологічні прориви та перегляд політики (Lark et al., 2022).

ЄС також проводить політику підтримки відновлюваних джерел енергії, зокрема біопалива, через свої Директиви про відновлювані джерела енергії (Renewable Energy Directive, RED). Ці директиви пройшли кілька етапів еволюції, кожен з яких намагався вирішити виявлені недоліки та адаптуватися до нових наукових даних і викликів сталого розвитку.

Перша Директива про відновлювані джерела енергії (RED I, 2009/28/EC), прийнята у 2009 р. (European Parliament & Council, 2009), встановила обов'язкові цілі для всіх держав-членів ЄС щодо частки відновлюваної енергії в загальному енергоспоживанні до 2020 р., а також 10 % цільовий показник для відновлюваної енергії на транспорті. Хоча вона включала критерії сталого розвитку для біопалива, ці критерії виявилися недостатніми для запобігання деяким негативним наслідкам.

Одним з найбільших викликів стало ігнорування непрямой зміни землекористування (Indirect Land Use Change, ILUC). Це виникає, коли вирощування енергетичних культур на існуючих сільськогосподарських угіддях призводить до витіснення виробництва продовольства на інші території, часто за рахунок вирубування лісів або осушення боліт в інших частинах світу, що, у свою чергу, спричиняє значні викиди парникових газів.

Акцент на біопаливі першого покоління (з харчових культур, таких як ріпак, пальмова олія, кукурудза) викликав занепокоєння щодо конкуренції за землю та воду з виробництвом продовольства, потенційного впливу на ціни на продукти харчування та продовольчу безпеку.

У відповідь на критику та зростаюче розуміння екологічних наслідків у 2018 р. була прийнята переглянута Директива (RED II, 2018/2001/EU), яка набула чинності у 2021 р. (European Parliament & Council, 2018). Вона підвищила загальні амбіції щодо відновлюваної енергії до 32 % до 2030 р. та запровадила суворіші критерії сталого розвитку. RED II запровадила обмеження на використання біопалива з високим ризиком ILUC, зокрема пальмової олії, з поступовим припиненням її підтримки до 2030 р. Це було прямим наслідком наукових доказів її значного негативного впливу на дефорестацію. Рішення ЄС про класифікацію пальмової олії як біопалива з високим ризиком ILUC призвело до торговельних суперечок, зокрема з Індонезією, яка оскаржила це рішення в СОТ. Директива надала пріоритет так званім «передовим біопаливам» з відходів та залишків та біопаливам другого й третього покоління (наприклад, з водоростей), встановлюючи для них спеціальні цілі. Це сприяло зміщенню акцентів від харчових культур до нехарчових сировинних матеріалів. RED II також посилила критерії для біомаси з лісів, вимагаючи, щоб вона походила з джерел, які забезпечують стаке управління лісами та підтримують їх вуглецеві стоки. Однак, незважаючи на ці зміни, дебати щодо вуглецевої нейтральності спалювання лісової біомаси продовжуються, оскільки повне відновлення вуглецевого балансу

може займати десятиліття або століття (Fargione et al., 2008).

ЄС продовжує переглядати свою політику, зокрема в рамках пакету «Fit for 55» та у світлі нових наукових даних. Остання редакція Директиви ЄС про відновлювану енергію (RED III), ухвалена у 2023 р. (European Parliament & Council, 2023), подвоює ціль щодо відновлюваних джерел енергії у транспортному секторі – до 29 % до 2030 р. або ж до зниження інтенсивності викидів парникових газів на 14,5 %. Директива також встановлює обмеження на використання сировини, зокрема ліміти для продовольчих і кормових культур, а також передбачає цілі для передових видів палива (5,5 % до 2030 року, з яких 1 відсотковий пункт має забезпечуватися синтетичними паливами). RED III передбачає ще суворіші критерії, особливо щодо лісової біомаси, з метою забезпечення її справжньої кліматичної переваги. Підкреслюється необхідність більш цілісного підходу до управління біомасою, враховуючи її вплив на здоров'я ґрунту, біорізноманіття та водні ресурси, а не лише на енергію.

Еволюція європейських нормативних актів щодо відновлюваного палива (RED) чітко демонструє процес навчання та адаптації. Політика ЄС не є статичною; вона переглядається та змінюється у відповідь на наукові докази – зокрема виявлення таких проблем, як ILUC та «вуглецевий борг» лісової біомаси, змусило ЄС переглянути свої підходи.

У дорожній карті Міжнародного енергетичного агентства Net Zero Emissions by 2050 (NZE) передбачено, що загальне енергопостачання з біомаси становитиме близько 100 ЕДж, порівняно з теперішніми 60 ЕДж (International Energy Agency, 2021b).

У сценарії NZE біоенергетика швидко переходить на 100 % сталі (*sustainable*) джерела постачання та використання. Повністю припиняється традиційне використання твердої біомаси, яке є неефективним, часто пов'язане з вирубуванням лісів і забрудненням, що спричинило 3,2 млн передчасних смертей у 2020 р.

Використання традиційних біопалив, які виробляються з продовольчих культур, також істотно скорочується до 2050 р.

Із загального обсягу світового попиту на біоенергію у 2050 р. за цим сценарієм близько 60 % повинно припадати на сучасну тверду біоенергію, решта на рідкі біопалива та біогаз включно з енерговитратами на їхнє виробництво,

У секторі електроенергетики попит на тверду біоенергію у 2050 р. повинен становити близько 35 ЕДж. Біоенергія забезпечуватиме лише 5 % загального виробництва електроенергії у 2050 р., проте є важливим «гнучким» низьковуглецевим джерелом, що доповнює переривчасту генерацію від сонячних і вітрових електростанцій. У промисловому секторі, де попит на тверду біоенергію у 2050 р. досягає 20 ЕДж, вона використовується для покриття потреб у високотемпературному теплі, які складно електрифікувати, зокрема у виробництві паперу та цементу. У 2050 р. біоенергія задовольняє 60 % енергетичного попиту в

секторі виробництва паперу та 30 % у виробництві цементу.

Загальна площа земель для виробництва біоенергії у сценарії NZE зростає на 80 млн га до 2050 року. З цього приросту 30 млн га припадають на нові ліси, що збільшують світову лісову площу на 1 %, так що плантації для біоенергії складатимуть 6 % від загальної площі лісів у 2050 р. – такий же показник, як і на даний час. Решта 50 млн га припадає на короткоротаційні деревні культури. Загальна площа земель для короткоротаційних деревних культур і конвенційних біоенергетичних культур становитиме 140 млн гектарів у 2050 р. Із цього обсягу 70 млн га припадають на маргінальні землі або пасовища, а 70 млн га на ріллю, тобто таку ж площу, яка тепер використовується для виробництва біоенергії.

Загальне використання земель для біоенергетики у сценарії NZE залишається нижчим за оцінені діапазони потенційної доступності земель із повним урахуванням обмежень сталості, включно з необхідністю захисту осередків біорізноманіття та досягненням Цілі сталого розвитку ООН №15 щодо збереження біорізноманіття й землекористування, особливо шляхом різкого скорочення вирубування лісів. Водночас сертифікація біоенергетичних продуктів і суворий контроль за тим, які землі можуть бути перетворені на плантації та короткоротаційні деревні культури для біоенергії, є критично важливими для уникнення конфліктів у сфері землекористування.

Досягнення нульових чистих (net) викидів CO₂ від енергетики та промислових процесів у сценарії NZE не передбачає використання компенсацій поза межами енергетичного сектору. Водночас сільське господарство, лісове господарство та інше землекористування (AFOLU) відповідають за приблизно 5–6 млрд тонн викидів CO₂ і, таким чином, є другим за величиною джерелом викидів після енергетики. Ці викиди також необхідно скорочувати для обмеження зміни клімату. Хоча заходи щодо скорочення викидів AFOLU не є прямо включеними до сценарію NZE (який зосереджується на енергетиці та промисловості), збільшення виробництва короткоротаційної деревної біоенергії на маргінальних землях і пасовищах, а також перехід від традиційних культур до передових деревних біоенергетичних культур дозволили б секвеструвати близько 190 Мт CO₂ до 2050 р., зменшивши викиди AFOLU на 140 Мт CO₂ порівняно з теперішнім рівнем.

Водночас для повної ліквідації викидів CO₂ з AFOLU потрібні додаткові заходи. Скорочення вирубування лісів на дві третини до 2050 р., впровадження вдосконалених практик управління лісами (як плантаціями для біоенергії, так і природними лісами) та висадження близько 250 млн га нових лісів дозволили б зробити баланс викидів CO₂ від AFOLU від'ємним уже до 2040 р. та забезпечили б поглинання 1,3 Гт CO₂ щороку до 2050 р.

Слід зазначити, що, за сценарієм NZE by 2050, 60 % необхідних обсягів біомаси становитимуть відходи та побічні продукти, зокрема аграрні й лісогосподарські рештки, промислові побічні потоки та органічні муніципальні відходи. Решта 40 % забезпечува-

тиметься за рахунок культур і дерев, які вирощуються разом із продовольчими чи кормовими культурами або на спеціалізованих біоенергетичних плантаціях. Збільшення виробництва короткоротаційної деревної чи трав'яної біомаси на маргінальних землях та пасовищах також позитивно впливатиме на скорочення викидів від землекористування.

Негативні викиди, зокрема з біоенергетики в поєднанні з технологіями уловлювання та зберігання вуглецю (BECCS – Bioenergy with carbon capture and storage), створюють можливість компенсувати залишкові викиди в складних для декарбонізації секторах, включно із сільським господарством. Біомаса також може робити вагомий внесок у пом'якшення змін клімату через біочар – побічний продукт термічної обробки. Вуглець у біочарі є надзвичайно стабільним і може зберігатися сотні або навіть тисячі років при внесенні до ґрунтів.

Зазначається, що заготівля деревини (для матеріалів та енергії), як складова сталого лісокористування, відновлює лісові системи, підтримує ріст дерев і поглинання ними вуглецю з атмосфери, зміцнює здоров'я лісів та зменшує ризики й наслідки лісових пожеж та інших природних загроз, таких як шторми, посухи чи комахи-шкідники. У поєднанні з BECCS це фактично переводить біогенний вуглець із нестійких наземних резервуарів до більш надійних геологічних сховищ (IEA Bioenergy, 2025).

У сценарії Net-Zero Emissions by 2050 прагнули, щоб піковий рівень загального попиту на первинну біоенергію – включно з втратами під час перетворення біомаси на корисні палива – залишався в межах найнижчих оцінок глобального стійкого біоенергетичного потенціалу в 2050 р., а саме близько 100 ЕДж. Попит на біоенергію в глобальному сценарії NZE by 2050 є нижчим за всі порівнянні сценарії Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату (IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change), узгоджені з метою утримання потепління на рівні 1,5 °C. У сценаріях IPCC використовується медіанне значення у 200 ЕДж біоенергії у 2050 р. (International Energy Agency, 2021b).

Хоча підходи RFS, RED, IEA Net Zero by 2050, IPCC різняться в допустимих сценаріях і темпах впровадження біоенергетики, їхня спільна мета полягає у зниженні викидів парникових газів. Остаточним критерієм ефективності таких стратегій є не тільки обсяги виробленої біоенергії, але й зміни в глобальному вуглецевому балансі, що безпосередньо визначає концентрацію CO₂ в атмосфері.

Концентрація CO₂ в атмосфері зросла майже на третину з 1750 р. В атмосфері міститься близько 875 Гт вуглецю (C), з яких приблизно 300 Гт є надлишковими (Friedlingstein et al., 2023). Кумулятивні викиди в атмосферу від використання викопного палива становлять 484 Гт C (Canadell et al., 2021). З іншого боку, від початку розвитку сільського господарства з верхніх двох метрів ґрунту в усьому світі могло бути втрачено до 133 Гт C (Sanderman et al., 2017). Крім того, людська діяльність спричинила зменшення загальної кількості наземної біомаси приблизно вдвічі — з 916 Гт C до теперішніх 450 Гт C (Smil, 2011; Erb et

al., 2018). Значні втрати спостерігалися ще до 1800 р. З 466 Гт С загальних втрат близько 350 Гт С було втрачено до індустріалізації. Із цієї втрати 53–58 % припадає на пряме вирубування лісів та інші зміни земного покриву, а 42–47 % на практики землекористування, що не змінюють тип рослинного покриву, тобто ліси залишаються лісами, а луки лугами. Мало в кого викликає сумнів те, що дефорестація має негативний вплив на клімат. Але й експлуатаційні ліси та луки під випасом зберігають приблизно на третину менше вуглецю, ніж недоторкані. Ці дані ставлять під сумнів припущення, що таке використання землі має незначний вплив порівняно з вирубуванням лісів, та спростовують уявлення про те, що заготівля біомаси для енергетики є кліматично нейтральною (Erb et al., 2018).

Викиди в атмосферу парникових газів пов'язують з індустріалізацією та використанням викопного палива, але лише після 1950 р. емісія вуглекислого газу від спалювання викопного палива почала перевищувати емісію від змін землекористування (Reick et al., 2010), при чому на той час три чверті енергопотреб забезпечувалися викопним паливом, а чверть біоенергією. У часи, коли майже вся емісія парникових газів була від зміни землекористування, біоенергія і забезпечувала основні енергопотреби. Показано (Yang et al., 2023), що за останні 300 р. у Китаї 70 % викидів вуглецю в атмосферу від землекористування та змін покриву землі викликані використанням деревини як палива та матеріалу, а 30 % – перетворенням лісів та лугів на сільськогосподарські угіддя. На основі даних з енергоспоживання, внеску різних джерел енергії в енергоспоживання та емісії парникових газів можна зробити висновок, що біоенергія зовсім не була екологічно нейтральною, а зумовлювала ще більшу емісію парникових газів на одиницю енергії, ніж викопне паливо. Встановлено (He et al., 2014), що в доіндустріальну еру середня температура поверхні Землі підвищилася на 0,73 °C, при цьому антропогенна зміна земельного покриву викликала підвищення температури на 0,9 °C, а зниження на 0,17 °C зумовлено глобальним похолоданням у Голоцені. А в індустріальну добу середня температура підвищилася на 0,8 °C.

Близько половини антропогенних викидів вуглекислого газу поглинають наземні екосистеми (31 %) та океан (23 %) (Canadell et al., 2021), але некомпенсовані емісії становлять проблему, яку необхідно вирішувати.

Як зазначено вище, сумарні викиди вуглецю в атмосферу від землекористування можуть бути співмірними з викидами від викопного палива.

З іншого боку, біомаса та ґрунти мають величезний потенціал для зменшення наслідків зміни клімату.

Відновлення втрачених внаслідок діяльності людини біомаси та вуглецю ґрунтів, що зумовить зменшення його концентрації в атмосфері, постає як приваблива можливість для пом'якшення кліматичних змін. Здавалось би, що можна виростити нові ліси, що з часом поглинуть сотні гігатонн вуглецю, і так вплинути на розкладання відмерлої біомаси, щоб не весь вуглець, що утворюється в процесі розкладання, виділявся в атмосферу, а частина залишалася надовго в

ґрунті, як це й відбувалося в процесі природного формування ґрунтів.

Потенціал секвестрації вуглецю наземними екосистемами залежить від типу та стану екосистеми, а саме її видового складу, структури та, у випадку лісів, розподілу вікових груп. Важливими є також умови місця розташування, включно з кліматом і ґрунтами, природні пертурбації та режими господарювання. Для аналізу вуглецевого балансу необхідно розрізнити основні показники: GPP, NPP, NEP та NBP (Watson et al., 2000; Friedlingstein et al., 2023). Валовий первинний продукт (Gross Primary Production (GPP)) означає загальну кількість вуглецю, зафіксованого рослинами в процесі фотосинтезу в екосистемі, наприклад у деревостані. Глобальний GPP оцінюється приблизно в 120 Гт С на рік. Чистий первинний продукт (Net Primary Production (NPP)) означає чисте утворення органічної речовини рослинами в екосистемі, тобто GPP за вирахуванням втрат через дихання рослин (автотрофне дихання). Глобальний NPP оцінюється приблизно в половину GPP, тобто близько 60 Гт С на рік. Чиста продукція екосистеми (Net Ecosystem Production (NEP)) визначає чисте накопичення органічної речовини або вуглецю в екосистемі; NEP є різницею між швидкістю утворення живої органічної речовини (NPP) та швидкістю розкладу мертвої органічної речовини (гетеротрофне дихання, RH). Гетеротрофне дихання включає втрати через травлення тваринами та розклад органічних решток ґрунтовою біотою. Глобальний NEP оцінюється приблизно в 10 Гт С на рік. NEP можна вимірювати двома способами: перший – оцінюючи зміни в запасах вуглецю в рослинності та ґрунті; другий – інтегруючи потоки CO₂ у рослинності та з рослинності (чистий обмін екосистеми (the net ecosystem exchange (NEE)) за допомогою приладів, розташованих над рослинним покривом. Чиста продукція біому (Net Biome Production (NBP)) визначає чисте утворення органічної речовини в регіоні, що містить різні екосистеми (біом), і включає, крім гетеротрофного дихання, інші процеси, що призводять до втрат живої та мертвої органічної речовини (збір урожаю, вирубування лісів, пожежі тощо). NBP застосовується для оцінки чистого вуглецевого балансу великих територій (100–1000 км²) та протягом тривалого часу (кілька років і більше). Вважається, що в минулому NBP був близький до нуля. Зараз він відмінний від нуля. Порівняно з загальними потоками між атмосферою та біосферою, глобальний NBP є відносно невеликим; для десятиліття 1989–1998 рр. його оцінювали в 0,7 ± 1,0 Гт С на рік – приблизно 1 % NPP та близько 10 % NEP.

Певне поведіння з відмерлою біомасою (агровідходи, муніципальні біовідходи та ін.) могло би вплинути на NPP, зокрема через зміни в кількості ґрунтового вуглецю.

ґрунти мають потенціал для повторного накопичення значних обсягів вуглецю. Світовий ґрунтовий резервуар містить близько 3000 Гт вуглецю із середнім віком 3100 років, визначеним за допомогою радіоізотопного аналізу (Köchy et al., 2015). У ґрунтах міститься більше вуглецю, ніж у біомасі та атмосфері. Існують наукові припущення, що можна підвищити

вміст вуглецю в ґрунтах ще на 750–1500 Гт (Lorenz & Lal, 2005). Видається доцільним вплинути на потоки вуглецю так, щоби при розкладанні рослинної біомаси не весь вуглець знову просто виділювався в атмосферу, а частина його була секвестрована в ґрунті, підвищивши його якість, або ж була використана для виробництва енергії, перш ніж у вигляді вуглекислого газу знову потрапить в атмосферу.

Французька ініціатива “4 per 1000” була підписана понад 100 країнами. Її суть полягає в тому, що щорічне підвищення вмісту вуглецю в ґрунтах на 4 % здатне зупинити щорічне зростання CO₂ в атмосфері, що є основним чинником парникового ефекту та кліматичних змін (4 per 1000 Initiative, 2015; Paustian et al., 2016; Minasny et al., 2017; Lal, 2018). Це виглядає як блискуча ідея – якби її вдалося реалізувати. Однак, навіть не враховуючи фізичних бар’єрів, слід розуміти, що для досягнення повного ефекту ініціатива “4 per 1000” має бути втілена на всіх землях планети й тривати десятиліттями. Щоб реалізувати це зобов’язання, необхідно враховувати, що у світі існує приблизно 570 мільйонів фермерських господарств і 3 мільярди сільських мешканців, які ними опікуються. При цьому культурні бар’єри для впровадження програм з охорони ґрунтів існують навіть у США – одній із найбагатших країн світу, а в менш розвинених або економічно вразливих державах такі виклики будуть ще масштабнішими. Фермери, як правило, належать до найконсервативніших верств населення. Багато з них з підозрою або навіть ворожістю ставляться до вчених, які просувають екологічно вмотивовані ідеї. Та й поки що важко формулювати однозначні рекомендації, бо більша кількість внесеної органічної маси не завжди гарантує збагачення ґрунту вуглецем. Ключовим аспектом такої невизначеності є явище праймінгу (*priming effect*) – зміна швидкості мінералізації «старого» ґрунтового органічного вуглецю (SOC – *soil organic carbon*) у відповідь на надходження нових, більш лабільних органічних субстратів або кореневих ексудатів. Розрізняють праймінг позитивний, коли швидкість розкладання органічного ґрунтового вуглецю зростає, та негативний, коли знижується. Розкладання старих органічних сполук ґрунту було зафіксований ще в ранніх дослідях із зеленими добривами (Löhmis, 1926) і згодом праймінг-ефект був систематично описаний та інтерпретований в інших роботах (Bingeman et al., 1953; Fontaine et al., 2003; Fontaine et al., 2007; Kuzyakov, 2010). Сучасні експериментальні дослідження показують, що позитивний праймінг (тобто прискорене вивільнення старого ґрунтового вуглецю) виявляється досить поширеним явищем (Xu et al., 2024). Ефекти праймінгу при розкладанні органічної речовини ґрунту є критично важливими для визначення вуглецевого балансу та обігу в ґрунті. Проте загальний напрям та інтенсивність праймінгу ґрунту залишаються предметом дискусій. Було проведено метааналіз на основі 9296 парних спостережень із 363 первинних досліджень, щоб визначити інтенсивність і загальний напрям ефектів праймінгу залежно від типу сполуки, доступності поживних речовин та типу екосистеми (Xu et al., 2024). Виявлено, що внесення свіжого вуглецю ви-

кликало позитивні ефекти праймінгу (+37 %) у 97 % парних спостережень. Лабільні сполуки спричиняли більші ефекти праймінгу (+73 %), ніж складні органічні сполуки (+33 %). Додавання поживних речовин (наприклад, сполук азоту та фосфору) разом з органічними сполуками зменшувало інтенсивність ефектів праймінгу порівняно зі сполуками без азоту та фосфору, що відображає явище “добування поживних речовин із ґрунтової органічної речовини” як один із основних механізмів праймінгу. Варто зазначити, що тундрові ґрунти, дно озер, болота та вулканічні ґрунти демонстрували значно більші ефекти праймінгу (+125 %) порівняно з ґрунтами під лісами, сільськогосподарськими угіддями та луками (+24 ... +32 %). Ці результати підкреслюють, що позитивні ефекти праймінгу переважають у більшості ґрунтів у глобальному масштабі. Автори наголошують, що терміново необхідна оптимізація стратегій внесення свіжої органічної речовини та поживних речовин, щоб компенсувати пришвидшений обіг органічного вуглецю та можливі втрати, спричинені ефектом праймінгу (Xu et al., 2024).

Щодо масштабної рефореестації та афореестації, то попри інтуїтивну привабливість, вони стикаються з серйозними практичними та біофізичними обмеженнями.

Наявні ліси утримують близько 45 % органічного вуглецю суходолу у своїй біомасі та ґрунтах (Bonan, 2008). Сумарно старовікові ліси та ліси, що регенерують, щороку акумулюють приблизно 2 Гт С, роблячи суттєвий внесок у наземне вуглецеве поглинання (*carbon sink*) (Pugh et al., 2019). Недавній аналіз показав, що висадження дерев на додаткових 0,9 млрд га могло б зафіксувати 205 Гт С (Bastin et al., 2019), тоді як надлишок вуглецю в атмосфері становить близько 300 Гт С. Для досягнення цього потенціалу зберігання вуглецю знадобиться понад 100 років, якщо виходити з типової швидкості акумуляції вуглецю в деревині — 2 т С/га/рік (Bonan, 2008). Крім того, ця оцінка, імовірно, перебільшує як потенціал фіксації вуглецю лісами (Lewis et al., 2019), так і доступність придатних земель та водних ресурсів для відновлення лісів (Veldman et al., 2019). Більш обережні підходи свідчать, що масштабні заходи з афореестації та рефореестації можуть вилучити з атмосфери від 40 до 100 Гт С після досягнення зрілості лісами (Lewis et al., 2019; Veldman et al., 2019) — величина значна, але вона відповідає лише одному десятиліттю теперішніх антропогенних викидів.

Парадоксально, але висаджування дерев у деяких нелісових екосистемах може підвищувати викиди вуглецю та спричиняти потепління. У високих широтах низькоросла місцева рослинність часто вкривається шаром снігу, що здатний відбивати сонячні промені, тоді як вищі темні дерева поглинають більше сонячної енергії й викликають локальне потепління (Jackson et al., 2008; Winckler et al., 2019). Осиплення та наступна афореестація торфовищ часто призводять до значних втрат вуглецю з ґрунтової органіки, що може переважати над вуглецевим поглинанням нових насаджень (Sloan et al., 2018). Висаджування дерев у саванах та степових екосистемах може підвищувати

ризик пожеж, що призводить до втрати вуглецю з рослинності та ґрунтів (Veldman et al., 2019). Проникнення деревної рослинності в природні трав'яні біоми спричиняє сумарну втрату вуглецю екосистеми (Jackson et al., 2002). Натомість рефорестація в тропіках, які історично були вкриті лісами, є найбільш ефективною для зменшення атмосферного CO₂ (Griscom et al., 2020). Належне управління, таке як профілактика пожеж, проріджування та підтримка родючості ґрунту, визначає, чи залишатимуться насаджені ліси поглиначами вуглецю, чи перетворяться на джерела CO₂ після пертурбацій (Waring et al., 2020).

Слід зазначити, що в моделюваннях імпульсного вилучення вуглекислого газу з атмосфери показано, що $23 \pm 6\%$ зі 100 Гт С, вилучених з атмосфери, залишаються поза нею через 80–100 років після миттєвого вилучення, решта компенсується вивільненням вуглекислого газу із суходолу ($49 \pm 12\%$) та океану ($29 \pm 7\%$) (Canadel et al., 2021). Цей rebound ефект означає, що при вилученні вуглекислого газу з атмосфери близько 80 % повертається назад.

Якщо CO₂ вилучається з атмосфери шляхом нарощування біомаси дерев, його концентрація зменшується не на ту величину, що відповідає приросту біомаси, оскільки океани та ґрунти вивільняють частину вуглецю. Якщо припустити, що рефорестація додатково зафіксує 60–90 Гт С у деревній біомасі, це знизить концентрацію атмосферного CO₂ лише на 17–31 ppm (House et al., 2002). Натомість перетворення всіх наявних лісів на пасовища або орні землі спричинило б зростання концентрації CO₂ в атмосфері на 130–290 ppm, що підкреслює критичну важливість збереження існуючих лісів (House et al., 2002).

Отже, біофізичні зв'язки, зокрема зміни альбедо, доступності води та кругообігу поживних речовин, rebound ефект, а також соціальні обмеження, пов'язані з конкуренцією за землю, роблять масштабну афорестацію складною та невизначеною стратегією (Jackson et al., 2008; Smith et al., 2016). Водночас ліси забезпечують значні супутні вигоди, що виходять за межі поглинання вуглецю, включаючи збереження біорізноманіття, регуляцію водних ресурсів, підтримку родючості ґрунтів. Висаджування дерев слід інтегрувати у стратегії стримування змін клімату та максимізації екологічних і суспільних вигод без відтермінування відмови від викопного палива.

Зміни землекористування мають вирішальне значення для кліматичної політики, оскільки природна рослинність і ґрунти накопичують великі запаси вуглецю, а їхні втрати внаслідок розширення сільськогосподарських угідь разом із викидами від агропромисловості забезпечують приблизно 20–25 % емісії парникових газів. Обмеженість кількості землі означає, що реалізація таких стратегій вимагає підвищення ефективності землекористування у світовому масштабі – як у зберіганні вуглецю, так і у виробництві продовольства. Більшість кліматичних стратегій передбачають збереження або збільшення запасів вуглецю на землі одночасно із задоволенням продовольчого попиту, який, за прогнозами, має зрости більш ніж на 50 % до 2050 р.

(Searchinger et al., 2018) пропонують індекс вуглецевої вигоди (*carbon benefits index*), який вимірює, як зміни в типах продукції, обсягах виробництва та виробничих процесах на одиниці площі землі сприяють глобальній спроможності зберігати вуглець і зменшувати сукупні викиди парникових газів. Цей індекс не оцінює біорізноманіття чи інші екосистемні цінності – їх слід досліджувати окремо. Врахування цих аспектів може мати значно важливіші наслідки для клімату, ніж раніше вважалося, бо стандартні методи оцінки впливу землекористування на викиди парникових газів систематично недооцінюють потенційну здатність землі накопичувати вуглець у разі її незалучення до сільського господарства. У випадку біоенергетичних культур слід враховувати не тільки вихід енергії з одиниці площі, але й вуглецевий баланс при різних варіантах використання землі.

Вплив зміни землекористування на запаси ґрунтового вуглецю становить важливу проблему в контексті міжнародних політик щодо скорочення викидів парникових газів.

Для розуміння наслідків зміни землекористування дуже важливе значення має високо цитована робота (Guo & Gifford, 2002). Авторами здійснено огляд літератури щодо впливу змін землекористування на запаси ґрунтового вуглецю і подано результати метааналізу даних із 74 публікацій (537 спостережень). Цей метааналіз показує, що запаси ґрунтового вуглецю зменшуються після переходу від пасовищ до плантацій (–10 %), від природних лісів до плантацій (–13 %), від природних лісів до сільськогосподарських угідь (–42 %) та від пасовищ до ріллі (–59%). Навпаки, запаси ґрунтового вуглецю зростають після переходу від природного лісу до пасовищ (+8 %), від ріллі до пасовищ (+19 %), від ріллі до плантацій (+18 %) та від ріллі до вторинного лісу (+53 %). Загалом, там, де певна зміна землекористування спричиняла зниження запасів ґрунтового вуглецю, зворотний перехід зазвичай призводив до їх збільшення, і навпаки. Ось деякі висновки, отримані в цьому метааналізі літератури щодо змін запасів ґрунтового вуглецю після змін землекористування. Якщо ліси вирубуються під пасовища, запаси ґрунтового вуглецю загалом не зменшуються й мають тенденцію до збільшення в регіонах з річною кількістю опадів 2000–3000 мм. Коли пасовища переходять у ліси, запаси ґрунтового вуглецю зменшуються під сосновими плантаціями, але не змінюються під плантаціями листяних порід або при природній регенерації вторинного лісу. Якщо природний ліс вирубується під плантаційне лісівництво, запаси ґрунтового вуглецю не змінюються під листяними плантаціями й під сосновими плантаціями в зонах з невеликою кількістю опадів, але зменшуються в регіонах із опадами понад 1500 мм на рік. Коли природний ліс розорюється під сільськогосподарські угіддя, запаси ґрунтового вуглецю у верхньому шарі ґрунту зменшуються вдвічі, тоді як на глибині суттєвих змін не спостерігається. При поверненні ріллі в ліси відбувається відновлення запасів ґрунтового вуглецю: це часткове відновлення у випадку плантаційного лісівництва і може стати повним у разі природної регенерації вторинного лісу. Коли рілля пере-

водиться під пасовища, запаси ґрунтового вуглецю зростають на глибинах до 100 см, проте відносний приріст зменшується з глибиною (Guo & Gifford, 2002).

Є кілька метааналізів щодо змін землекористування при переході до вирощування багаторічних деревних та трав'яних енергетичних культур. Зокрема (Harris et al., 2015) провели метааналіз на основі 27 публікацій, що стосуються змін у землекористуванні з метою виробництва біоенергії. За результатами аналізу 138 оригінальних досліджень показано, що перехід від ріллі до короткоротаційних лісонасаджень (тополя або верба) або багаторічних злакових культур (переважно міскантус або свічграс) призводив до зростання органічного вуглецю ґрунту (SOC – *soil organic carbon*) на $+5,0 \pm 7,8\%$ та $+25,7 \pm 6,7\%$ відповідно. Перехід від лугів до короткоротаційних деревних насаджень загалом мав нейтральний ефект ($+3,7 \pm 14,6\%$), тоді як перехід від лугів до багаторічних трав'яних культур та від лісу до короткоротаційних деревних насаджень супроводжувався зменшенням SOC ($-10,9 \pm 4,3\%$ та $-11,4 \pm 23,4\%$ відповідно). Недостатня кількість парних даних не дозволила провести строгий метааналіз для викидів парникових газів. Однак узагальнені дані про загальні тенденції із 188 оригінальних досліджень показали як зростання, так і зменшення викидів CO₂ із ґрунту після переходу від лісів та ріллі до багаторічних трав'яних культур (Harris et al., 2015).

(Siddique et al., 2023) провели метааналіз, що узагальнює дані 51 публікації (351 спостереження на 77 ділянках), розташованих у різних педо-кліматичних умовах, з метою вивчення впливу переходу до багаторічних культур на накопичення органічного вуглецю в ґрунті порівняно з двома типовими системами вирощування однорічних культур (монокультура та сівзміна). Результати показали, що багаторічні культури істотно збільшували запаси органічного вуглецю в ґрунті на 16,6% і 23,1% на глибині 0–30 см порівняно з монокультурою та сівзміною відповідно. Порівняно з обома системами вирощування однорічних культур, багаторічні культури суттєво підвищували запаси органічного вуглецю в ґрунті незалежно від їхнього функціонального фотосинтетичного типу (C3, C4 або проміжні C3-C4) та типу рослинності (деревна чи трав'яниста). Серед інших факторів суттєвий вплив на вміст органічного вуглецю в ґрунті мав рівень рН; натомість вплив ґрунтової текстури не виявився статистично значущим. Результати також засвідчили, що вплив тривалості вирощування багаторічних культур мав сигмоїдний характер: запаси органічного вуглецю в ґрунті зростали приблизно до 20 років, після чого досягали рівня стабілізації (Siddique et al., 2023).

У дослідженні (Wu et al., 2024) проведено всебічний глобальний метааналіз з метою кількісного визначення швидкості секвестрації SOC та виявлення її просторово-часових закономірностей при вирощуванні багаторічних енергетичних культур. Результати показали, що у світовому масштабі вирощування цих культур забезпечує швидкість секвестрації SOC на рівні 0,21 т/га/рік. Швидкість секвестрації SOC при

вирощуванні переніалів спочатку зростала з віком культури, але згодом знижувалася, досягаючи піку на дев'ятий рік. Швидкість секвестрації SOC була вищою у глибших шарах ґрунту, особливо на глибині 30–60 см, порівняно з верхнім шаром (0–30 см).

Отже, загалом при переході від ріллі до багаторічних деревних та трав'янистих культур спостерігається зростання SOC. Однак залишаються прогалини в знаннях, особливо щодо дуже довготривалої динаміки, глибокого ґрунтового вуглецю та чистого балансу парникових газів (включаючи N₂O/CH₄), а також рівня SOC після повернення до ріллі та вирощування традиційних сільгоспкультур. Недавні дослідження показують, що ліквідація багаторічних біоенергетичних плантацій може спричинити додатковий викид вуглецю назад у ґрунт. (Martani et al., 2023) проаналізували 11-річний експеримент із шістьма видами енергетичних культур на маргінальних землях (три деревні культури та три трав'янисті), які були переорані та переведені в традиційні с/г культури (Martani et al., 2023). Несподівано вони виявили більший приріст SOC після повернення до традиційних культур, ніж під час періоду плантації. Упродовж двох років після закладу переніалів SOC значно зростав під усіма шістьма видами без суттєвих відмінностей між ними. Було секвестровано $\approx 5,35$ т С/га за 11 років плантації, проте ще $\approx 10,95$ т С/га додатково накопичилося за два роки після перекопування. Моделювання за допомогою моделі ECOSSE пов'язало цей різке зростання з включенням у верхні шари ґрунту підземної біомаси (коренів і кореневищ), яка швидко розкладалася та гумусувалася. Проте цей ефект може бути тимчасовим і потрібні довготривалі спостереження (Martani et al., 2023).

Біоенергетика може бути ефективно поєднана з очищенням забруднених ґрунтів (Grzegórska et al., 2020; Vázquez-Núñez et al., 2021; Amabogha et al., 2023; Bao et al., 2025; Wijekoon et al., 2025).

Повномасштабна війна в Україні спричинила безпрецедентну шкоду ґрунтовому покриву, викликану вибухами боєприпасів, витоками пально-мастильних матеріалів масовими руйнуваннями інфраструктури. Щонайменше 5 млн га ґрунтів містять високі концентрації забруднювачів, серед яких свинець (Pb), арсен (As), ртуть (Hg), кадмій (Cd), хром (Cr), мідь (Cu), цинк (Zn), нікель (Ni), селен (Se), уран (U), продукти нафтового походження, діоксини, нітроефіри, пер- та поліфторалкільні речовини, 2,4-динітротолуол, 2,4,6-тринітротолуол (TNT), гексагідро-1,3,5-тринітро-1,3,5-тріазоциклогексан (RDX), октагідро-1,3,5,7-тетратітро-1,3,5,7-тетразоцин, 2,4-динітротолуол, 1,3,5-тринітробензол, 2-аміно-4,6-динітротолуол, 4-аміно-2,6-динітротолуол. Більшість із цих речовин стійкі до біологічного розкладу й через ґрунтові води та трофічні ланцюги можуть створювати загрозу на ще більших площах (Syta & Taran, 2022; Datsko et al., 2024; Solokha et al., 2024; Bonchkovskiy et al., 2025).

Гетерогенність забруднювачів та величезні площі становлять значні логістичні труднощі для екскавації ґрунтів та деконтамінації їх фізичними та хімічними методами. Оскільки тепер забруднені ґрунти непридатні для вирощування продовольчих культур то їх

фітореMediaція (використання рослин та їхніх ризосфер для поглинання та знешкодження токсичних речовин) могла би бути дешевшим способом очищення, який, крім того, міг би бути джерелом енергії чи сировини для хімічної промисловості. Високотемпературна обробка біомаси (>850 °C) ефективно руйнує органічні забруднювачі, але при цьому в атмосферу можуть потрапляти леткі метали, як ртуть та арсен, тому необхідними є системи фільтрації з електростатичними осаджувачами, тканинними фільтрами та мокрими скруберами (Song & Park, 2017; Mukherjee et al., 2025).

Рекуперація енергії при утилізації біомаси з поглинутими забруднювачами, поєднана з технологіями BECCUS (*Bioenergy with carbon capture and storage or utilization* – біоенергетика з уловлюванням вуглецю та його захороненням чи утилізацією) могла би принести ще й додаткову користь.

Ключовими у фітореMediaції ґрунтів є рослини-гіперакумулятори, які здатні накопичувати надзвичайно високі кількості певних токсикантів. Деякі види рослин, як-от *Thlaspi caerulescens*, *Alyssum murale*, *Pteris vittata*, можуть концентрувати метали, такі як цинк, кадмій, нікель (Suman et al., 2018; Mocek-Płóćiniak et al., 2023; Oubohssaine & Dahmani, 2024; Lavanya et al., 2024; Islam et al., 2024; Rahman et al., 2024; Lee et al., 2025).

Але для досягнення оптимальної інтеграції біоенергетики з фітореMediaцією в сучасній рослинній біотехнології прагнуть поєднати ознаки, які часто не пов'язані в природних таксонів. Це підвищена здатність до поглинання та накопичення забруднювачів (фенотип “гіперакумулятора”), розгалужена коренева система, що поглинає та транспортує забруднювачі з глибоких горизонтів ґрунту, та значні обсяги біомаси. На молекулярному рівні найчастіше згадуються мішені для модифікації, що наведені нижче.

Модифікація мембранних транспортних систем – головним чином представників родин НМА, ZIP та NRAMP – спрямована на підвищення поглинання металів коренями та їх транспортування від кореня до надземної частини, що забезпечує надходження забруднювачів у придатну для збирання біомасу (Kotrba et al., 2009; Ozyigit et al., 2021). Посилення внутрішньоклітинного хелатування та вакуолярного секвестрування (наприклад, шляхом підвищеного синтезу фітохелатинів, глутатіону та металотіонінів або через активацію транспортерів тонопласту) підвищує толерантність рослин і зменшує цитотоксичність, дозволяючи безпечно накопичувати більші кількості металів у тканинах пагонів (Kotrba et al., 2009; Ozyigit et al., 2021). Зміцнення антиоксидантних і стресіндукованих систем (наприклад, супероксиддисмутази, пероксидази та білків теплового шоку) зменшує супутні пошкодження, які інакше обмежували б виробництво біомаси на забруднених ґрунтах. Маніпуляція локусом DEEPER ROOTING 1 (DRO1) або його ортологами є підтвердженим шляхом до збільшення глибини та розгалуження корневих систем і є перспективною трансляційною мішенню для багаторічних енергетичних культур (Uga et al., 2013; Kitomi et al., 2020). Молекулярний аналіз природних гіперакумуля-

торів вказує на участь АТФаз Р-типу (родина НМА) та споріднених транспортерів у ефективному завантаженні ксилеми та накопиченні металів у надземних органах; проте надекспресія транспортерів сама по собі може порушувати гомеостаз металів, якщо вона не супроводжується підвищенням хелатуванням (фітохелатини/металотіоніни), вакуолярним транспортом та антиоксидантним буферуванням (Hanikenne et al., 2008; Nouet et al., 2015; Aryal, 2024).

У випадку нітроароматичних вибухових речовин (TNT, RDX) поглинання тканинами рослин, як правило, обмежене, і реMediaція ґрунту здебільшого залежить від мікробного розкладання в ризосфері; тому біоаугментація та інженерія ризосфери є ключовими доповненнями до рослинних ознак (U.S. EPA, 2000). Однак є і певні успіхи на шляху створення генномодифікованих рослин, що можуть використовуватися для очищення ґрунтів, забруднених вибуховими речовинами (Kumar, 2013). Трансгенний тютюн, що експресує бактеріальну пентаеритриттетранітратредуктазу, є першим прикладом різкого підвищення толерантності до вибухових речовин – тринітрогліцерину та TNT. Трансгенні рослини тютюну та *Arabidopsis*, що експресують бактеріальні нітроредуктази та ціанобактеріальні флаводоксини, здатні детоксикувати вибухові речовини та інший подібний забруднювач – 2,4-динітротолуол. Найперспективнішим на сьогоднішній день прикладом комерційного використання трансгенних рослин для фітореMediaції є трансгенна тополя, здатна до деградації TNT. Результати з реMediaції RDX були отримані завдяки експресії бактеріальної системи *xplA-xplB* в *Arabidopsis*, яка продемонструвала здатність видаляти насичувальні концентрації RDX із рідкої фази та ґрунтового фільтрату. Це багатобічне відкриття сприяло перенесенню технології в такі рослини, як гібриди тополі, які швидко ростуть і продукують відносно велику біомасу. Крім того, трансгенні багаторічні трав'яні культури з підвищеною стійкістю до вогню та механічних пошкоджень можуть бути використані для реMediaції RDX. Такі трав'яні культури також здатні витримувати відносно високі концентрації TNT. Крім того, дослідження показали, що трансгенні осики, які експресують бактеріальну нітроредуктазу з *Pseudomonas putida*, здатні витримувати удвічі вищий рівень забруднення TNT порівняно з немодифікованими деревами (Kumar, 2013).

Літературні дані свідчать, що створення рослин, які поєднують гіперакумуляцію, глибоку кореневу систему та високий вихід біомаси, є науково можливим і перспективним для застосування, але реалізація залежить від комплексного підходу. Подальші міжdisciplinarnі дослідження – від молекулярної фізіології та екології до оцінки життєвого циклу та соціально-економічного аналізу – необхідні, щоб перетворити експериментальні прототипи на практичні рішення.

Окрім внеску в підтримання родючості ґрунтів та видалення забруднювачів, біоенергетичні системи можуть розширювати екологічні переваги завдяки перетворенню залишкової біомаси на відновлювану енергію, водночас вирішуючи проблеми управління

відходами. Ефективне управління муніципальними біовідходами є ключовим для сталого розвитку та створення екологічних, економічних і соціальних переваг від їх переробки.

Для оцінки екологічних впливів методів управління біовідходами широко застосовується аналіз життєвого циклу. Однак через різноманіття методів переробки відходів та численність досліджень науковцям, практикам і особам, що ухвалюють рішення, буває складно обрати найбільш оптимальну модель для впровадження. В одній з недавніх робіт (Salomone et al., 2024) застосовано систематичний та бібліометричний огляд літератури для аналізу 195 статей, відібраних із бази даних Scopus, щодо управління муніципальними біовідходами та проблеми вибору найкращих практик. Це дослідження спирається на результати аналізів життєвого циклу. Серед різних методів поводження з відходами, представлених у вибірці, відкриті звалища та небезпечні полігони є найменш прийнятними. Дійсно, ці два підходи демонструють найвищі нормалізовані екологічні впливи порівняно з іншими методами, такими як безпечні полігони, спалювання з рекуперацією енергії, компостування та анаеробне зброджування (АЗ). Саме тому ці методи заборонені в багатьох країнах, у тому числі й тих, що розвиваються. Подібний висновок справедливий і для спалювання без рекуперації енергії, показано, що він має значний екологічний вплив, особливо щодо зміни клімату, але він менший, ніж у випадку захоронення на полігонах. Тому ці методи не рекомендуються для управління біовідходами. Порівняно з вищезгаданими підходами, методи безпечного захоронення та спалювання з виробництвом електроенергії забезпечують кращу екологічну стійкість. Це зумовлено тим, що вироблена електроенергія та тепло можуть компенсувати витрати енергії на процес утилізації.

Чи можуть ці технології конкурувати з компостуванням та АЗ? В одних випадках спалювання та контрольоване захоронення мали значно вищі екологічні впливи, ніж централізоване компостування та АЗ. Спалювання з виробництвом електроенергії також демонструє вищі екологічні впливи, ніж АЗ. Однак слід зазначити, що в іншому дослідженні, незважаючи на вищий вплив на зміну клімату, енергоефективність процесу спалювання трохи перевищує енергоефективність АЗ. (Kong et al., 2012), використовуючи дані штату Каліфорнія, встановили, що всі розглянуті варіанти – добре керований полігон твердих побутових відходів, компостування у відкритих валках, аеробне компостування та АЗ – зменшують обсяги викидів парникових газів порівняно з неконтрольованим скиданням відходів. Неочікувано, але саме захоронення з високим рівнем уловлювання полігонного газу забезпечило найбільше чисте (net) скорочення вуглецевих викидів на тонну відходів, за ним наступні позиції займали АЗ та компостування. Автори зауважили, що результати залежать від конкретних умов, однак загалом підкреслили ключову роль відновлення енергії та контролю виділення метану.

Яка технологія – компостування чи АЗ – є кращою? Відповідь на це питання є важливою для допомоги практикам і ухвалювачам рішень у виборі опти-

мальної моделі. Загалом результати аналізу життєвого циклу свідчать, що в багатьох випадках АЗ забезпечує кращу екологічну стійкість, ніж компостування. Автори вищезгаданого метааналізу (Salomone et al., 2024) зазначають, що рекомендовано пріоритетно використовувати АЗ для переробки харчових відходів, оскільки при цьому чисті (net) викиди менші, ніж в аеробного компостування, і вказують на екологічні переваги АЗ порівняно з компостуванням, що проводиться як на локальному, так і централізованому рівні. В іншому дослідженні, яке аналізують автори огляду, показано, що великомасштабне компостування, порівняно з АЗ, менше знижує екологічні впливи, або навіть збільшує їх. Екологічні впливи АЗ можуть ще більше знизитися за застосування двофазної системи АЗ. Така схема максимізує відновлення енергії та зменшує вплив на зміну клімату та інші екологічні показники порівняно з компостуванням, анаеробними мембранними біореакторами й традиційними безперервними зброджувальними реакторами. Однак в іншому дослідженні ця технологія виявилася трохи гіршою за компостування з точки зору зміни клімату, якості екосистем та використання викопного та ядерного палива. Це вказує на те, що екологічна ефективність може змінюватися від випадку до випадку. Незважаючи на це, АЗ зазвичай вважається кращим рішенням, ніж компостування. Крім того, автори зазначили, що інтеграція цих технологій – спочатку АЗ, а потім компостування дигестату – може стати перспективним рішенням для отримання переваг обох методів. Такий підхід демонструє кращі результати, ніж безпосереднє компостування біовідходів або лише АЗ. Це зумовлено тим, що така інтеграція дозволяє заощаджувати енергію завдяки когенераційним установкам, а також отримувати вигоди від компостування дигестату й використання його як добрива. Автори вважають, що цей підхід слід рекомендувати для управління біовідходами. Як зазначено, компостування й АЗ можна реалізовувати як на великому, так і на невеликому масштабі – централізовано чи децентралізовано. Тому важливо визначити, який формат забезпечує кращу екологічну стійкість. Встановили, що централізоване компостування валками демонструє кращі екологічні показники, ніж домашнє компостування. Аналогічні висновки отримані для централізованого анаеробного співзброджування органіки, сортованої за походженням. З іншого боку, показано, що порівняно з домашнім компостуванням промислове (централізоване) має менший вплив на закислення, евтрофікацію та зміну клімату, але більший у категоріях вичерпання абіотичних ресурсів, руйнування озонового шару, фотохімічної окисної здатності та кумулятивного енергетичного попиту. Це свідчить, що кожен масштаб має свої переваги й недоліки, і рішення слід приймати з урахуванням стану об'єктів регіону. Централізовані методи стикаються з викликами транспортування на великі відстані та високої залежності від постачання біовідходів. Децентралізована модель утилізації виявилася більш придатною для управління біовідходами (Salomone et al., 2024).

Слід зазначити, що недостатньо досліджень, які порівнювали би вплив компосту та дигестату на вміст

SOC (органічного вуглецю ґрунту), а це важливий аспект для оптимізації практик управління біовідходами та підвищення кліматичної стійкості агроекосистем.

Загалом інтеграція виробництва біоенергії з утилізацією біовідходів має потенціал знижувати навантаження на полігони, забезпечувати відновлювані джерела енергії та зменшувати викиди парникових газів. Проте досягнення максимальної екологічної та економічної ефективності потребує ретельного врахування регіональних умов та аналізу повного життєвого циклу системи.

В Україні обсяг енергії, виробленої з біомаси у 2020 р., становив 185 ПДж, при цьому тверда біомаса домінує у структурі біопалива, забезпечуючи до 70 % загального обсягу виробництва енергії, на біогаз та рідкі біопалива припадає по 15 %, агровідходи забезпечують 42 % біоенергії (Pimenow et al., 2025).

Подальші дослідження, що враховують локальні агрокліматичні, економічні й інфраструктурні особливості, необхідні для оптимальної інтеграції біоенергетики в стратегії енергетичного переходу.

Висновки

Енергетичний вихід більшості сучасних біопалив на одиницю площі поверхні залишається недостатнім, щоб розглядати їх як системоутворювальну основу енергетичного переходу до нульових викидів парникових газів. Мікрородорості демонструють значно вищу продуктивність біомаси на одиницю площі, проте низький рівень технологічної готовності та високі енергетичні витрати на культивування й переробку обмежують перспективи широкого впровадження біопалива з мікрородоростей. Лігноцелюлозна сировина наразі розглядається у довгострокових сценаріях енергетичного переходу, однак зростаючі глобальні енергетичні та сировинні потреби вимагають пошуку альтернативних джерел вуглецевих сполук із замкнутими циклами переробки, які не потребують настільки масштабної мобілізації земельних ресурсів. Водночас не слід ігнорувати можливості рекуперації енергії в процесах фітореMediaції та утилізації біовідходів, що дозволяє поєднати енергетичні та екологічні вигоди.

Щодо цільового вирощування біоенергетичних культур, то потрібно враховувати багато факторів, які не враховувалися в більш ранніх стратегіях енергетичного переходу до нульових викидів. Біоенергетика повинна розглядатися в контексті AFOLU та враховувати складні взаємодії між біомасою, ґрунтами й атмосферою.

Аналіз втрат біомаси та ґрунтового органічного вуглецю, а також рівня емісії парникових газів у доіндустріальну та індустріальну еру від AFOLU та використання вичопного палива дозволяє припустити, що сумарні викиди парникових газів могли бути співмірними, що ставить під сумнів апріорну кліматичну нейтральність біоенергетики. На даний час сектор AFOLU є джерелом емісії приблизно 22 % парникових газів, але, пов'язаний із природними екосистемами, разом з якими він розглядається, він є наразі та-

кож одним з основних *carbon sink* поряд з океанами та має потенціал до збільшення можливостей секвестрації вуглецю (зменшуючи його кількість в атмосфері), але також і ризик його втрат.

Тонкий баланс між статусом AFOLU як *carbon sink* та *carbon source* має бути у центрі наукової та політичної уваги.

Встановити, які саме зовнішні впливи покращуватимуть вуглецевий баланс (а це одна з основних цілей біоенергетики), надзвичайно складно, оскільки результати далеко не завжди інтуїтивні. Повсюдно поширений, як показали недавні дослідження (Xu et al., 2024), позитивний праймінг-ефект (втрата ґрунтами старого органічного вуглецю при внесенні нового) та неочікувані результати при афореMediaції, коли заміщення екосистем із меншою кількістю вуглецю на екосистеми, що мали би секвеструвати більшу кількість вуглецю, призводить до його втрат (Jackson et al., 2002; Veldman et al., 2019), свідчать про термінову необхідність подальших детальних досліджень проблеми з урахуванням локальних особливостей.

Подяки

Висловлюємо подяку Presidential Discretionary-Ukraine Support Grants (Simons Foundation, Award No 1030281) за фінансову підтримку проведення цього дослідження.

Відомості про конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів.

References

- 4 per 1000 Initiative (2015). The “4 per 1000” Initiative: Soils for food security and climate. URL: <https://4p1000.org/Nature+124P1000+12sdgs.un.org+12>.
- Amabogha, O. N., Garelick, H., Jones, H., & Purchase, D. (2023). Combining phytoremediation with bioenergy production: Developing a multi-criteria decision matrix for plant species selection. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30(14), 40698–40711. DOI: 10.1007/s11356-022-24944-z.
- Aryal, M. (2024). Phytoremediation strategies for mitigating environmental toxicants. *Heliyon*, 10(19), e38683. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e38683.
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., & Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070–2093. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.003.
- Bao, C., Cao, Y., Zhao, L., Li, X., Zhang, J., & Mao, C. (2025). Biofuel production from phytoremediated biomass via various conversion routes: A review. *Energies*, 18(4), 822. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/4/822>.
- Bastin, J. F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., et al. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76–79.

- URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aax0848>.
- Beringer, T., Lucht, W., & Schaphoff, S. (2011). Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. *GCB Bioenergy: Bioproducts and Sustainable Bioeconomy*, 3(4), 299–312. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2010.01088.x.
- Berndes, G., Hoogwijk, M., & van den Broek, R. (2003). The contribution of biomass in the future global energy supply: A review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy*, 25(1), 1–28. DOI: 10.1016/S0961-9534(02)00185-X.
- Bingeman, C. W., Varner, J., & Martin, W. (1953). The effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil. *Soil Science Society of America Journal*, 17(1), 34–38. DOI: 10.2136/sssaj1953.03615995001700010009x.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444–1449. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1155121>.
- Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Bonchkovskyi, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178594.
- Campbell, J. E., Lobell, D. B., & Field, C. B. (2009). Greater transportation energy and GHG offsets from bioelectricity than ethanol. *Science*, 324(5930), 1055–1057. DOI: 10.1126/science.1168885
- Canadell, J. G., Monteiro, P. M. S., Costa, M. H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P. M., Eliseev, A. V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P. K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S. & Zickfeld, K. 2021: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., & Zhou B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 673–816. DOI: 10.1017/9781009157896.007.
- Chen, P., Ilton, E. S., Wang, Z., Rosso, K. M., & Zhang, X. (2024). Global rare earth element resources: A concise review. *Applied Geochemistry*, 175, 106158. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106158.
- Chen, P., Ilton, E. S., Wang, Z., Rosso, K. M., & Zhang, X. (2024). Global rare earth element resources: A concise review. *Applied Geochemistry*, 175, 106158. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106158.
- Colla, M., Blondeau, J., & Jeanmart, H. (2022). Optimal use of lignocellulosic biomass for the energy transition, including the non-energy demand: The case of the Belgian energy system. *Frontiers in Energy Research*, 10, 802327. DOI: 10.3389/fenrg.2022.802327.
- Congressional Research Service (2023). *The Renewable Fuel Standard (RFS): An Overview* (CRS Report R43325). URL: <https://www.congress.gov/crs-product/R43325>.
- Datsko, O., Zakharchenko, E., Butenko, Y., Melnyk, O., Kovalenko, I., Onychko, V., Ilchenko, V., & Solokha, M. (2024). Ecological assessment of heavy metal content in Ukrainian soils. *Journal of Ecological Engineering*, 25(11), 100–108. DOI: 10.12911/22998993/192669.
- Delannoy, L., Longaretti, P.-Y., Murphy, D. J., & Prados, E. (2021). Assessing global long-term EROI of gas: A net-energy perspective on the energy transition. *Energies*, 14(16), 5112. DOI: 10.3390/en14165112.
- Dias, T. A. da C., Lora, E. E. S., Maya, D. M. Y., & Olmo, O. A. del. (2021). Global potential assessment of available land for bioenergy projects in 2050 within food security limits. *Land Use Policy*, 105, 105346. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105346.
- Dijkman, T. J., & Benders, R. (2010). Comparison of renewable fuels based on their land use using energy densities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3148–3155. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.029.
- Dou, S., & Xu, D. (2022). The security of critical mineral supply chains. *Mineral Economics*, 2022 (August 25), 1–12. DOI: 10.1007/s13563-022-00340-4.
- Eggers, J., Tröltzsch, K., Falcucci, A., Maiorano, L., Verburg, P. H., Framstad, E., Louette, G., Maes, D., Nagy, S., Ozinga, W., & Delbaere, B. (2009). Is biofuel policy harming biodiversity in Europe? *GCB Bioenergy*, 1(1), 18–34. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2009.01002.x.
- Erb, K.-H., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A. L. S., Carvalhais, N., Fetzl, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Niedertscheider, M., Pongratz, J., Thurner, M., & Luysaert, S. (2018). Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature*, 553(7686), 73–76. DOI: 10.1038/nature25138.
- Errera, M. R., Dias, T. D. C., Maya, D. M. Y., & Lora, E. E. S. (2023). Global bioenergy potentials projections for 2050. *Biomass and Bioenergy*, 170, 106721. DOI: 10.1016/j.biombioe.2023.106721.
- European Academies Science Advisory Council (2019). *Forest bioenergy, carbon capture and storage, and carbon dioxide removal: An update*. URL: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Commentary_Forest_Bioenergy_Feb_2019_FINAL.pdf.
- European Parliament & Council (2009). *Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources* (Full consolidated PDF). URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF>.
- European Parliament & Council (2018). *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources* (Recast, full text PDF). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>.
- European Parliament & Council (2023). *Directive (EU) 2023/2413 amending Directive 2018/2001 (RED III)*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj/eng>.

- Eurostat (2024). Energy statistics – an overview. European Commission. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/29046.pdf>.
- Fan, J. H., Omura, A., & Roca, E. (2023). Geopolitics and rare earth metals. *European Journal of Political Economy*, 78, 102356. DOI: 10.1016/j.ejpolco.2022.102356.
- FAO (2025). Bioenergy statistics – 1990–2023 (FAOSTAT Analytical Briefs, No. 105). FAO. DOI: 10.4060/cd5520en.
- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319(5867), 1235–1238. DOI: 10.1126/science.1152747.
- Ferroni, F., Guekos, A., & Hopkirk, R. J. (2017). Further considerations to: Energy return on energy invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. *Energy Policy*, 107, 498–505. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.05.007.
- Fizaine, F., & Court, V. (2016). Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society. *Energy Policy*, 95, 172–186. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.04.039.
- Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., Bdioui, N., Mary, B., & Rumpel, C. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450(7167), 277–280. DOI: 10.1038/nature06275.
- Fontaine, S., Mariotti, A., & Abbadie, L. (2003). The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry*, 35(6), 837–843. DOI: 10.1016/S0038-0717(03)00123-8.
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O’Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quééré, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301–5369. DOI: 10.5194/essd-15-5301-2023.
- Ghorbani, Y., Ilankoon, I. M. S. K., Dushyantha, N., & Nwaila, G. T. (2025). Rare earth permanent magnets for the green energy transition: Bottlenecks, current developments and cleaner production solutions. *Resources, Conservation and Recycling*, 212, 107966. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107966.
- Government Accountability Office (2016). Renewable Fuel Standard: Program unlikely to meet its targets for reducing greenhouse gas emissions (GAO-17-94). URL: <https://www.gao.gov/assets/gao-17-94.pdf>.
- Griscom, B. W., Busch, J., Cook-Patton, S. C., Ellis, P. W., Funk, J., Leavitt, S. M., Lomax, G., Turner, W. R., Chapman, M., Engelmann, J., Fargione, J., & Worthington, T. (2020). National mitigation potential from natural climate solutions in the tropics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), 20190126. DOI: 10.1098/rstb.2019.0126.
- Grzegórska, A., Rybarczyk, P., Rogala, A., & Zabrocki, D. (2020). Phytoremediation — From environment cleaning to energy generation — Current status and future perspectives. *Energies*, 13(11), 2905. DOI: 10.3390/en13112905.
- Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 8(4), 345–360. DOI: 10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.
- Gupta, A. K., & Hall, C. A. S. (2011). A review of the past and current state of EROI data. *Sustainability*, 3(10), 1796–1809. DOI: 10.3390/su3101796.
- Hall, C. A. S. (2011). Introduction to special issue on new studies in EROI (energy return on investment). *Sustainability*, 3(10), 1773–1777. DOI: 10.3390/su3101773.
- Hall, C. A. S., Balogh, S., & Murphy, D. J. R. (2009). What is the minimum EROI that a sustainable society must have? *Energies*, 2(1), 25–47. DOI: 10.3390/en20100025.
- Hall, C. A. S., Lambert, J. G., & Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, 64, 141–152. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.05.049.
- Hall, C. A. S., Powers, R., & Schoenberg, W. (2008). Peak oil, EROI, investments and the economy in an uncertain future. In D. Pimentel (Ed.), *Biofuels, solar and wind as renewable energy systems* (pp. 109–132). Springer. DOI: 10.1007/978-1-4020-8654-0_5.
- Hanikenne, M., Talke, I. N., Haydon, M. J., Lanz, C., Nolte, A., Motte, P., Kroymann, J., Weigel, D., & Krämer, U. (2008). Evolution of metal hyperaccumulation required cis-regulatory changes and triplication of HMA4. *Nature*, 453(7193), 391–395. DOI: 10.1038/nature06877.
- Harris, Z. M., Spake, R., & Taylor, G. (2015). Land use change to bioenergy: A meta-analysis of soil carbon and GHG emissions. *Biomass and Bioenergy*, 82, 27–39. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.05.008.
- He, F., Vavrus, S. J., Kutzbach, J. E., Ruddiman, W. F., Kaplan, J. O., & Krumhardt, K. M. (2014). Simulating global and local surface temperature changes due to Holocene anthropogenic land cover change. *Geophysical Research Letters*, 41(2), 452–457. DOI: 10.1002/2013GL058085.
- House, J. I., Prentice, I. C., & Le Quééré, C. (2002). Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 8(11), 1047–1052. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00536.x.
- IEA Bioenergy (2025). The role of bioenergy in the energy transition, and implications on the global use of biomass. URL: <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/the-role-of-bioenergy-in-the-energy-transition-and-implications-on-the-global-use-of-biomass>.
- IEA-ETSAP & IRENA (2013). Production of liquid biofuels: Technology brief. URL: https://www.ctc-n.org/sites/default/files/resources/irena-etsap_tech_brief_p10_production_of_liquid_biofuels.pdf.
- International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Programme (IEA-ETSAP), & International Renewable Energy Agency (IRENA). (2013). Production of liquid biofuels: Technology Brief P10. URL: https://www.ctc-n.org/sites/default/files/resources/irena-etsap_tech_brief_p10_production_of_liquid_biofuels.pdf.

- International Energy Agency (2018). The future of petrochemicals. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>.
- International Energy Agency (2021a). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- International Energy Agency (2021b). What does net zero emissions by 2050 mean for bioenergy and land use? URL: <https://www.iea.org/articles/what-does-net-zero-emissions-by-2050-mean-for-bioenergy-and-land-use>.
- International Energy Agency (2023). Global EV outlook 2023. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.
- International Energy Agency (2024). World Energy Outlook 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>.
- International Energy Agency (2025). Biofuels. URL: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/biofuels>.
- International Renewable Energy Agency (2023). Geopolitics of the energy transition: Critical materials. Introduction and executive summary. Summary for policy makers. URL: <https://www.irena.org/Digital-Report/Geopolitics-of-the-Energy-Transition-Critical-Materials>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2014). Global bioenergy supply and demand projections: A working paper for REmap 2030. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_REmap_2030_Biomass_paper_2014.pdf.
- Ioelovich, M. (2015). Recent findings and the energetic potential of plant biomass as a renewable source of biofuels – A review. *BioResources*, 10(1), 1879–1914. DOI: 10.15376/biores.10.1.1879-1914.
- IRENA, Global Bioenergy supply and Demand Projections, A Working Paper for REmap 2030, (Shunichi Nakada, Deger Saygin and Dolf Gielen), International Renewable Energy Agency, 2014, p. 5. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_REmap_2030_Biomass_paper_2014.pdf.
- Islam, M. M., Saxena, N., & Sharma, D. (2024). Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: A review. *RSC Sustainability*, 2, 1269–1288. DOI: 10.1039/D3SU00440F.
- Itani, K., & De Bernardinis, A. (2023). Review on new-generation batteries technologies: Trends and future directions. *Energies*, 16(22), 7530. DOI: 10.3390/en16227530.
- Jackson, R. B., Banner, J. L., Jobbágy, E. G., Pockman, W. T., & Wall, D. H. (2002). Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 418(6898), 623–626. DOI: 10.1038/nature00910.
- Jackson, R. B., Randerson, J. T., Canadell, J. G., Anderson, R. G., Avissar, R., Baldocchi, D. D., et al. (2008). Protecting climate with forests. *Environmental Research Letters*, 3(4), 044006. DOI: 10.1088/1748-9326/3/4/044006.
- Khalin, S., Smolyar, V., & Kovtun, O. (2020). Relevance of using miscanthus as biomass for combustion in solid fuel boilers. *Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture in Ukraine*, 30(44), 205–214. DOI: 10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-21 (in Ukrainian).
- Kitomi, Y., Hanzawa, E., Kuya, N., Inoue, H., Hara, N., Kawai, S., Kanno, N., Endo, M., Sugimoto, K., Yamazaki, T., Sakamoto, S., Sentoku, N., Wu, J., Kanno, H., Mitsuda, N., Toriyama, K., Sato, T., Uga, Y., & Inukai, Y. (2020). Root angle modifications by the DRO1 homolog improve rice yields in saline soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(41), 25417–25423. DOI: 10.1073/pnas.2005911117.
- Köchy, M., Hiederer, R., & Freibauer, A. (2015). Global distribution of soil organic carbon – Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world. *SOIL*, 1(1), 351–365. DOI: 10.5194/soil-1-351-2015.
- Kong, D., Shan, J., Iacoboni, M., & Maguin, S. R. (2012). Evaluating greenhouse gas impacts of organic waste management options using life cycle assessment. *Waste Management Research*, 30(8), 800–812. DOI: 10.1177/0734242X12440479.
- Kotrba, P., Najmanová, J., Macek, T., Ruml, T., & Mackova M. (2009). Genetically modified plants in phytoremediation of heavy metal and metalloids soil and sediment pollution. *Biotechnology Advances*, 27(6), 799–810. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2009.06.00.
- Kreutz, T. G., Larson, E. D., Liu, G., & Williams, R. H. (2008, September 29–October 3). Fischer–Tropsch fuels from coal and biomass. Paper presented at the 25th Annual Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, PA. URL: <https://acee.princeton.edu/wp-content/uploads/2016/10/Kreutz-et-al-PCC-2008-10-7-08.pdf>.
- Ku, A. Y., Alonso, E., Eggert, R., Graedel, T., Habib, K., Hool, A., Muta, T., Schrijvers, D., Tercero, L., Vakhitova, T., & Veeh, C. (2024). Grand challenges in anticipating and responding to critical materials supply risks. *Joule*, 8(5), 1208–1223. DOI: 10.1016/j.joule.2024.03.001.
- Kumar, S. (2013). Phytoremediation of explosives using transgenic plants. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 4(Suppl 4), 11127. DOI: 10.4172/2157-7463.S4-001.
- Kuzyakov, Y. (2010). Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9), 1363–1371. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.04.003.
- Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, 24(8), 3285–3301. DOI: 10.1111/gcb.13954.
- Lark, T. J., Hochman, E. B., Smith, A., Pates, N., Hamilton, S. K., Wernick, I., Naidoo, R. N., Dale, V., & Gibbs, H. K. (2022). Environmental outcomes of the US Renewable Fuel Standard. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(9), e2101084119. DOI: 10.1073/pnas.2101084119.

- Lavanya, M. B., Viswanath, D. S., & Sivapullaiah, P. V. (2024). Phytoremediation: An eco-friendly approach for remediation of heavy metal-contaminated soils — A comprehensive review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 22, 100975. DOI: 10.1016/j.enmm.2024.100975.
- Lee, R., Ahuja, J., & Čavoški, A. (2024). The geopolitics of access to critical minerals necessary to support energy transition. *Global Energy Law and Sustainability*, 5(2). DOI: 10.3366/gels.2024.0122.
- Lee, Y.-Y., Cho, K.-S., & Yun, J. (2025). Phytoremediation strategies for co-contaminated soils: Overcoming challenges, enhancing efficiency, and exploring future advancements and innovations. *Processes*, 13(1), 132. DOI: 10.3390/pr13010132.
- Lewis, S. L., Mitchard, E. T. A., Prentice, C., Maslin, M., & Poulter, B. (2019). Comment on “The global tree restoration potential.” *Science*, 366(6463), aaz0388. DOI: 10.1126/science.aaz0388.
- Löhnis, F. (1926). Nitrogen availability of green manures. *Soil Science*, 22(4), 253–290. DOI: 10.1097/00010694-192610000-00001.
- Lorenz, K., & Lal, R. (2005). The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. *Advances in Agronomy*, 88, 35–66. DOI: 10.1016/S0065-2113(05)88002-2.
- Manochio, C., Andrade, B. R., Rodriguez, R. P., & Moraes, B. S. (2017). Ethanol from biomass: A comparative overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 743–755. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.063.
- Martani, E., Ferrarini, A., Hastings, A., & Amaducci, S. (2023). Soil organic carbon significantly increases when perennial biomass plantations are reverted back to annual arable crops. *Agronomy*, 13(2), 447. DOI: 10.3390/agronomy13020447.
- Mazlumi, K., & Chandima, G. (2012). Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(5), 3024–3033. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.028.
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B. S., Field, D. J., Gimona, A., Hedley, C. B., Hong, S. Y., Mandal, B., Marchant, B. P., Martin, M., McConkey, B. G., Mulder, V. L., Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59–86. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002.
- Mocek-Plóćiniak, A., Mencil, J., Zakrzewski, W., & Roszkowski, S. (2023). Phytoremediation as an effective remedy for removing trace elements from ecosystems. *Plants*, 12(8), 1653. DOI: 10.3390/plants12081653.
- Mukherjee, S., Leri, A. C., Bandaranayaka, C., Vázquez-Núñez, E., Barros, R., Khan, A. H. A., Zhou, P., Zhang, T., Bernal, M. P., Clemente, R., & Bolan, N. (2025). Sustainable management of post-phytoremediation biomass. *Energy, Ecology and Environment*. DOI: 10.1007/s40974-025-00364-w.
- Murphy, D. J., Raugei, M., Carbajales-Dale, M., & Rubio Estrada, B. (2022). Energy return on investment of major energy carriers: Review and harmonization. *Sustainability*, 14(12), 7098. DOI: 10.3390/su14127098.
- Nøland, J. K., Auxepaules, J., Rousset, A., Perney, B., & Falletti, G. (2022). Spatial energy density of large-scale electricity generation from power sources worldwide. *Scientific Reports*, 12, 21280. DOI: 10.1038/s41598-022-25341-9.
- Nouet, C., Charlier, J.-B., Carnol, M., Bosman, B., Recourt, K., & Hanikenne, M. (2015). Functional analysis of the three HMA4 copies of the metal hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Journal of Experimental Botany*, 66(19), 5783–5795. DOI: 10.1093/jxb/erv280.
- Oubohssaine, M., & Dahmani, I. (2024). Phytoremediation: Harnessing plant power and innovative technologies for effective soil remediation. *Plant Stress*, 14, 100578. DOI: 10.1016/j.stress.2024.100578.
- Ozyigit, I. I., Can, H., & Dogan, I. (2021). Phytoremediation using genetically engineered plants to remove metals: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(2), 669–698. DOI: 10.1007/s10311-020-01095-6.
- Papagianni, S., Capellán-Pérez, I., Adam, A., & Pastor, A. (2024). Review and meta-analysis of energy return on investment and environmental indicators of biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 203, 114737. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114737.
- Parvizi, P., Jalilian, M., Mohammadi Amidi, A., Zangeneh, M. R., & Riba, J.-R. (2025). From present innovations to future potential: The promising journey of lithium-ion batteries. *Micromachines*, 16(2), 194. DOI: 10.3390/mi16020194.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597), 49–57. DOI: 10.1038/nature17174.
- Phillip, A., & Goyal, B. (2024). Algal Biofuels: A Comprehensive Review and Analysis. *Journal of Applied Life Sciences International*, 27(5), 52–72. DOI: 10.9734/jalsi/2024/v27i5659.
- Pimenow, S., Pimenowa, O., Moldavan, L., Udova, L., Wasilewski, M., & Wasilewska, N. (2025). Transforming Agriculture into Energy: Unlocking Ukraine’s Bioenergy Potential for Sustainable Post-Conflict Recovery. *Energies*, 18(5), 1212. DOI: 10.3390/en18051212.
- Pugh, T. A. M., Lindeskog, M., Smith, B., Poulter, B., Arneeth, A., Haverd, V., et al. (2019). Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(10), 4382–4387. DOI: 10.1073/pnas.1810512116.
- Rahman, S. U., Qin, A., Zain, M., Mushtaq, Z., Mehmood, F., Riaz, L., Naveed, S., Ansari, M. J., Saeed, M., Ahmad, I., & Shehzad, M. (2024). Pb uptake, accumulation, and translocation in plants: Plant physiological, biochemical, and molecular response: A review. *Heliyon*, 10(6), e27724. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27724.
- Rakhmetova, S. O., Vergun, O. M., & Rakhmetov, D. B. (2020). Efficiency of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivation in the Ukrainian Forest-Steppe zone and development of its new lines. *The Open Agriculture Journal*, 14(1), 273. DOI: 10.2174/1874331502014010273.

- Rana, R. L., Lombardi, M., Giungato, P., & Tricase, C. (2020). Trends in scientific literature on energy return ratio of renewable energy sources for supporting policymakers. *Administrative Sciences*, 10(2), 21. DOI: 10.3390/admsci10020021.
- Reick, C. H., Raddatz, T., Pongratz, J., & Claussen, M. (2010). Contribution of anthropogenic land cover change emissions to pre-industrial atmospheric CO₂. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 62(5), 329–336. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00479.x.
- Reid, W. V., Ali, M. K., & Field, C. B. (2019). The future of bioenergy. *Global Change Biology Bioenergy*, 12(1), 3–4. DOI: 10.1111/gcb.14883.
- Ruddiman, W. F. (2003). The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change*, 61, 261–293. DOI: 10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.f8.
- Sahin, H., Solomon, A. A., Aghahosseini, A., & Breyer, C. (2024). Systemwide energy return on investment in sustainable power systems. *Nature Communications*, 15, 208. DOI: 10.1038/s41467-023-44232-9.
- Salomone, R., Le, D. L., Mondello, G., Saija, G., Lanuzza, F., & Baglieri, D. (2024). Municipal biowaste management: A literature review of case studies, best practices, and life cycle assessments. In *Proceedings of the IAQUIS International Conference 2024: Fostering organizational transformation for a sustainable future: Enhancing synergies between quality, innovation and sustainability* (11–13 September 2024, Viterbo, Italy). URL: https://www.researchgate.net/publication/393698461_Municipal_biowaste_management_A_literature_review_of_case_studies_best_practices_and_life_cycle_assessments.
- Sanderman, J., Hengl, T., & Fiske, G. J. (2017). Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36), 9575–9580. DOI: 10.1073/pnas.1706103114.
- Saunders, P. (2020). Land use requirements of solar and wind power generation: Understanding a decade of academic research. Arlington, TX: Energy Innovation Reform Project. ISBN 9781735933504. URL: https://innovationreform.org/wp-content/uploads/2023/11/1909-Energy-Reform-Land-Use-Requirements_digital.pdf.
- Schmer, M. R., Vogel, K. P., Mitchell, R. B., & Perrin, R. K. (2008). Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *PNAS*, 105(2), 464–469. DOI: 10.1073/pnas.0704767105.
- Searchinger, T. D., Beringer, T., Holtmark, B., Wirseni, S., & Dumas, P. (2018). Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, 564, 249–253. DOI: 10.1038/s41586-018-0757-z.
- Searle, S. Y., & Malins, C. J. (2016). Waste and residue availability for advanced biofuel production in EU Member States. *Biomass and Bioenergy*, 89, 2–10. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.01.008.
- Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., & Roessler, P. (1998). A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae. National Renewable Energy Laboratory (NREL/TP-580-24190). URL: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf>.
- Shirvani, T., Yan, X., Inderwildi, O. R., Edwards, P. P., & King, D. A. (2011). Life cycle energy and greenhouse gas analysis for algae-derived biodiesel. *Energy & Environmental Science*, 4(10), 3773–3778. DOI: 10.1039/C1EE01791H.
- Siddique, I. A., Grados, D., Chen, J., Lærke, P. E., & Jørgensen, U. (2023). Soil organic carbon stock change following perennialization: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*. DOI: 10.1007/s13593-023-00912-w.
- Sloan, T., Payne, R. J., Bain, C., Chapman, S. J., Cowie, N., Gilbert, P., Lindsay, R., Mauquoy, D., Newton, A., & Andersen, R. (2018). Peatland afforestation in the UK and consequences for carbon storage. *Mires and Peat*, 23, 1–17. DOI: 10.19189/MaP.2017.OMB.315.
- Smeets, E. M. W., Faaij, A. P. C., Lewandowski, I. M., & Turkenburg, W. C. (2007). A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(1), 56–106. DOI: 10.1016/j.peccs.2006.08.001.
- Smil, V. (2011). Harvesting the biosphere: The human impact. *Population and Development Review*, 37(4), 613–636. DOI: 10.1111/j.1728-4457.2011.00450.x.
- Smith, P., Davis, S. J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., et al. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6, 42–50. DOI: 10.1038/nclimate2870.
- Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. DOI: 10.3390/land13101614.
- Song, U., & Park, H. (2017). Importance of biomass management acts and policies after phytoremediation. *Journal of Ecology and Environment*, 41, 13. DOI: 10.1186/s41610-017-0033-4.
- Strapasson, A., Woods, J., Chum, H., Kalas, N., Shah, N., & Rosillo-Calle, F. (2017). On the global limits of bioenergy and land use for climate change mitigation. *GCB Bioenergy*, 9(12), 1721–1735. DOI: 10.1111/gcbb.12456.
- Suman, J., Uhlik, O., Viktorova, J., & Macek, T. (2018). Phytoextraction of heavy metals: A tool for environmental cleanup? *Frontiers in Plant Science*, 9, 1476. DOI: 10.3389/fpls.2018.01476.
- Sytar, O., & Taran, N. (2022). Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine – a review. *Journal of Central European Agriculture*, 23(4), 803–815. DOI: 10.5513/JCEA01/23.4.3603.
- U.S. Congress (2007). Energy Independence and Security Act of 2007, Pub. L. 110-140, §1501–1509 (Renewable Fuel Standard provisions). Retrieved August 1, 2025. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf>.
- U.S. Department of Energy (2025). Advanced algal systems. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. URL: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/advanced-algal-systems>.
- U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Bioenergy Technologies Office (2017). Researchers strive to reduce cost and time of

- algal biofuel production. U.S. Department of Energy. URL: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/researchers-strive-reduce-cost-and-time-algal-biofuel-production>.
- U.S. Environmental Protection Agency (2000). *Phytoremediation Resource Guide*. U.S. Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/phytoresgude.pdf>.
- U.S. Geological Survey (2024). *Mineral Commodity Summaries 2024: Lithium*. U.S. Department of the Interior. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-lithium.pdf>.
- UFOP – Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (2023). *Minor global land requirement by biofuels (Chart of the week, 04/2023)*. UFOP. URL: <https://www.ufop.de/english/news/chart-week>.
- Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Ishitani, M., Hara, N., Kitomi, Y., Inukai, Y., Ono, K., Kanno, N., Inoue, H., Takehisa, H., Motoyama, R., Nagamura, Y., Wu, J., Matsumoto, T., Takai, T., Okuno, K., & Yano, M. (2013). Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions. *Nature Genetics*, 45(9), 1097–1102. DOI: 10.1038/ng.2725.
- United Nations Statistics Division (2014). *Energy Statistics Yearbook 2014*. URL: <https://unstats.un.org/unsd/energy/yearbook/2014.htm>.
- United Nations Statistics Division (2022). *Energy Statistics Yearbook 2022*. URL: <https://unstats.un.org/unsd/energystats/pubs/yearbook>.
- van Zalk, J., & Behrens, P. (2018). The spatial extent of renewable and non-renewable “Failed to load setting”campower generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S. *Energy Policy*, 123, 83–91. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.08.023.
- Vázquez-Núñez, E., Fernández-Luqueño, F., Peña-Castro, J. M., & Vera-Reyes, I. (2021). Coupling plant biomass derived from phytoremediation of potential toxic-metal-polluted soils to bioenergy production and high-value by-products—A review. *Applied Sciences*, 11(7), 2982. DOI: 10.3390/app11072982.
- Veldman, J. W., Aleman, J. C., Alvarado, S. T., Anderson, T. M., Archibald, S., Bond, W. J., et al. (2019). Comment on “The global tree restoration potential”. *Science*, 366(6463), eaay7976. DOI: 10.1126/science.aay7976.
- Waring, B., Neumann, M., Prentice, I. C., Adams, M., Smith, P., & Siegert, M. (2020). Forests and decarbonization – Roles of natural and planted forests. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 58. DOI: 10.3389/ffgc.2020.00058.
- Watson, R. T., Noble, I. R., Bolin, B., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J., & Dokken, D. J. (Eds.). (2000). *Land use, land-use change, and forestry: A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/S0376892901280308.
- White, E., & Kramer, G. J. (2019). The changing meaning of energy return on investment and the implications for the prospects of post-fossil civilization. *One Earth*, 1(4), 416–422. DOI: 10.1016/j.oneear.2019.11.010.
- Wijekoon, W., Priyashantha, H., Gajanayake, P., Manage, P., Liyanage, C., Jayarathna, S., & Kumarasinghe, U. (2025). Review and prospects of phytoremediation: Harnessing biofuel-producing plants for environmental remediation. *Sustainability*, 17(3), 822. DOI: 10.3390/su17030822.
- Winckler, J., Lejeune, Q., Reick, C. H., & Pongratz, J. (2019). Nonlocal effects dominate the global mean surface temperature response to the biogeophysical effects of deforestation. *Geophysical Research Letters*, 46, 745–755. DOI: 10.1029/2018GL080211.
- World Health Organization (2024). *Household air pollution and health*. WHO. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>.
- World Nuclear Association (2025). *Energy and the environment: Energy return on investment*. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/energy-return-on-investment>.
- Wu, Y., Huang, H., Chen, F., Tan, T., & Xu, Y. (2024). Soil organic carbon sequestration rate and spatiotemporal dynamics under perennial energy crops cultivation: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 240, 106064. DOI: 10.1016/j.still.2024.106064.
- Xu, S., Delgado-Baquerizo, M., Kuzyakov, Y., Wu, Y., Liu, L., Yang, Y., Li, Y., Yu, Y., Zhu, B., & Yao, H. (2024). Positive soil priming effects are the rule at a global scale. *Global Change Biology*. Advance online publication. DOI: 10.1111/gcb.17502.
- Yang, F., He, F., Li, S., Li, M., & Wu, P. (2023). A new estimation of carbon emissions from land use and land cover change in China over the past 300 years. *Science of The Total Environment*, 863, 160963. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160963.