



Землеробство, грунтознавство, агрохімія

УДК 631.445.3:631.8

© 2024

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКО- ГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ЗА РІЗНИХ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ СІРОГО ЛІСОВОГО ҐРУНТУ

С.Ю. Булигін¹, С.В. Вітвіцький², О.Л. Тонха³, М.А. Ткаченко⁴

¹доктор сільськогосподарських наук, професор, академік НААН

²кандидат сільськогосподарських наук, доцент

³доктор сільськогосподарських наук, професор

⁴доктор сільськогосподарських наук, професор, член-кореспондент НААН

¹⁻³Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

⁴ННЦ «Інститут землеробства НААН»

вул. Машинобудівників, 26, смт Чабани Фастівського р-ну Київської обл., 08162, Україна

e-mail: ¹s.bulygin@ukr.net, ²slavavit@ukr.net,

³oksana16095@gmail.com, ⁴tkachenko@gmail.com

ORCID: ¹0000-0002-1525-595X, ²0000-0002-6856-3817,

³0000-0003-4175-9622, ⁴0000-0001-6128-4703

Надійшла 20.03.2024

Мета. Провести біоенергетичне оцінювання систем удобрення культур на сірому лісовому ґрунті в умовах стаціонарного досліду. **Методи.** Використовували загальнонаукові (польовий, морфолого-генетичний, порівняльно-аналітичний, агроаналітичний, лабораторний) і спеціальні методи (методика біоенергетичного оцінювання систем землеробства за Ю.О. Тараріко). **Результати.** Встановлено, що тривале застосування мінеральних добрив на фоні внесення вапнякових меліорантів на сірому лісовому ґрунті сприяє суттєвому збільшенню вмісту гумусу в орному шарі. Визначено агрономічну та енергетичну ефективність вирощування сільськогосподарських культур у ланці сівозміни, розраховано енерговміст основної й побічної продукції, затрати антропогенної енергії, енергопотенціал органічної речовини орного шару і показник біологічної акумуляції енергії. **Висновки.** Серед варіантів удобрення найвищий уміст гумусу в орному шарі — 1,21% — забезпечує внесення подвійної норми мінерального добрива за нейтралізації надмірної кислотності. Розрахунки енергопотенціалу органічної речовини орного шару сірого лісового ґрунту показали, що найнижчий він був за внесення подвійної норми мінерального добрива на фоні вапнування — 752 ГДж/га, а мак-

симальний на перелозі — 1739 ГДж/га, що приблизно в 2,5 раза більше, ніж у варіанті стаціонарного досліді. Коефіцієнт енергетичної ефективності у ланці сівозміни був мінімальний у разі внесення одиної норми мінерального добрива — 7,5, на фоні вапнування за внесення одиної чи подвійної норми мінерального добрива досягав 8,8, а максимальне значення мав у варіанті «сидерати + 1,0 Нг СаСО₃» — 9,4. Загалом величина цього коефіцієнта значно залежала від культури сівозміни. Найменші його значення спостерігалися у разі вирощування сої — 6,6–7,8; за вирощування ячменю ярого вони зростали до 9,4–10,0 і досягали максимальних значень за вирощування гречки — 9,0–11,2. Найнижчі значення біологічної акумуляції енергії (БАЕ) були характерні для варіантів із внесенням одиної норми мінерального добрива та сидератів на фоні вапнування — 71–76 ГДж/га, у разі внесення вапна та подвійної норми мінерального добрива вони сягали максимуму — 170 ГДж/га.

Ключові слова: сірий лісовий ґрунт, енергопотенціал органічної речовини, енергетична ефективність.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202405-01>

Гострота екологічної ситуації, що склалася на планеті, нестійкість і низька продуктивність землеробства, виснаження та деградація ґрунтів, необхідність розроблення адаптивно-ландшафтних систем землеробства потребують нових підходів до оцінювання ґрунтових енергетичних ресурсів. Зокрема, потрібно здійснити системний аналіз та оцінити потенціал природних і антропогенних ґрунтових ресурсів, інтенсивність і направленість речовинно-енергетичних потоків у них.

Відомо, що впродовж останніх десятиліть затрати енергії на виробництво сільськогосподарської продукції істотно зросли. Доведено, що сільське господарство, в якому на виробництво харчової калорії витрачається 10 калорій непоновлюваної енергії, є неперспективним [1].

Енергетична ефективність змінюється відповідно до закону А. Тюрго — Т. Мальтуса. Цей важливий для сільськогосподарської екології закон формулюється так: збільшення питомих вкладень енергії в агроєкосистему не дає адекватного, пропорційного збільшення її продуктивності. Наприклад, у США збільшення урожайності кукурудзи у 2,61 раза із 1945 по 1970 р. за рахунок впровадження індустриальних методів виробництва

зумовило десятикратне зростання загальних витрат енергії, при цьому біоенергетичний ККД зменшився у 4,4 раза, витрати енергії на виробництво основних засобів зросли на 964%, а безпосередньо в сільському господарстві — на 318% [2].

На думку Ю.О. Тараріка [3], головною перевагою проведення енергетичного оцінювання є можливість відобразити усі складові сільськогосподарського виробництва в єдиних постійних величинах у певний проміжок часу на відміну від вартісних параметрів, що змінюються через інфляційні процеси. Для цього науковець пропонує використовувати такі показники енергетичного оцінювання: E_a — енергія антропогенна, або енергоємність агротехнології, що складається з енергетичних еквівалентів використаних засобів виробництва — насіння, агрохімікатів, енергоносіїв, технічних засобів; E_b — енергія врожаю, або енергія, зв'язана в господарсько цінній частині основної й побічної продукції; K_{ee} — коефіцієнт енергетичної ефективності агротехнологій (співвідношення E_b та E_a). За значення коефіцієнта енергетичної ефективності менш ніж 2 виробництво вважається неенергетичним; за значення 2–4 — низькоенергетичним; значення в діапазонах 4–6,

6–8 та більш ніж 8 свідчать про те, що енергетична ефективність є відповідно середньою, високою та дуже високою.

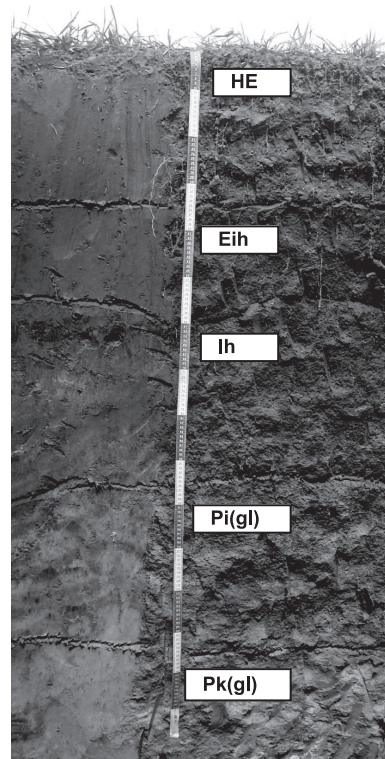
Загальновідомо, що головним джерелом органічної речовини в природних біоценозах є рослинні рештки вищих зелених рослин, а в агроценозах — поверхневі і кореневі рештки сільськогосподарських культур та органічні добрива. Показником, що відображає й оцінює акумулятивну функцію органічної речовини ґрунту, може бути енергопотенціал, який визначається насамперед запасом гумусу та біогенних елементів у ньому. Тому енергопотенціал органічної речовини ґрунту — це кількість енергії, яка міститься в інертному гумусі, лабільних гумусових речовинах, мікробній біомасі та негуміфікованій органічній речовині в шарі ґрунту, що досліджується на одиниці площі і вимірюється в ГДж/га або кДж/м² [4–6]. Енергетичний аналіз сучасних агроєкосистем свідчить про те, що антропогенна енергія значною мірою визначає продуктивність агрофітоценозів [7–9].

Технології виробництва сільськогосподарської продукції мають забезпечувати максимальне використання природних, агроенергетичних і агрокліматичних ресурсів, зменшувати питомі витрати антропогенної енергії на одиницю продовольства та знижувати їх негативну дію на довкілля, в тому числі на родючість ґрунту.

Отже, інтенсифікація сільськогосподарського виробництва пов'язана зі зростанням витрат непоновлювальної енергії. Тому так важливо створювати технології вирощування сільськогосподарських культур з мінімальними енергетичними витратами [10–12].

Мета досліджень — провести біоенергетичне оцінювання систем удобрення культур на сірому лісовому ґрунті на фоні внесення вапна, сидератів і нетоварної частки врожаю.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження проводили в умовах стаціонарного польового досліду «Вивчення технологічних прийомів розширеного відтворення і регулювання родючості



Будова профілю сірого лісового ґрунту

лісового сірого ґрунту» [13] ІННЦ «Інститут землеробства НААН».

Морфологічний профіль досліджуваного ґрунту подано на рисунку, а його генетичний опис наведено нижче.

HE₀₋₃₄ — гумусово-елювіальний, сірий, ущільнений, свіжий, нестійкої пилувато-зернисто-грудочкуватої структури, ледь помітна присипка SiO₂, легкосуглинковий, тонкопористий, добре насичений коренями рослин, перехід ясний.

Eih₃₅₋₅₅ — елювіально-ілювіальний слабогумусований, бурувато-сірий, свіжий, грудкувато-горіхуватий, тонкопористий, щільний, добре помітна присипка SiO₂ по гранях окремоостей і напливами колоїдів, наявні корені рослин, перехід ясний.

Ih₅₆₋₉₅ — ілювіальний, слабкогумусований, бурий, із темними гумусовими патьоками, лакування гідроксиду заліза на структурних окремостях призматичної форми, трапляються тонкі корені трав'янистих рослин, перехід ясний.

Pi(gl)₉₆₋₁₃₁ — перехідний до породи, слабоколювіюваний, вологий, жовтувато-буруватий, трапляються кореневини і залізо-марганцеві пунктуації, місцями спорадично оглесний, перехід поступовий.

Pk(gl)₁₃₂₋₁₇₀ — материнська порода, білесувато-палевий лес, вологий, карбонати у вигляді прожилок.

Встановлено, що ґрунт дослідної ділянки — сірий лісовий грубопилувато-легко-суглинковий на лесі. Він характеризується такими фізико-хімічними та агрохімічними показниками: $\rho_{\text{H}_{\text{cop}}}$ — 6,0; вміст гумусу в орному шарі — 1,13–1,21%, у підорному — 0,8–1,05%; забезпеченість сполуками рухомих фосфатів і рухомого калію — відповідно 96 і 58 мг/кг ґрунту. Вміст сполук лужногідролізованого азоту в орному шарі ґрунту дуже низький — 3,8 мг/кг ґрунту.

Дослідження ефективності вапнування та удобрення проводили за такою схемою: 1 — без добрив (контроль); 2 — 1,0 Нг CaCO₃; 3 — N₆₀P₃₀K₄₅; 4 — N₆₀P₃₀K₄₅ + 1,0 Нг CaCO₃; 5 — сидерати + 1,0 Нг CaCO₃; 6 — побічна продукція + сидерати; 7 — N₁₂₀P₆₀K₉₀ + 1,0 Нг CaCO₃. Другим «абсолютним» контрольним варіантом був переліг із 1974 р.

Енергетичне оцінювання систем удобрення здійснювали в ланці сівозміни з внесенням на 1 га сівозмінної площі під гречку N₆₀P₃₀K₆₀, під ячмінь ярий — N₆₀P₃₀K₄₅, під сою — N₃₀P₃₀K₄₅. Повторення досліду — 3-кратне; площа посівної ділянки — 180 м², облікової — 100 м²; розміщення ділянок — послідовне. Фосфорні (суперфосфат гранульований) і калійні (калій хлористий) добрива вносили під зяблевий обробіток ґрунту, азотні (аміачна селітра) — під передпосівну культивуацію та в підживлення.

Система обробітку ґрунту єдина за всіх варіантів удобрення — полицева оранка. Як сидерат використовували гірчицю білу, яку висівали після ярих зернових у липні–на початку серпня. Система захисту рослин однакова в усіх варіантах досліду.

Енергопотенціал органічної речовини ґрунту (ГДж/га) розраховували за формулою:

$$Q = Q_{\text{ir}} + Q_{\text{лг}} + Q_{\text{нр}},$$

де Q_{ir} — енергопотенціал інертного гумусу; $Q_{\text{лг}}$ — енергопотенціал лабільного гумусу; $Q_{\text{нр}}$ — енергопотенціал негуміфікованої органічної речовини.

Енергопотенціал інертного гумусу розраховували за формулою:

$$Q_{\text{ir}} = Q_{\text{r}} - Q_{\text{лг}},$$

де Q_{r} — енергопотенціал гумусу; $Q_{\text{лг}}$ — енергопотенціал лабільного гумусу.

Енергопотенціал гумусу розраховували за формулою:

$$Q_{\text{r}} = 2165 \cdot \Gamma \cdot h \cdot d,$$

де Γ — вміст гумусу, %; h — потужність шару ґрунту, см; d — щільність ґрунту, г/см³.

Запаси енергії в лабільних гумусових кислотах розраховували за формулами:

$$Q_{\text{лгк}} = 1,73 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ЛГК} \cdot h \cdot d \cdot g,$$

$$Q_{\text{лфк}} = 2,25 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ЛФК} \cdot h \cdot d \cdot g,$$

де 1,73 та 2,25 — коефіцієнт перерахунку вуглецю гумусових кислот на їх загальну біомасу; ЛГК та ЛФК — вміст лабільних гумінових кислот та лабільних фульвокислот, %; h — потужність шару ґрунту, см; d — щільність ґрунту, г/см³; g — теплота згорання гумусових кислот, кал/г.

Проби ґрунту відбирали з глибини 0–10 см, 10–20, 20–30 і 30–40 см згідно з ДСТУ [14]. Вміст гумусу визначали методом І.В. Тюріна в модифікації В. Сімакова відповідно до ДСТУ [15]. Статистичну обробку отриманих даних проводили методом дисперсійного аналізу з використанням комп'ютерних технологій (ПК «Agrostat», MS OfficeExcel).

Результати досліджень. Вміст загального гумусу у стаціонарному досліді ННЦ «Інститут землеробства НААН» у сірому лісовому ґрунті оцінюється як низький: від 0,91 до 1,21% у шарі 0–20 см (табл. 1). Внесення тільки мінеральних добрив, без вапнування, спричинило міграцію гумусових речовин з верхнього, глибиною до 0–10 см шару, у нижній, на глибину 10–20 см шар ґрунту, якщо порівнювати вміст гумусу з варіантами без добрив, побічною продукцією та сидератами. Однак

1. Уміст загального гумусу в сірому лісовому ґрунті, %

Варіант	Глибина, см			
	0–10	10–20	20–30	30–40
Без добрив (контроль)	1,13	1,02	0,80	0,73
1,0 Нг CaCO ₃	1,11	0,99	0,66	0,39
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅	1,01	1,11	0,82	0,66
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅ + 1,0 Нг CaCO ₃	1,02	0,91	0,64	0,38
Сидерати + 1,0 Нг CaCO ₃	1,02	0,95	0,73	0,33
Побічна продукція + сидерати	1,12	1,10	0,93	0,68
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₉₀ + 1,0 Нг CaCO ₃	1,21	1,19	0,90	0,39
Переліг	2,80	1,42	1,05	0,89
НІР ₀₅	0,07	0,10	0,12	0,20

міграція гумусових речовин у нижні горизонти не спостерігається у варіантах із застосуванням вапна: фіксується поступове зниження вмісту гумусу з глибиною.

Внесення тільки вапна (1,0 Нг) істотно не змінило вміст гумусу в шарі ґрунту глибиною 0–20 см порівняно з контрольним варіантом (без добрив). Водночас у варіантах з вапном уміст гумусу в шарах ґрунту 20–30 і 30–40 см був істотно нижчим порівняно з варіантами, де вапно не вносили (без добрив, варіант із внесенням тільки NPK та варіант із використанням побічної продукції і сидератів).

На фоні вапнування у варіантах із внесенням мінеральних добрив і використанням сидератів спостерігається тенденція до зниження вмісту гумусу порівняно з контрольним варіантом: на 0,07–0,11% у шарі 0–20 см та на 0,07–0,40% у шарі 20–40 см.

Після використання побічної продукції та сидератів достовірно підвищився вміст гумусу в шарах ґрунту 10–20 і 20–30 см порівняно з контрольним варіантом: відповідно на 0,08 та 0,13%. Серед варіантів досліді з удобренням найвищим умістом загального гумусу характеризувався шар ґрунту глибиною 0–30 см; коли було внесено подвійну норму мінеральних добрив N₁₂₀P₆₀K₉₀ на фоні вапнування у шарі 0–10 см він становив 1,21, у шарі 10–20 см — 1,19, у шарі 20–30 см — 0,90%.

Переліг характеризується найвищим умістом гумусу в шарі ґрунту 0–40 см

порівняно з усіма іншими варіантами досліді. Найбільша кількість гумусу в перелозі зосереджена в шарі 0–10 см — вона сягає 2,80%, що перевищує вміст гумусу у варіанті досліді з найвищим рівнем удобрення у 2,3 раза.

Слід зазначити, що 45-річне використання сірого лісового ґрунту під ріллею істотно зменшило вміст загального гумусу порівняно з перелогом. Вплив вапнування і удобрення на вміст гумусу менш істотний і перебуває на рівні тенденцій.

Описані вище закономірності розподілу вмісту гумусу за варіантами досліді відобразилися на запасах енергії в гумусі (табл. 2). Так, найменший енергопотенціал був у варіанті досліді з внесенням одинарної норми мінеральних добрив — 627 ГДж/га. Вапнування ґрунту з внесенням мінеральних добрив та сидератів збільшило енергопотенціал до 634 ГДж/га; внесення лише одного меліоранту, а також внесення зеленого добрива сукупно з побічною продукцією сприяло ще більшому зростанню енергопотенціалу — до 690–696 ГДж/га. Серед варіантів удобрення найвище значення енергопотенціалу забезпечувало внесення подвійної норми мінерального добрива на фоні вапнування — 752 ГДж/га. Максимальний енергопотенціал органічної речовини сірого лісового ґрунту зафіксовано на перелозі — 1739 ГДж/га, що приблизно у 2,5 раза більше, ніж у варіантах стаціонарного досліді.

2. Енергопотенціал органічної речовини орного шару сірого лісового ґрунту, ГДж/га

Варіант	Уміст гумусу, %	Запас енергії в гумусі	Запас енергії в негуміфікованій речовині	Енергопотенціал органічної речовини ґрунту
Без добрив (контроль)	1,13	685	18	703
1,0 Нг CaCO ₃	1,11	673	17	690
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅	1,01	612	15	627
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅ + 1,0 Нг CaCO ₃	1,02	618	16	634
Сидерати + 1,0 Нг CaCO ₃	1,02	618	16	634
Побічна продукція + сидерати	1,12	679	17	696
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₉₀ + 1,0 Нг CaCO ₃	1,21	733	19	752
Переліг	2,80	1697	42	1739
НІР	0,08	48	2	52

Традиційно урожайність сільськогосподарських культур вважається інтегральним показником родючості ґрунту, оскільки вона відображає, як культури реагують на динаміку комплексу фізичних, агрохімічних, фізико-хімічних властивостей ґрунту і на застосування того чи іншого агротехнічного прийому. В сучасних умовах, визначаючи технологію чи прийом вирощування сільськогосподарської культури, слід враховувати її економічну та енергетичну ефективність.

У контрольному варіанті досліді (без добрив) та у варіанті із заробленням у ґрунт побічної продукції і сидератів урожайність гречки була найнижчою — 2,50–2,59 т/га (табл. 3). Внесення вапна підвищило урожайність до 2,67 т/га, одинарної норми мінерального добрива — до 2,84 т/га,

а сукупне внесення вапна і добрива — до 4,34 т/га. Сидерація на фоні меліорації була менш ефективною за впливом на урожайність — 3,50 т/га. Найвищий урожай гречки було отримано за внесення N₁₂₀P₆₀K₉₀ + 1,0 Нг CaCO₃ — 5,84 т/га.

Схожі закономірності впливу удобрення і меліорації ґрунту дослідного поля на урожайність були виявлені і під час вирощування ячменю ярого: у контрольному варіанті зібрано 3,6 т/га зерна, у варіанті з побічною продукцією та сидератами — 3,7 т/га. Внесення вапна збільшило доступність елементів живлення, що вплинуло на зростання врожаю до 3,90 т/га; за додаткового внесення сидератів на фоні меліорації він зріс до 4,20 т/га. Внесення одинарної норми мінерального добрива підвищило урожайність ячменю ярого

3. Урожайність культур залежно від удобрення

Варіант	Урожайність, т/га		
	Гречка	Ячмінь ярий	Соя
Без добрив (контроль)	2,50	3,60	2,36
1,0 Нг CaCO ₃	2,67	3,90	2,92
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅	2,84	4,80	3,22
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅ + 1,0 Нг CaCO ₃	4,34	5,40	3,36
Сидерати + 1,0 Нг CaCO ₃	3,50	4,20	2,86
Побічна продукція + сидерати	2,59	3,70	2,58
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₉₀ + 1,0 Нг CaCO ₃	5,84	6,90	4,58
НІР ₀₅	0,75	1,25	0,80

4. Енерговміст урожаю культур залежно від їх удобрення, ГДж/га

Варіант	Гречка			Ячмінь ярий			Соя			Усього по ланці сівозміни
	основна продукція	побічна продукція	енерговміст урожаю	основна продукція	побічна продукція	енерговміст урожаю	основна продукція	побічна продукція	енерговміст урожаю	
Без добрив (контроль)	48,5	79,1	127,6	66,9	80,0	146,9	44,5	45,5	90,0	364,5
1,0 Нг CaCO ₃	51,7	82,0	133,7	72,5	84,3	156,8	55,0	50,4	105,4	395,9
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅	55,0	84,8	139,8	89,2	97,3	186,5	60,7	53,0	113,7	440,0
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅ + 1,0 Нг CaCO ₃	84,1	110,3	194,4	100,4	106,0	206,4	63,3	54,3	117,6	518,4
Сидерати + 1,0 Нг CaCO ₃	67,8	96,1	163,9	78,1	88,7	166,8	53,9	49,9	103,8	434,5
Побічна продукція + сидерати	50,2	80,6	130,8	68,8	81,4	150,2	48,6	47,4	96,0	377,0
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₉₀ + 1,0 Нг CaCO ₃	113,2	135,8	249,0	128,3	127,7	256,0	86,3	65,0	151,3	656,3
НІР	7,3	11,7	18,3	11,6	18,7	25,2	6,9	10,1	17,8	33,3

до 4,80 т/га, поєднання такої кількості добрива з вапном — до 5,40 т/га, а максимальний урожай було отримано після внесення подвійної норми мінерального добрива на фоні хімічної меліорації — 6,90 т/га.

За вирощування сої мінімальний урожай було отримано у контрольному варіанті (без внесення добрив) — 2,36 т/га. Залишення у полі побічної продукції на фоні сидерації суттєво підвищувало урожайність культури — до 2,58 т/га, а внесення вапна як окремо, так і сукупно із зеленими добривами, сприяло ще більшому зростанню врожайності — до 2,86–2,92 т/га. Внесення одинарної норми мінерального добрива збільшило урожайність культури до 3,22 т/га, а вапнування на цьому фоні — до 3,36 т/га. Найбільший урожай сої отримали після внесення подвійної норми мінерального добрива й оптимізації реакції ґрунтового розчину — 4,58 т/га.

Розрахункові дані щодо енерговмісту врожаю культур ланки сівозміни свідчать про те, що його величина залежала від культури, яку вирощували, та від варіантів удобрення і меліорації (табл. 4). Незалежно від варіантів удобрення енерговміст врожаю був мінімальний у разі вирощування сої, більший — за вирощування гречки, а максимальний — за

вирощування ячменю ярого. У середньому за ланку сівозміни (три культури) за варіантами удобрення і меліорації найменший вихід енергії із основної та побічної продукції був у контрольному варіанті — 364,5 ГДж/га, а у разі внесення у ґрунт побічної продукції і сидератів — 377,0 ГДж/га. Внесення вапна істотно підвищило енерговміст врожаю до 395,9 ГДж/га, а додаткова сидерація посилила його ефективність до 434,5 ГДж/га.

Аналіз енерговмісту врожаю культур ланки сівозміни залежно від внесених мінеральних добрив свідчить про існування чіткої закономірності: зі зростанням норми мінерального добрива, передусім на фоні вапнування, різко зростає вихід енергії з урожаєм.

Так, у разі внесення одинарної норми мінерального добрива енерговміст урожаю ланки сівозміни становив 440,0 ГДж/га, на фоні меліорації він зростав до 518,4 ГДж/га, а після подвоєння норми мінерального добрива — до 656,3 ГДж/га.

Затрати антропогенної енергії у разі вирощування культур ланки сівозміни на єдиному фоні полицевого обробітку залежали насамперед від норм мінеральних добрив, частка яких у витратах антропогенної енергії сягає 35–50%, дещо меншою мірою — від культури (табл. 5). Найменші значення цього показника

5. Затрати антропогенної енергії залежно від удобрення культури, ГДж/га

Варіант	Гречка	Ячмінь ярий	Соя	Усього по ланці сівозміни
Без добрив (контроль)	13,5	15,6	13,5	42,6
1,0 Нг CaCO ₃	13,6	15,7	13,6	42,9
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅	19,5	21,6	16,9	58,0
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅ + 1,0 Нг CaCO ₃	19,6	21,7	17,0	58,3
Сидерати + 1,0 Нг CaCO ₃	14,6	16,7	14,6	45,9
Побічна продукція + сидерати	14,5	16,6	14,5	45,6
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₉₀ + 1,0 Нг CaCO ₃	25,6	27,7	20,4	73,7
НІР	1,8	2,3	1,9	6,5

характерні для варіантів без добрив та із внесенням вапна — 42,6–42,9 ГДж/га. Після зароблення сидератів і побічної продукції затрати антропогенної енергії зростали до 45,6–45,9 ГДж/га, після внесення одинарної норми мінерального добрива — до 58,0–58,3,9 ГДж/га, а максимальними вони, звісно, були за внесення подвійної норми мінеральних добрив — 73,7 ГДж/га.

Описаний вище вплив систем удобрення і меліорації ґрунту та агрофону ланки сівозміни на вихід енергії з урожаєм і затрати антропогенної енергії під час вирощування сільськогосподарських культур безпосередньо пов'язані з коефіцієнтом енергетичної ефективності (табл. 6). Його величина була мінімальною у варіанті з внесенням одинарної норми мінерального добрива — 7,5, у контрольному варіанті з унесенням побічної продукції та сидератів вона становила 8,5 та 8,2 відповідно, на фоні вапнування у разі внесення одинарної та подвійної норм

мінерального добрива досягала 8,8, а максимальне значення мала у варіанті «сидерати + 1,0 Нг CaCO₃» — 9,4.

Величина коефіцієнта енергетичної ефективності значною мірою залежала від культури сівозміни. Найменші значення цього коефіцієнта спостерігалися під час вирощування сої — 6,6–7,8, під час вирощування ячменю ярого вони зростали до 9,4–10,0, а під час вирощування гречки досягали максимальних значень — 9,0–11,2.

Згідно з результатами довгострокових стаціонарних досліджень, фактори, які сприяють підвищенню енергоємності ґрунтів, також забезпечують зростання продуктивності й виходу енергії з урожаєм польових культур ($r = 0,72-0,88$). Отже, вміст гумусу та продуктивність культур — це основні показники, що характеризують рівень актуальної і потенційної родючості ґрунтів.

Для оцінювання енергетичної ефективності агроecosистем Ю.О. Тараріко

6. Коефіцієнт енергетичної ефективності вирощування культур залежно від удобрення сірого лісового ґрунту

Варіант	Гречка	Ячмінь ярий	Соя	Усього по ланці сівозміни	Біологічна акумуляція енергії
Без добрив (контроль)	9,5	9,4	6,7	8,5	—
1,0 Нг CaCO ₃	9,8	10,0	7,8	9,2	119
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅	7,2	8,6	6,7	7,5	71
N ₆₀ P ₃₀ K ₄₅ + 1,0 Нг CaCO ₃	9,9	9,5	6,9	8,8	104
Сидерати + 1,0 Нг CaCO ₃	11,2	10,0	7,1	9,4	76
Побічна продукція + сидерати	9,0	9,1	6,6	8,2	119
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₉₀ + 1,0 Нг CaCO ₃	9,7	9,3	7,4	8,8	170

запропонував використовувати показник біологічної акумуляції енергії (БАЕ), який є сумою додатково накопиченої до контрольного значення (без добрив) енергії органічної речовини ґрунту та енергії врожаю [3]. Розрахунки свідчать, що найменші значення БАЕ характерні для варіантів дослідів із внесенням одинарної

норми мінерального добрива та сидератів на фоні вапнування — 71–76 ГДж/га; у разі чистого вапнування або внесення побічної продукції та зеленого добрива вони зростають до 119 ГДж/га, а у варіанті з внесенням вапна та подвійної норми мінерального добрива сягають максимуму — 170 ГДж/га (табл. 6).

Висновки

Тривале (впродовж 45 років) сільськогосподарське використання сірого лісового ґрунту на фоні полицевої оранки у 2,5 рази зменшувало вміст гумусу порівняно з перелогом. Серед варіантів удобрення і меліорації найвищий його вміст в орному шарі — 1,21% — спостерігали за внесенням подвійної норми мінерального добрива та нейтралізації надмірної кислотності.

Розрахунки енергопотенціалу органічної речовини орного шару сірого лісового ґрунту показали, що найменшим він був у варіанті з внесенням одинарної норми мінеральних добрив — 627 ГДж/га. Вапнування дослідного ґрунту з внесенням мінеральних добрив та сидератів збільшувало енергопотенціал до 634 ГДж/га, а внесення меліоранту, як і зеленого добрива сукупно з побічною продукцією, сприяло ще більшому зростанню енергопотенціалу — до 690–696 ГДж/га. З усіх варіантів удобрення найвище значення енергопотенціалу забезпечувало внесення подвійної норми мінерального добрива на фоні вапнування — 752 ГДж/га. Максимальний енергопотенціал органічної речовини сірого лісового ґрунту мав переліг — 1739 ГДж/га, і це приблизно у 2,5 рази більше, ніж у варіантах стаціонарного дослідів.

Коефіцієнт енергетичної ефективності за ланку сівозміни був мінімальний у варіанті з внесенням одинарної норми мінерального добрива — 7,5; у контрольному варіанті і варіанті з внесенням побічної продукції та сидератів він становив 8,5 та 8,2 відповідно, на фоні вапнування за внесення одинарної та подвійної норм мінерального добрива досягав 8,8, а максимального значення набував у варіанті «сидерати + 1,0 Нз СаСО₃» — 9,4. Величина коефіцієнта енергетичної ефективності значно залежала від культури сівозміни. Його найменші значення спостерігали за вирощування сої — 6,6–7,8, за вирощування ячменю ярого вони зростали до 9,4–10,0 і досягали максимальних значень 9,0–11,2 за вирощування гречки.

Розрахунки біологічної акумуляції енергії показали, що найменші її значення характерні для варіантів із внесенням одинарної норми мінерального добрива та сидератів на фоні вапнування — 71–76 ГДж/га; у разі чистого вапнування або внесення побічної продукції та зеленого добрива вони зростають до 119 ГДж/га, а у варіанті з внесенням подвійної норми мінерального добрива та внесенням вапна сягають максимуму — 170 ГДж/га.

Bulyhin S.¹, Vitvitskyi S.², Tonkha O.³, Tkachenko M.⁴

^{1–3}National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine; ⁴NSC «Institute of Agriculture of NAAS», 26 Mashynobudivnykiv Str., vil. Chabany, Fastiv district, Kyiv oblast, 08162, Ukraine; e-mail: ¹s.bulygin@ukr.net, ²slavavit@ukr.net, ³oksana16095@gmail.com, ⁴tkachenko@gmail.com; ORCID: ¹0000-0002-1525-595X, ²0000-0002-6856-3817,

³0000-0003-4175-9622, ⁴0000-0001-6128-4703

Energy efficiency of growing crops under different fertilizer systems on gray forest soil

Goal. To conduct a bioenergetic assessment of crop fertilizer systems on gray forest soil under the conditions of a stationary experiment.

Methods. General scientific (field, morphogenetic, comparative analytical, agro-analytical, laboratory) and special methods (methodology of bioenergetic assessment of farming systems

according to Yu.O. Tarariko) were used. **Results.** It was established that the long-term use of mineral fertilizers with limestone ameliorants as a background on the gray forest soil contributed to a significant increase in the content of humus in the arable layer. The agronomic and energy efficiency of growing crops in the chain of crop rotation was determined, and the energy content of the main and secondary products, anthropogenic energy costs, the energy potential of organic matter of the arable layer as well as the indicator of biological energy accumulation were calculated. **Conclusions.** Among the fertilizer options, the highest content of humus in the arable layer — 1.21% — ensured the application of a double dose of mineral fertilizer while neutralizing excessive acidity. Calculations of the energy potential of the organic matter of the arable layer of the gray forest soil showed that it was the lowest with the application of a double dose of mineral fertilizer on the background of liming — 752 GJ/ha, and the maximum on the fallow — 1739 GJ/ha, which was approximately 2.5 times more than in the variant of the stationary experiment. The

coefficient of energy efficiency in the chain of crop rotation was minimal in the case of application of a single dose of mineral fertilizer — 7.5, on the background of liming with the application of a single or double dose of mineral fertilizer, it reached 8.8, and the maximum value was in the option “siderates + 1.0 Ng of CaCO₃” — 9.4. In general, the value of this coefficient significantly depended on the culture of the crop rotation. Its lowest values were observed in the case of growing soybeans — 6.6–7.8; for the cultivation of spring barley, they increased to 9.4–10.0 and reached the maximum values for the cultivation of buckwheat — 9.0–11.2. The lowest values of biological energy accumulation (BEA) were characteristic of options with the introduction of a single dose of mineral fertilizer and siderates on the background of liming — 71–76 GJ/ha, in the case of applying lime and a double dose of mineral fertilizer, they reached a maximum — 170 GJ/ha.

Key words: gray forest soil, energy potential of organic matter, energy efficiency.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202405-01>

Бібліографія

1. *Медведовський О.К., Іваненко П.І.* Енергетичний аналіз інтенсивних технологій в сільськогосподарському виробництві. Київ: Урожай, 1988. 208 с.
2. *Тараріко Ю.О.* Енергозберігаючі агроєкосистеми. Київ: ДІА, 2011. 575 с.
3. *Методика* біоенергетичного оцінювання систем землеробства; за ред. Ю.О. Тараріка. Київ: Аграрна наука, 2013. 39 с.
4. *Масютенко Н.П.* Научные основы и методы оценки энергетического состояния почв в агроландшафтах. Киев, 2004. 60 с.
5. *Жолудєва І.Д., Трунов О.П.* Вплив різних систем удобрення на гумусовий стан і енергетичні характеристики чорнозему звичайного. *Вісник ХНАУ*. 2013. № 1. С. 233–240.
6. *Ландін В.П., Тараріко М.Ю.* Традиційна і альтернативна технології відтворення енергопотенціалу радіоактивно забруднених ґрунтів. *Збалансоване природокористування*. 2015. № 3. С. 42–46.
7. *Pimentel D., Hepperly P., Hanson J. et al.* Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *BioScience*. 2005. V. 55. N 7. P. 573–582. doi: 10.1641/0006-3568(2005)055[0573:EEAECO] 2.0.CO;2
8. *Калінченко О.В.* Енергетична оцінка виробництва сільськогосподарських культур. *Наук. праці Полтавської держ. аграр. акад.* 2012. Вип. 2. С. 134–139.
9. *Медведєв В.В., Булигін С.Ю., Булигіна М.Є.* Сучасні системи землеробства і проблема обробітку ґрунту. *Агроєкологічний журнал*. 2017. № 55. С. 127–134.
10. *Медведєв В.В., Пліско І.В.* Прогнозування у ґрунтознавстві. Харків: Стильна типографія, 2018. 169 с.
11. *Ткаченко М.А., Кондратюк І.М., Борис Н.Є.* Хімічна меліорація кислих ґрунтів: монографія. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2019. 318 с.
12. *Булигін С.Ю.* Нормування технологічного навантаження на ґрунти. Спеціальний випуск до XI з'їзду ґрунтознавців та агрохіміків України. Кн. 1. Харків, 2018. С. 131–133.
13. *Стационарні польові дослідження України.* Реєстр атестатів. Київ: Аграрна наука, 2014. — 146 с.
14. *ДСТУ 4287: 2004.* Якість ґрунту. Відбирання проб. [Чинний від 2005–07–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 10 с.
15. *ДСТУ 4289:2004.* Якість ґрунту. Методи визначення органічної речовини. [Чинний від 2004–04–30]. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 9 с.