

# Агроекологія

УДК 631.417.2

П. П. Надточій

Д. С.-Г. Н.

Житомирський національний агроекологічний університет

## ЕНЕРГЕТИКА ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ ҐРУНТУ – ОСНОВА СТІЙКОСТІ ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ЯК ВІДКРИТОЇ ЕКОСИСТЕМИ

*Узагальнені результати вивчення кількісного складу енергії органічної речовини, що утворилася у процесі фотосинтезу в природних і агроценозах, а також у гумусі, і можливості використання цих результатів для характеристики стійкості функціонування ґрунтових екосистем. Наведені формули розрахунку енергії, зосередженої в рослинних рештках та у складі гумусу. З'ясована сутність ентропії в екосистемі ґрунту. Показано, що збільшення ентропії внаслідок проходження різних процесів у ґрунті, який знаходиться у сільськогосподарському використанні, компенсується надходженням «вільної» енергії, зосередженої в рослинних органічних рештках і органічних добривах. Обґрунтоване застосування системного підходу, в основі якого домінуватимуть положення термодинаміки у поєднанні з моделюванням ґрунтово-екологічних систем, як перспективного напрямку досліджень в агроекології і ґрунтознавстві.*

**Ключові слова:** енергія, органічна речовина, стійкість, рівновага, екосистема ґрунту.

### Постановка проблеми

Рушійною силою функціонування екосистем різного рівня виступає енергія, яка характеризує їх здатність виконувати певну роботу. Цінність вивчення природних процесів на енергетичній основі полягає в тому, що людина при цьому має уявлення про всі явища у загальному вигляді. Введення поняття енергії в різні галузі науки дало можливість зв'язати в єдине ціле (систему) всі уявлення про складні явища природи [7, 17, 29, 47 та ін.].

Сільське господарство, що оперує складними еколого-біоенергетичними системами, має також вирішувати завдання перетворення кінетичної енергії сонячних променів у потенціальну енергію хімічного споріднення. У живих покривах Землі, які є велетенською фабрикою з виробництва органічної речовини, вся різноманітність проявів життя супроводжується перетворенням енергії. Здатність організовано накопичувати і розумно використовувати енергію є якісною ознакою суспільства [10], добробут якого в цілому залежить також від обсягів використаної енергії [43].

Увага вчених зосереджена на пошуку шляхів збереження і відтворення родючості ґрунтового покриву, а отже, і вирішенні проблеми стійкості

функціонування ґрунтової екосистеми в умовах дестабілізуючої дії зовнішніх чинників, насамперед антропогенних [7, 16, 27]. Досягнення зазначеної мети можливе за умови умілого управління різноманітними процесами і режимами, що мають місце в ґрунтах. При цьому, значна роль належить управлінню біоенергетичними процесами [24]. Питання біоенергетики ґрунтоутворення і енергетики органічної речовини, а отже, і стійкості функціонування екосистеми ґрунту, були і залишаються досить актуальними [4, 8, 11, 12, 18, 19, 28 та ін.].

Мета даної публікації полягає в аналізі літературних даних з питань вивчення ґрунтових процесів на енергетичній основі в історичному аспекті, а також узагальненні результатів досліджень, у тому числі й власних, щодо змін енергетичного і ентропійного стану екосистеми ґрунту під впливом антропогенного чинника у процесі сільськогосподарського використання ґрунтово-земельних ресурсів. Її завданням є оцінити стійкість функціонування ґрунтових екосистем з позицій кількісного складу енергії, сконцентрованої в їх органічній речовині.

### **Ґрунт як відкрита біокосна термодинамічна система. Дія другого закону термодинаміки і ентропійні процеси в екосистемі ґрунту**

З термодинамічної точки зору, ґрунт є складною відкритою системою, що перебуває у постійному масо- та енергообміні з навколишнім середовищем, оскільки він є структурним елементом біосфери. Саме багатозначність і гетерогенність визначають складність ґрунту як термодинамічної системи [17]. Другий закон термодинаміки безпосередньо стосується перетворення енергії сонячного випромінювання у потенціальну енергію органічної речовини [9, 23, 29]. Щодо екосистеми ґрунту даний закон дає підстави стверджувати, що будь-яка трансформація в ній енергії, крім теплової, не є повною, оскільки на кожному черговому етапі трансформації носія енергії частина її у вигляді відходів, виділень, продуктів метаболізму розсіюється у навколишньому середовищі. Таким чином, у трофічних ланцюгах неминучою є втрата певної частини енергії, як це, зрештою, й відбувається у всіх складних відкритих системах. У термодинаміку, а пізніше в екологію і частково у ґрунтознавство, згідно з другим законом термодинаміки, було введено поняття *ентропії*, що характеризує міру неупорядкованості системи (міру безпорядку й хаосу), або кількість недоступної для використання енергії. Як енергія, так і ентропія є функціями стану системи [5, 33, 34]. Ентропія, при цьому, характеризує умови, за яких у системі створюється запас енергії. За математичним формулюванням другого закону термодинаміки виходить, що: 1) при незворотних процесах загальна ентропія системи і навколишнього середовища зростає; 2) у стані рівноваги ентропія системи є максимальною. В основі ентропії, як і другого закону термодинаміки, лежать не жорстко детерміновані, а ймовірні закономірності. Для системи ентропія може бути мірою безпорядку, тоді як інформація – зменшенням невизначеності. Проте, й інформація за своєю природою створюється і виявляється через ймовірність.

В. В. Горшков і В. Г. Горшков [13] вважають, що у живих системах, включаючи різного роду організми, діє аналог другого закону термодинаміки, який постулюється таким чином: протягом часу, набагато меншого за період еволюційних змін, у живих системах може відбуватися лише втрата накопиченої інформації, тобто збільшення ентропії, незважаючи на постійне споживання енергії зовнішніх потоків. Енергетичну характеристику відкритої біологічної системи, включаючи агрофітоценоз і екосистему ґрунту, відповідно з другим законом термодинаміки, можна дати на основі балансу (обміну) ентропії, що вперше зробив І. Пригожин [37]. Якщо позначити  $\frac{dS}{dt}$  як швидкість зміни

ентропії відкритої системи,  $\frac{diS}{dt}$  – як швидкість утворення ентропії у системі за

рахунок внутрішніх незворотних процесів,  $\frac{deS}{dt}$  – як швидкість обміну ентропії зі

зовнішнім середовищем, то рівняння Пригожина має вигляд  $\frac{dS}{dt} = \frac{diS}{dt} + \frac{deS}{dt}$ ,

причому, член  $\frac{diS}{dt}$  за визначенням завжди додатній, а член  $\frac{deS}{dt}$  може бути як

додатнім, так і від'ємним. Таким чином, це рівняння у лаконічній і узагальненій формі виражає сутність енергетичних процесів, що проходять у відкритій біологічній системі. Однак, слід зазначити, що ентропія оцінює лише енергетичну (фізичну) складову упорядкованості системи, не торкаючись її якісної сторони. Унікальність біологічних структур полягає не лише у тому, скільки вільної енергії в них міститься і наскільки змінилася ентропія при трансформуванні енергії, а і в тому, що ці структури мають якісні особливості, які дозволяють їм виконувати певні функції, зокрема й біологічні. Проте, ентропія цим не оперує, тому використання її як міри упорядкованості відносно до біосистем, на думку В. А. Опрітова [35], втрачає сенс. Автор публікації не поділяє зазначену точку зору, адже для того, щоб підтримувати, а тим більше підвищувати впорядкованість ґрунтової екологічної системи, потрібно нею управляти. У такому разі, має місце опір доступу різних дезорганізуючих факторів. Фактори управління у результаті повинні приводити до зменшення ентропії системи.

З дуже високою часткою умовності фактори, що впливають на величину наявної в системі (екосистемі ґрунту) ентропії, можна звести до двох основних [24]: 1) недосконалості внутрішньої впорядкованості системи; 2) діяльності системи із виробництва негентропії, тобто переробки речовини, енергії й інформації, з метою вилучення вільної енергії для забезпечення «порядку» у системі.

Хоча вчені доводять існування взаємозалежності між упорядкованістю та ймовірністю, однак, стосовно екосистеми ґрунту, на наш погляд, більше підходить статистично ймовірне трактування ентропії як міри її неупорядкованості. Згідно з другим законом термодинаміки, не всі форми енергії є еквівалентними, тому кожна з них характеризується відповідним значенням ентропії, яка, у свою чергу, залежить від якості (міри неупорядкованості) енергії даної форми. Такий погляд на ентропію дає змогу більш оптимістично судити про можливість людини у створенні екологічно безпечної ситуації, збільшенні впорядкованості, потрібної і вигідної для неї. Безумовно, організувати такі дії досить нелегко, проте цілком можливо при відповідних кількісних і якісних витратах енергії.

Надто важлива термодинамічна характеристика екосистеми ґрунту – її здатність створювати і підтримувати високий ступінь внутрішньої упорядкованості, тобто стан з низькою ентропією, що у результаті досягається за рахунок дихання біотичної її складової.

З'ясування сутності ентропії дає підстави для висновку про те, що проблема забруднення навколишнього середовища зумовлена термодинамічними обмеженнями, які закладені у самій природі. Це забруднення є наслідком неефективного використання різних видів енергії.

У природних екосистемах процес структурного метаболізму відбувається у напрямку економного використання енергії та постійного її накопичення у вигляді вільної форми (біомаси зелених рослин, торфу, органічної речовини ґрунту тощо). Вчені довели [34], що першочерговим при цьому є самопідтримання процесів, спрямованих проти температурного градієнта. Сутність цих процесів полягає у постійних витратах відповідної кількості енергії (виконання постійної роботи) на відведення із системи так званої неупорядкованості (зменшення ентропії).

Зазначене положення Ю. Одум [33] розкрив на прикладі екосистеми, де надземні рослини відіграють істотну роль у створенні її структурної основи. Мірою термодинамічної впорядкованості такої системи, на його думку, може бути співвідношення Шредінгера. Цей показник характеризує відношення витрат енергії на підтримку життєдіяльності спільноти екосистеми (дихання –  $R$ ) до енергії, що міститься у самій структурі (спільноті –  $B$ ). Якщо ці дві величини поділити на абсолютну температуру, то відношення  $R/B$  означає відношення приросту ентропії, що пов'язана з підтримкою структури надземних спільнот, до ентропії впорядкованої частини. Увівши ентропію для з'ясування неупорядкованості екосистеми, можна переконатися, що чим більша біомаса екосистеми, тим вищими є витрати на її підтримку. Проте, якщо розмір одиниць, на які поділена загальна біомаса, досить великий (наприклад багаторічні дерева), то витрати енергії на підтримку процесів, спрямованих проти температурного градієнта, у перерахунку на структурну одиницю біомаси, будуть значно меншими.

Встановлено закономірність, пов'язану з ґрунтово-кліматичними умовами місцевості, нестачею рухомих форм біологічних елементів (передусім азоту) та надлишком вологи і сонячної енергії. Зазначені фактори сприяли тому, що механізми саморегулювання створили таку взаємодію біологічного та геологічного кругообігів речовин, коли більшість доступних для рослин мінеральних речовин у лісових насадженнях зв'язана у мертвих і живих органічних системах. Це запобігає їх швидкому вилученню за межі екосистеми з надлишком атмосферних опадів і створює можливість за допомогою сонячної енергії забезпечувати відповідну відносно стійку структуру екосистеми. Накопичений у системі запас вільної енергії дає змогу з відповідною ймовірністю вирішувати питання про перехід системи в інший структурний стан.

Ефективність використання сонячної радіації агро- та природними фітоценозами характеризується коефіцієнтом корисної дії (ККД), що дорівнює відношенню кількості енергії, накопиченої у продуктах фотосинтезу, до кількості використаної сонячної радіації

$$ККД = \frac{qV \cdot 100}{\sum Q_{\phi}}$$

де  $q$  – енергетична цінність рослин, ккал/г;

$V$  – біологічний урожай загальної сухої фітомаси, г/см<sup>2</sup>;

$\sum Q_{\phi}$  – сума фотосинтетично активної радіації (ФАР) за вегетаційний період, ккал/см<sup>2</sup>.

ККД фітоценозів залежить від строків сівби та густоти посіву, вологості ґрунту, кількості внесених у ґрунт добрив, погодних умов і може варіювати залежно від виду рослин у межах від 0,4 до 10,0 %. Для більшості з них використання ФАР не перевищує 3 % [31, 32].

#### Енергетика органічної речовини ґрунту

Загальний запас акумульованої в ґрунтових екосистемах енергії ( $U$ ) згідно із [17], складається переважно з енергії, що входить до складу компонентів (фаз) ґрунту: органічної ( $U_{p1}$ ); мінеральної ( $U_{p2}$ ); ґрунтового розчину ( $U_{p3}$ ); ґрунтового повітря ( $U_{p4}$ ); живої органічної речовини ( $U_{p5}$ ). Його можна визначити за формулою

$$U = \sum_1^P K_p U_p - Ef,$$

де  $U_p$  – внутрішня енергія відповідної фази  $P$  ґрунтової системи;

$K_p$  – масова або об'ємна частка енергії в ґрунті;

$Ef$  – енергія поверхні взаємодії.

Згідно із [18], гумусова оболонка нашої планети «гумусосфера» вміщує разом з коренями рослин та мікроорганізмами  $n \cdot 10^{25}$  ккал енергії. Таким чином,

законсервована в органічній речовині енергія слугує одним із найважливіших природних енергетичних джерел, що визначає розвиток ґрунтових екосистем і формування їх головної властивості–родючості. Понад половину складу гумусу ґрунту становить вуглець, який, на відміну від вуглецю, сконцентрованого у кам'яному вугіллі й нафті, знаходиться в активному стані.

У літературі досить повно в термодинамічному й методичному відношеннях висвітлене питання енергетики органічної речовини ґрунту та ґрунтової біоти [3, 11, 18, 33 та ін.]. Набагато менше вивчені проблеми енергетики абіотичного, точніше, мінерального компоненту ґрунтової екосистеми. Виняток становить ґрунтовий розчин, теплодинаміку якого розглянуто в однойменній монографії Г. Спозіто [42].

Пошуки шляхів підвищення родючості ґрунтів та продуктивності агроценозів передбачають системне вирішення завдань (агротехнічних, агробіологічних, меліоративних та ін.) в загальній проблемі посилення біосинтезу на земній поверхні та ефективного використання радіаційних ресурсів, що надходять на неї [1, 2]. Важливим при цьому є проведення відповідних балансових розрахунків кількості біологічно доступної енергії в ґрунті.

Алієвим С. А. [4]. запропонована така формула розрахунку теплоти згоряння органічних речовин за їх атомарним складом

$$Q_G = 90C + 34H - 5O \cdot (0,87 - 4N) \text{ кал/г,}$$

де: С, Н, О, N – вміст відповідного елемента в органічній речовині, %.

Ним встановлена і формула розрахунку запасів енергії у гумусі (у млн ккал/га) за величиною використання хромової кислоти, необхідної для його окислення:

$$Q_G = \frac{(a - b) \cdot 2,675 \cdot K \cdot 10}{n},$$

де  $a-b$  – кількість 0,1 н розчину хромової кислоти, що використовується на окислення гумусу, мл;

2,675 – кількість кал/г, що відповідає використанню 1 см<sup>3</sup> 0,1 н розчину хромової кислоти;

$K$  – шар ґрунту (м);

$n$  – наважка ґрунту (г);

10 – коефіцієнт переводу, млн ккал/га.

Пізніше Д. С. Орлов і Л. О. Гришина [36] значно спростили цю формулу і розширили можливість її використання. У результаті формула набула вигляду

$$Q_G = 517,2GHd,$$

де  $G$  – вміст гумусу (%);

$H$  – потужність ґрунтового шару (м);

$d$  – щільність ґрунту.

Зважаючи на енергетичну нерівноцінність гумінових і фульвокислот у складі гумусу, В. К. Козін [19] ввів до складу формули співвідношення гумінових до фульвокислот ( $C_{гк}/C_{фк}$ )

$$Q_{г} = 517,2 ГНд \cdot C_{гк}/C_{фк},$$

де  $Q_{г}$  – запаси (млн ккал/га) енергії в гумусі;

$C_{гк}/C_{фк}$  – рівні групового складу гумусу.

Встановлено, що теплота згоряння гумінових кислот становить 4370 – 5100 кал/г, фульвокислот – 4520, гумінів – 4050-4520 кал/г, гумусу  $5,5 \cdot 10^6$  кал/т (5500 кал/г).

Родючість як особливий стан і якісна властивість ґрунту зумовлена, передусім, акумуляцією життєво-енергетичних ресурсів для живої речовини (ресурсних рівнів) – вмістом і складом гумусу, розміром надходження у ґрунт речовини рослинного походження, його якісним складом (речовинним та хімічним), а також процесами трансформації. Тому, головною керівною дією людини, яка забезпечує стійкість ґрунтів, їх продукційно-відтворювальну і санітарно-гігієнічну функції, є регулювання режиму органічної речовини в агроландшафтах, яке у результаті зводиться до регулювання його рівнів і темпів в екосистемі. В якості рівнів, при цьому, виступають накопичувачі органічної речовини, а темпів – її потоки, які, у свою чергу, зумовлюють зміну рівнів. Отже, рівні ніби акумулюють у собі загальну кількість органічної речовини, яка є сумою темпів, що впадають у неї. Цей важливий процес накопичення повинен здійснюватися всіма засобами системи землеробства, проте з урахуванням його економічної ефективності і практичної доцільності [27].

### **Екологічна рівновага і проблема стійкості функціонування ґрунтових екосистем**

Інтерес до екологічної рівноваги зумовлений порушенням під впливом антропогенного чинника природних структур і режимів їх функціонування як у межах біосфери, так і окремих ландшафтах та екосистемах. У сучасній екології поняття рівноваги розглядається у межах загальної теорії гомеостазу. Екосистеми, в яких, у процесі природної еволюції, сформувалися спеціальні саморегулюючі механізми, належать до екологічно врівноважених [33].

Стосовно екосистеми ґрунту *екологічна рівновага* може бути визначена як динамічний стан екологічних процесів, у яких продукція і деструкція живої матерії зрівнюються в обсязі певного природного циклу системи, а її структура не зазнає змін у часі. Екологічна рівновага ґрунту визначається за критеріями як процес і стан, продукція і деструкція, що відбуваються у часі і об'ємі ґрунтової екосистеми. Обидва ці процеси характеризують стан енергії, що зосереджена в екосистемі. Приблизною мірою цієї енергії є кількість біомаси у різних її формах (фракціях). Таке розуміння екологічної рівноваги спирається на найбільш істотні у житті ґрунтової екосистеми явища, якими є продукція і деструкція органічної

речовини. Всі інші явища у функціонуванні екосистеми ґрунту пов'язані або з продукцією, або деструкцією, тобто є похідними [29].

У процесі тривалої еволюції в ґрунтах склалася динамічна рівновага в системі «розкладання – синтез органічної речовини». Екологічна рівновага як динамічний стан екосистеми ґрунту і процесів, у яких продукція і деструкція живої матерії врівноважуються в обсязі певного природного циклу системи, забезпечується завдяки наявності елементарних рівноваг. До найголовніших із них відносять іонну, киснево-двооксидну, кислотно-основну та водно-повітряну.

Функціонування екосистеми ґрунту, її самовідтворення можливе лише у межах конкретних біоценозів, де автотрофна фотосинтезуюча рослинність є початковим етапом трофічного ланцюга в загальному циклі біологічного кругообігу речовин та енергії. Природні екосистеми мають здатність до саморегулювання й саморепродукції. У реальній ґрунтовій екосистемі є як саморегулюючі, так і термодинамічні підсистеми, які тісно пов'язані між собою. Кожна підсистема цієї єдності діє за своїми енергетичними законами. Такі термодинамічні компоненти ґрунту, як первинні і вторинні мінерали, прагнуть до найнижчого рівня енергетичної межі. Основна причина цього явища – безповоротна втрата запасів кінетичної енергії. Рослини, мікроорганізми і тварини як саморегулюючі підсистеми, акумулюючи відповідну кількість енергії, що необхідна для функціонування екосистеми, намагаються досягти вищого рівня накопичення енергії.

У сучасній науковій літературі розглядається поняття «стійкість екосистеми», проте відсутнє чітке уніфіковане визначення поняття стійкості екосистем різного рівня, а отже, й не вказані межі варіювання антропогенних навантажень на конкретні ґрунтові різновиди. Одум Ю. [33] звертає увагу на толерантність системи до певного виду навантажень, поки вони не перевищують відповідної критичної величини. Інколи цим терміном позначають відносну тривалість певної характеристики стану системи у часі [41]. Наявні ж численні визначення стосуються стійкості функціонування територіальних ґрунтових комплексів [22, 40, 46], проте вони страждають на перенасиченість, а часом і неточність змістового навантаження.

На наш погляд, найбільш повне визначення поняття стійкості ґрунтової екосистеми подано в роботі [45], де, крім того, детально розглянуто три види стійкості, а саме: структурно-стаціонарну, функціонально-динамічну і буферність.

Під стійкістю розуміють здатність ґрунтової екосистеми зберігати свою якісну своєрідність (структуру) і ланцюг відповідних станів, через які вона щороку проходить, виконуючи основну функцію продукції – деструкції органічної речовини на властивому їй рівні в умовах негативної дестабілізуючої дії зовнішніх факторів. Здатність ґрунтової екосистеми зберігати власну структуру, а отже і виявляти стійкість, залежить від:



1) буферності у широкому розумінні цього слова (як здатності витримувати коливання зовнішніх і внутрішніх подразнень, у тому числі й антропогенної дії);

2) саморегуляції (здатності до самоочищення, можливості повертатися у початковий стан, набутті не властивого якісно нового стану тощо);

3) швидкості розвитку та відтворення (тобто від часу, потрібного для нормального протікання всіх зумовлених зовнішніми і внутрішніми умовами станів);

4) типів функціонування (квазірівноважний, нерівноважно-аккумулятивний, нерівноважно-регресивний). При нерівноважно-регресивному типу функціонуванні екосистема ґрунту виявляє найменшу стійкість.

У природних умовах еволюційно сформувався ряд адаптивних властивостей як фітоценозів у цілому (різноманітний видовий склад рослинності, її пристосування до природних умов, здатність створювати близький до замкнутого малого біологічного кругообігу кругообіг речовин та ін.), так і ґрунтової екосистеми зокрема (накопичення необхідної кількості вільної енергії), що визначає її розвиток і формування якісної ознаки – родючості.

Антропогенні чинники (кислотні опади, фізіологічно кислі мінеральні добрива та інтенсивний обробіток) спричиняють зниження буферності ґрунту в кислотному інтервалі, а отже, і його стійкість до протидії кислоти (катіонів водню).

Для розроблення раціональних управлінських рішень щодо підтримання ґрунтових екосистем у стані, за якого вони зберігають здатність до регуляції циклів біофільних елементів і запобігання негативному впливу антропогенних чинників, потрібні відповідні критерії стійкості, а також об'єктивна інформація про стан екосистеми, отримання якої покладено на екологічний моніторинг.

Сучасні агроекосистеми ще не досягли цього стану і без умілого, науково обґрунтованого керування людиною зазнають різких коливань і значно менше пристосовані до несприятливих погодно-кліматичних умов порівняно зі зрілими аналогами (лука, цілина, ліс). Проте відносно стабільний, але фізично нерівноважений їх стан може підтримуватися практично необмежено у часі доти, доки існують джерела енергії і механізми управління зворотними позитивними й негативними зв'язками. За цієї умови система здатна утримувати необхідну кількість вільної енергії, що дає змогу послабити вплив зовнішніх негативних чинників і зберегти відповідно стійку й достатньо високу її продуктивність. При цьому, основний внесок у забезпечення стійкого функціонування екосистеми ґрунту роблять не абіотичні, а живі компоненти (рослинний і тваринний світ). Відсутність їх або зниження чисельності до відповідного рівня призводять до втрати системою стійкості. Із збільшенням видової різноманітності біологічних співгруповань стійкість ґрунтової екосистеми до природних і антропогенних подразнень збільшується. У цьому випадку, біологічне різноманіття сприяє утворенню більш довгих трофічних ланцюгів і створенню кращих умов для дії негативних зворотних зв'язків, які є основою формування гомеостатичних механізмів.

Цілком ймовірно, що природні екосистеми завжди прагнуть до збільшення валової продукції, а людина своїми діями в агроєкосистемах – до зростання обсягів чистої продукції. Сутність розходження стратегії людини і природи, на думку Ю. Одума [34], виявляється у тому, що розвиток природних екосистем у своїй основі спрямований на посилення контролю над фізичним середовищем існування з метою забезпечення максимальної захищеності його від різких змін параметрів зовнішнього середовища. Крім того, зрілі природні системи володіють здатністю створювати близький до замкнутого малий біологічний кругообіг речовин.

В енергетичному стані ґрунтових екосистем виділяють три основних фактори, які безпосередньо впливають на процеси їх функціонування [14]: хімічний синтез; циклічність (ритмічність) надходження енергії; дія випадкових факторів (пилові бурі, зливи, посуха тощо).

Процеси руйнування екосистем різного рівня досить різноманітні. Стосовно екосистеми ґрунту нами умовно виділено чотири основні напрями, в яких ідуть процеси збільшення ентропії (руйнування) [29], а саме:

- *теплові* – при перегріванні екосистеми ґрунту знижується ефективність її функціонування, проте не змінюється структура та якість виконуваних функцій (збільшуються лише енерговитрати на виробництво одиниці органічної речовини);

- *антропогенні* – у результаті антропогенного впливу також значно знижується ефективність функціонування екосистеми (ефект аналогічний попередньому);

- *структурні* – в екосистемі відбувається порушення структурно-стаціонарної і функціонально-динамічної функцій (змінюється структурна побудова системи, у першу чергу, генетичних горизонтів). Система, при цьому, або не виконує частини властивих їй функцій, або погіршується якість їх виконання, а продуктивність самої системи знижується в рази;

- *інформаційні* – при збереженні загальної структури екосистеми має місце порушення зв'язків між її ланками. Як наслідок, погіршується якість виконання функцій окремими підсистемами, що також призводить до зниження її продуктивності (порушення водно-сольового, водно-повітряного і поживного режимів тощо).

Зазначимо, що тільки в ідеальних випадках, при відповідній збалансованості життєдіяльності автотрофних і гетеротрофних організмів, екосистема може наблизитися до умовно замкнутої системи, яка обмінюється з навколишнім середовищем тільки енергією. У природних умовах тривале існування екосистеми можливе лише при постійному надходженні з навколишнього середовища не тільки енергії, а й відповідної кількості речовин у вигляді елементів живлення.

Стійкість функціонування екосистеми ґрунту забезпечується потрібним запасом елементів живлення і доступної енергії. Ці два фактори зумовлюють швидкість мінералізації рослинних решток. Звідси зрілість екосистеми ґрунту визначається кількістю ланок трофічного ланцюга, якими передається енергія і елементи живлення [34]. Внаслідок інтенсивного використання ґрунтів змінюються їх властивості, а отже, і родючість. Загальновідомо, що при окультуренні ґрунту (для здійснення управління в агроекосистемі) в нього вноситься додаткова (антропогенна) енергія, а при його деградації вона витрачається. Як зазначено у роботі [25], ця енергія слугує причиною всіх негараздів, які супроводжують розвиток сучасного сільськогосподарського виробництва.

Антропогенне навантаження у результаті можна охарактеризувати кількістю привнесеної в екосистему сумарної енергії (ккал, МДж). Слід зауважити, що ця енергія не тотожна витратам антропогенної енергії на виробництво рослинної продукції. Її основні елементи – це енергетичне навантаження від техніки, агрохімікатів, а також використаних при обробі ґрунту паливно-мастильних матеріалів. Загальна величина потоку і витрат антропогенної енергії при вирощуванні певної культури складається з енергетичних витрат на її вирощування і енергії антропогенного навантаження. Враховуючи екологічні імперативи, додатковою складовою енерговитрат при оцінці енергетичної ефективності системи землеробства слід вважати також витрати на відновлення параметрів ґрунтової родючості. На думку Г. А. Булаткіна і В. В. Ларіонова [7], цей показник потрібно визначати як відношення накопиченої у продукції енергії до витрат антропогенної енергії на виробництво продукції і відновлення параметрів родючості ґрунту, тобто сукупних енерговитрат. Співставлення енерговитрат, розрахованих із економічних міркувань, і реального потоку антропогенної енергії, що надходить в екосистему, свідчить про суттєві розбіжності у структурі складових цих параметрів. Залежно від норм внесення добрив, засобів захисту рослин відношення енергії, накопиченої у прирості врожаю, до енерговитрат на отримання цих агрохімікатів може досягати значення 3,5–4,9. При цьому, використання високих норм мінеральних добрив призводить до зниження ефективності роботи системи, у даному випадку – коефіцієнта корисного використання фотосинтетично активної радіації.

У більшості випадків погодно-кліматичні і ґрунтові умови не є оптимальними для того, щоб відбувалися фотосинтез і формування максимальної продуктивності агроекосистем. Свентицький І. І. [39] запропонував при моделюванні родючості ґрунту застосовувати таку величину, як коефіцієнт оптимальності факторів ( $K_{o,ф}$ ), який безпосередньо впливає на перебіг процесу фотосинтезу:

$$K_{o.\phi} = \frac{P_{o.\phi}}{P_{o.\phi}}$$

де  $P_{o.\phi}$  – продуктивність фотосинтезу певного виду рослин або культури при даному значенні екологічного фактора;

$P_{o.\phi}$  – та сама величина при оптимальному значенні фактора.

Встановивши коефіцієнти оптимальності, що характеризують властивості ґрунтів, можна кількісно, на енергетичній основі визначити їх потенційну родючість

$$P_p = \sum_1^n \Delta W_\phi \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \dots, K_m,$$

де  $\Delta W_\phi$  – фотосинтетична енергія сонячного випромінювання, що надходить на одиницю поверхні Землі за проміжок часу, протягом якого коефіцієнт оптимальності екологічних факторів, які впливають на продуктивність ( $K_1, K_2, K_3, \dots, K_m$ ), залишається практично незмінним;

$n$  – кількість інтервалів протягом вегетаційного періоду, за які враховується надходження фотосинтетичної енергії.

На основі наведеної формули було запропоноване термінологічне визначення потенційної родючості ґрунтової екосистеми як її здатності забезпечувати відповідними умовами росту і розвитку рослин, за яких вони протягом вегетаційного періоду, при відповідних погодно-кліматичних умовах, використовують ту чи іншу кількість променевої енергії на формування своєї продуктивності.

Для вирішення такого складного завдання, як управління процесом родючості, потрібні широкі дослідження закономірностей функціонування різних типів екосистем ґрунту та їх продуктивності. Щодо цього важливим є моделювання. Вдосконалюючи моделі родючості, вчені почали враховувати екологічні принципи та умови, що забезпечують продуктивність і створюють екологічну напругу в екосистемах. Найважливіші з них – принцип екологічної безпеки, енергетичної оптимізації та екологічної цілеспрямованості.

Екологічна безпека означає відсутність у ґрунтових екосистемах токсичних і шкідливих для нормального розвитку рослин та організмів речовин, а також високу буферну здатність ґрунту. Енергетична оптимізація як одна з важливих умов високої родючості ґрунту, досягається завдяки встановленню відповідної рівноваги між енергією, накопиченою в рослинах, і внутрішньою енергією у ґрунтовій екосистемі, яка знаходиться у біоорганічній формі. Умови енергетичної рівноваги і буферно-ємнісні характеристики визначають межі оптимумів властивостей ґрунту. Підвищення відповідної ємності (кислотно-основної буферності чи, наприклад, буферності стосовно конкретного

мікроелемента) у результаті призводить до екологічних втрат. Рівновага й екологічна доцільність визначають також кількісні показники акумуляції енергії відповідною екосистемою ґрунту, а також оптимальні розміри її вилучення з урожаєм. Не обґрунтоване збільшення вилученої енергії спричиняє виснаження і деградацію ґрунту. З урахуванням вище викладеного, можна стверджувати, що найбільш родючим ґрунтом, з екологічної точки зору є той, у якому рослини витрачають менше енергії на підтримання своєї життєдіяльності (дихання, використання елементів живлення, транспірацію тощо) і можуть акумулювати більше сонячної енергії на одиницю площі за відповідний проміжок часу.

Стійкість функціонування агроекосистем, а отже, й їх продуктивність значною мірою залежить від кількості органічної речовини, яка повертається в ґрунт. Ще у кінці минулого століття в умовах Полісся і Лісостепу України щорічно на один гектар сівозмінної площі вносилося, відповідно, 9–11 і 7–9 т органічних добрив, що забезпечувало бездефіцитний баланс гумусу. Наразі ситуація кардинально змінилася в бік різкого зменшення обсягів їх внесення. Дана ситуація спричинила посилення уваги вчених до можливостей застосування відновлювальних джерел енергії [6, 20, 21, 30 та ін.].

Енергетичний набір спожитої енергії на нашій планеті до середини нинішнього століття планується на 18 % забезпечити за рахунок відновлювальних джерел, а до кінця XXI ст. цей показник має досягти до 26 %. При цьому, більше половини цієї енергії, згідно з розробленим сценарієм, слід досягати за рахунок біомаси [43]. В Україні часка біоенергетики серед відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) у 2001 р. становила 17,9 % (0,99 млн т умовного палива), а до 2030 р. планується довести виробництва теплової і електричної енергії за рахунок біоенергетики в загальному обсязі ВДЕ до 46,9 %, що становитиме 10,13 млн т умовного палива. Загальний щорічний потенціал біомаси і торфу в перерахунку на млрд м<sup>3</sup> природного газу сягає 20,8 [20].

У наш час в країнах ЄС і США набуло поширення використання соломи та рослинних решток на енергетичні цілі. Проте, як вказується в роботі [6], сучасні тенденції використання соломи та інших рослинних решток свідчать про нагальну потребу у проведенні додаткових досліджень щодо визначення їх кількості, яку доцільно використовувати не лише для отримання енергії, а і для використання в якості удобрення ґрунтів з урахуванням насичення сівозмін зерновими культурами, обмеження фітопатогенного навантаження на злакові культури, розвитку бур'янів, управління азотним режимом ґрунту тощо.

Вирішення питання щодо оптимальної кількості повернення в ґрунт фотосинтезованої агроценозами у процесі річного циклу органічної речовини, а отже, і вільної енергії можливе за умови моделювання ґрунтово-екологічних систем та родючості ґрунту в цілому на енергетичній основі.

Наразі робляться спроби побудувати екологічні моделі, які спираються на теорію катастроф. Це найсучасніший і досить перспективний метод екологічного

моделювання, який із великим успіхом може бути використаний для розв'язування екологічних задач найрізноманітніших класів. Моделі цього типу застосовують до систем, які характеризуються диссипативністю енергетичних й матеріальних потоків [29]. Саме такими властивостями характеризуються екосистеми ґрунту, їх біогеохімічні цикли та енергетичні потоки. Зокрема, для екосистеми ґрунту характерним є перебування її у багатьох станах, що пов'язано з добовими, сезонними, річними і багаторічними циклами природної динаміки (бімодальність). Прикладом може бути модель кругообігу оксиду вуглецю (IV) у системі «фітоценоз – гумусові речовини ґрунту» [26].

У сучасній літературі систему «фітоценоз–гумусові речовини ґрунту» відносять до складних саморегулюючих систем із зворотніми зв'язками, які сформувалися у ході еволюції екосистеми в цілому, коли склад і властивості гумусу залежали від біоти тою ж мірою, якою біоценоз залежав від особливостей будови гумусового профілю. Зворотні зв'язки є основним механізмом, що відповідає за здатність системи до саморегуляції. Безумовно, що характер зв'язку на різних стадіях функціонування агроценозів весь час змінюється. Цілком вірогідно передбачити, що на ранніх стадіях їх формування розвиток кожного із параметрів у цій системі стимулював розвиток іншого, а через нього – і свій власний. У подальшому цей зв'язок міг ставати менш тісним і навіть переходити у від'ємний.

На основі концептуальної моделі трансформації органічного вуглецю у системі «фітоценоз – гумусові речовини ґрунту», наявних літературних даних та власних досліджень встановлено, що кількість вуглецю, яка щорічно повинна поступати в ґрунт з усіма потоками (при відсутності абіотичного привнесення – виносу) для підтримки бездефіцитного сальдо балансу гумусу має становити не менше 6,2 т/га. Враховуючи те, що в умовах Лісостепу України максимальна продуктивність природних фітоценозів може досягати до 10 т/га органічного вуглецю [26, 44], для подальшого нормального функціонування екосистеми можна відчувувати лише 38 % органічного вуглецю від утворюваного у процесі фотосинтезу. У випадку, коли щорічні втрати органічного вуглецю від процесів ерозії зростають, кількість внесення його в ґрунт повинна бути суттєво збільшена. Наприклад, при величині абіотичного привнесення-винусу, що дорівнює лише 9 – 10 кг гумусу на 1 га, кількість органічного вуглецю, який повинен поступити в ґрунт, має зрости до 7,3 т/га. Проведені нами розрахунки переконливо свідчать, що протиерозійні заходи можуть бути одним із дієвих засобів управління стійкістю ґрунтових екосистем.

Характерною ознакою валиабельності концептуальної моделі трансформації органічного вуглецю у системі «фітоценоз – гумусові речовини ґрунту» є також співпадання визначених значень коефіцієнтів гуміфікації і мінералізації органічної речовини з літературними даними [45].

### Висновки і перспективи подальших досліджень

Підсумовуючи аналітичний огляд літератури з питань енергетики органічної речовини ґрунту як основи стійкості його функціонування, слід зазначити, що, з метою подальшого поглибленого вивчення в ґрунті різноманітних процесів і зручності їх описання, досить перспективним слід вважати залучення положень термодинаміки й моделювання ґрунтово-екологічних систем, у тому числі і моделей, які ґрунтуються на базі теорії катастроф.

Подальші дослідження слід зосередити на вивченні питань аналізу енергетичної ефективності вирощування сільськогосподарських культур у конкретних ґрунтово-кліматичних зонах, а також на вдосконаленні методики розрахунку надходження в ґрунти агроecosystem як антропогенної енергії, так і енергії, що накопичується у процесі формування врожаю.

### Література

1. Агроэкология / В. А. Черников, Р. М. Алексахин, А. В. Голубев [и др.] ; под ред. В. А. Черникова, А. И. Черкеса. – М. : Колос, 2000. – 536 с.
2. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия: метод. руководство; под. ред. В. Н. Кирюшина. – М. : ФГНУ «Росинформмагротех», 2005. – 784 с.
3. Алиев С. А. Биоэнергетика органического вещества / С. А. Алиев. – Баку : Изд-во ЭЛМ, 1978. – 66 с.
4. Алиев С. А. Экология и энергетика биохимических процессов превращения органического вещества / С. А. Алиев. – Баку : Изд-во ЭЛМ, 1978. – 112 с.
5. Баер Г. Энергия, эксергия, анергия / Г. Баер // Энергия и эксергия / под ред. В. М. Бродянского; пер. с нем. В. Н. Калинина. – М.: Мир, 1968. – С. 11–27.
6. Безуглий М. Д. Науково-практичні підходи до використання соломи та рослинних решток / М. Д. Безуглий, В. М. Булгаков, І. В. Гриник // Вісн. аграр. науки. – 2010. – № 3. – С. 5–8.
7. Булаткин Г. А. Энергетическая эффективность земледелия и агроecosystem: взаимосвязи и противоречия / Г. А. Булаткин, В. В. Ларионов // Агрохимия. – 1997. – № 3. – С. 63–66.
8. Булгаков Д. С. Аспекты теории плодородия почв / Д. С. Булгаков, Б. Ф. Опарин // Почвоведение. – 1999. – № 1. – С. 63–72.
9. Вернадский В. И. Очерки геохимии / В. И. Вернадский // Библиограф. журн. ORGANIC. UA. – 2013. – Кн. 11, т. 2. – 488 с.
10. Вильямс В. Р. Почвоведение / В. Р. Вильямс. – 3-е изд. – М. : Сельхозгиз, 1936. – 648 с.
11. Волобуев В. Р. Некоторые вопросы энергетики почвообразования / В. Р. Волобуев // Почвоведение. – 1958. – № 7. – С. 18–25.
12. Волобуев В. Р. Введение в энергетику почвообразования / В. Р. Волобуев. – М. : Наука, 1974. – 128 с.

13. Горшков В. В. Информация в живой и неживой природе / В. В. Горшков, В. Г. Горшков // Экология. – 2002. – № 3. – С. 163–169.
14. Джерард А. Дж. Почвы и формы рельефа: пер. с англ. / А. Дж. Джерард; под ред. Ю. П. Селивестрова. – Л.: Недра, 1984. – 368 с.
15. Злобин Ю. А. Агроэкология: круг проблем и перспективы / Ю. А. Злобин, Б. М. Миркин // Биологические науки. – 1992. – № 1. – С. 5–18.
16. Ковда В. А. Почвенный покров, его улучшение, использование и охрана / В. А. Ковда. – М.: Наука, 1981. – С. 5–15.
17. Ковда В. А. Основы учения о почвах / В. А. Ковда. – М.: Наука, 1973. – Т. 1–2. – 426 с.
18. Ковда В. А. Живое вещество, биосфера и почвенный покров планеты / В. А. Ковда // Почвоведение. – 1991. – № 6. – С. 5–14.
19. Козин В. К. Запас энергии в гумусе как критерий для бонитировки почв / В. К. Козин // Почвоведение. – 1990. – № 3. – С. 153–155.
20. Конечников А. Е. Возобновляемая энергетика Украины / А. Е. Конечников // Энергия, экономика, техника, экология. – 2006. – № 11. – С. 15–19.
21. Лось Л. В. Вирощування і газифікація біопалив – ефективний шлях вирішення «енергетичних» і екологічних проблем на прикладі міскантуса гігантеуса / Л. В. Лось, В. О. Зінченко, В. Р. Жайвороновський // Вісник ЖНАЕУ. – 2011. – № 2, т.1. – С. 46–57.
22. Мамай И. И. Устойчивость природных территориальных комплексов / И. И. Мамай // Вестн. Московск. ун-та. Сер. геогр. – 1993. – № 4. – С. 3–10.
23. Межжерин В. А. Закон минимума Либиха: возможности его верного прочтения и практического применения / В. А. Межжерин // Экология. – 1994. – № 2. – С. 3–8.
24. Мельник Л. Г. Екологічна економіка: [підручник] / Л. Г. Мельник. – 2-ге вид., випр. і допов. – Суми: Університетська книга, 2003. – 348 с.
25. Миркин Б. М. Управление в агроэкосистеме / Б. М. Миркин, Я. Т. Суюндуков, Р. М. Хазиахметов // Экология. – 2002. – № 4. – С. 103–107.
26. Надточий П. П. Модель круговорота углерода и критерии устойчивости системы фитоценоз-гумусовые вещества почвы / П. П. Надточий, Ф. В. Вольвач // Докл. НАН Украины. – 1993. – № 8. – С. 165–171.
27. Надточий П. П. Управление плодородием почв Лесостепи Украины в условиях экологического кризиса / П. П. Надточий // Вісн. аграр. науки. – 1996. – № 11. – С. 10–14.
28. Надточий П. П. Внутрішня енергія гумусу – критерій оцінки агроекологічного стану ґрунтів / П. П. Надточий, Л. О. Рудницький // Вісн. ДАЕУ. – 2003. – № 1. – С. 8–15.
29. Надточий П. П. Екологія ґрунту: моногр. / П. П. Надточий, Т. М. Мислива, Ф. В. Вольвач. – Житомир: Рута, 2010 – 473 с.



30. *Надточій П. П.* Перспективи вирощування міскантусу як енергетичної культури в агроекологічних умовах Полісся України / *П. П. Надточій, Т. М. Мислива* // Вісн. ЖНАЕУ. – 2011. – № 2, т. 1. – С. 10–22.

31. *Ничипорович А. А.* Фотосинтез и некоторые принципы применения удобрений как средство оптимизации фотосинтетической деятельности и продуктивности растений / *А. А. Ничипорович* // Агрехимия. – 1971. – № 1. – С. 3–13.

32. *Ничипорович А. А.* Фотосинтез, почва и единая система питания и продуктивность растений: параметры и модели плодородия почв и продуктивности агроценозов / *А. А. Ничипорович*. – Пушино, 1985. – 527 с.

33. *Одум Ю.* Экология / *Ю. Одум*. – М.: Мир, 1986. – Т.1. – 328 с.; Т. 2. – 376 с.

34. *Одум Ю.* Основы экологии / *Ю. Одум*. – М.: Мир, 1975. – 742 с.

35. *Оприатов В. А.* Энтропия биосистем / *В. А. Оприатов* // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 6. – С. 3–14.

36. *Орлов Д. С.* Практикум по химии гумуса / *Д. С. Орлов, Л. А. Гришина*. – М.: Наука, 1981. – 271 с.

37. *Пригожин И.* Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой: пер. с англ. / *И. Пригожин, И. Стэнгерс*; общ. ред. *В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича, Ю. В. Сачкова*. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.

38. *Рустамов Н. А.* Биомасса – источник энергии / *Н. А. Рустамов, С. И. Зайцев, Н. И. Чернова* // Энергия, экономика, техника, экология. – 2005. – № 6. – С. 20–28.

39. *Свентицкий И. И.* Биоклиматическая оценка плодородия геодермы / *И. И. Свентицкий* // Почвоведение. – 1992. – № 4. – С. 91–100.

40. *Светлосанов В. А.* Устойчивость и стабильность природных экосистем: модельный аспект / *В. А. Светлосанов*. – М.: ВИНТИ, 1990. – Т. 8. – 109 с.

41. *Свирижев Ю. М.* Устойчивость биологических сообществ / *Ю. М. Свирижев, Д. О. Логофет*. – М.: Наука, 1978. – 352 с.

42. *Спозито Г.* Термодинамика почвенных растворов / *Г. Спозито*. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 240 с.

43. Человечество и энергия / *Е. П. Велихов, А. Ю. Гагаринский, С. А. Субботин, В. Ф. Цибульский* // Энергия, экономика, техника, экология. – 2007. – № 8. – С. 3–6.

44. *Титлянова А. А.* Режимы биологического круговорота / *А. А. Титлянова, М. И. Тесаржева*. – Новосибирск: Наука, 1991. – 150 с.

45. *Фокин А. Д.* Устойчивость почв и наземных экосистем: подходы к систематизации понятий и оценке / *А. Д. Фокин* // Известия ТСХА. – 1995. – Вып. 2. – С. 71–85.

46. Экосистемы в критических состояниях / отв. ред. *Ю. Г. Пузаченко*. – М.: Наука, 1989. – 157 с.

47. *Эткинс П.* Порядок и беспорядок в природе / *П. Эткинс*; пер. с англ. *Ю. Г. Рудого*. – М.: Мир, 1987. – 224 с.