

УДК 631.416.1:
631.582-026.29(477.5)
© 2018

ВУГЛЕЦЕВО-АЗОТНИЙ ОБІГ В АГРОЦЕНОЗАХ СІВОЗМІН

О.В. Демиденко¹, І.С. Шаповал², П.І. Бойко³, В.А. Величко⁴

^{1,3}доктори сільськогосподарських наук, ²кандидат сільськогосподарських наук

⁴доктор сільськогосподарських наук, професор, член-кореспондент НААН

^{1,2}Черкаська державна сільськогосподарська дослідна станція

ННЦ «Інститут землеробства НААН»,

вул. Докучаєва, 13, с. Холоднянське Смілянського р-ну Черкаської обл., 20731, Україна

³ННЦ «Інститут землеробства НААН», вул. Машинобудівників, 2б, смт Чабани

Києво-Святошинського р-ну Київської обл., 08162, Україна

⁴ННЦ «Інститут ґрунтознавства і агрохімії імені О.Н. Соколовського НААН»,

вул. Чайковська, 4, м. Харків, 61024, Україна

e-mail: ^{1,2}smilachipv@ukr.net, ³izaan@ukr.net, ⁴agrovisnyk@ukr.net

Надійшла 26.03.2018

Мета. Встановити нормативні параметри типізації балансу та вмісту органічного вуглецю (C_{org}) в агроценозах різноротаційних сівозмін, як складових методології агроекологічної оцінки їхньої продуктивності при використанні побічної продукції у якості органічних добрив в умовах сучасного клімату Лісостепу України. **Методи.** Узагальнення результатів багаторічних досліджень у польовому стаціонарному досліді, статистичний: дисперсійний, кореляційний, факторний, кластерний аналіз параметрів продуктивності, структури фітомаси та якісних і кількісних статей балансу азоту, вуглецю. **Результати.** За умови повного залишення побічної продукції у 7–10-пільних сівозмінах баланс C_{org} був додатним, а максимальна продуктивність збігалася з найвищими значеннями балансу (1,32–2,54 т/га) та ємності балансу (3,17–3,72 т/га). У 3–5-пільних сівозмінах баланс C_{org} був менш профіцитним (+0,56–+0,87 т/га), але і ємність балансу C_{org} зростала за прояву максимальної продуктивності до 4,01–4,12 т/га. Виявлено кореляційний зв'язок між ємністю балансу C_{org} і продуктивністю сівозмін, а зі зростанням продуктивності сівозмін пропорційно зростає як мінералізація, так і гуміфікація C_{org} . Ємність балансу в короткоротаційних сівозмінах за максимальними показниками перевищує 4 т/га, тоді як в умовах 7–10-пільних сівозмін максимальне значення ємності балансу не досягає 4 т/га. **Висновки.** Співвідношення C_{org} до азоту, незалежно від типу сівозмін, знаходиться в оптимальних межах (20–30:1), що створює оптимальні умови для гуміфікації побічної продукції й утворення гумусу, цей факт підтверджують балансові розрахунки азоту і органічного вуглецю.

Ключові слова: баланс органічного вуглецю, ємність балансу, продуктивність, різноротаційні сівозміни, кореляція, факторний аналіз.

<https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201809-10>

Колообіг азоту та вуглецю є основними біогеохімічними циклами, що відбуваються в агроєкосистемах [1, 2]. Дефіцитність азоту в агроценозах сівозмін негативно впливає на їхню продуктивність, послаблюючи депонування вуглецю атмосфери, а це

посилює наслідки глобальних змін клімату [3–5]. Загальноприйнятим є включення вуглецевого циклу агроєкосистеми до кліматичних моделей, як інтегральної характеристики вуглецевого циклу в атмосфері [6]. Виключення азотного циклу з азотно-вуглецевого обігу та

з розгляду наслідків змін клімату призводить до недостатньої оцінки відгуку агроекосистем, де мінеральні форми ґрунтового азоту є лімітуючим фактором для розвитку рослин як у природних ценозах [7–9], так і в агроценозах [10].

Чим сильніший зв'язок продуктивності природних ценозів і агроценозів з кількістю засвоєного азоту з ґрунту, тим швидше поглинаються викиди CO_2 агрофітоценозами [11], а тому кількісна оцінка взаємозв'язку вуглецевого і азотного циклів істотно впливає на оцінку збільшення або зменшення вуглецевого бюджету наземних агроекосистем [12, 13] і виявляє істотний вплив на зміну вмісту азоту і вуглецю у рослинності, шарі детриту та органічній речовині ґрунту [10, 14, 15]. Таким чином, розробка комплексної моделі обігу азоту при використанні типів сівозмін з обігом вуглецю є актуальною і дає можливість отримати достовірну оцінку вуглецевого обігу при очікуваних кліматичних змінах та виявити основні закономірності відновлення природного ґрунтоутворення в агроценозах Лісостепу України.

Мета досліджень. Встановити нормативні параметри типізації балансу та умісту органічного вуглецю в агроценозах та встановити основні закономірності вуглецево-азотного обігу в різноротаційних сівозмінах, як складових методології агроекологічної оцінки їхньої продуктивності в умовах Лісостепу України.

Методи досліджень. Узагальнення результатів багаторічних досліджень у польовому стаціонарному досліді, статистичний: дисперсійний, кореляційний, факторний, кластерний аналіз параметрів продуктивності, структури фітомаси та якісних і кількісних статей балансу азоту, вуглецю.

Методика досліджень. Дослідження проводили в умовах центральної частини Лівобережного Лісостепу України в довгостроковому (понад 50 років) стаціонарному досліді Драбівського дослідного поля Черкаської державної сільськогосподарської дослідної станції «ННЦ «Інститут землеробства НААН». Дослід розміщено на чорноземі типовому малогумусному крупно-пилуватому легкосуглинковому з вмістом гумусу — 3,8–4,2%, вміст рухомого фосфору — 120–140 мг/1000 г ґрунту, рухомого калію — 80–100 мг/1000 г ґрунту, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ = 6,8–7,0. Системи удобрення культур передбачають такі дози добрив: пшениця озима, кукурудза, ячмінь ярий, пшениця яра,

сося — $\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$, горох — $\text{N}_{20}\text{P}_{40}\text{K}_{40}$, соняшник — $\text{N}_{40}\text{P}_{40}\text{K}_{40}$, буряки цукрові — $\text{N}_{100}\text{P}_{100}\text{K}_{100}$. З 2000 р. по 2016 р. у якості органічного добрива використовується вся побічна продукція. Структуру сівозмін дослідів наведено в табл. 1. Спосіб обробітку у сівозмінах — диференційований.

Обчислення балансу вуглецю в агроценозах різного типу і прогнозування гумусного стану чорноземів по масі $\text{C}-\text{CO}_2$, що виділяється, здійснено за такими потоками: C_γ — маса $\text{C}_{\text{орг}}$ унаслідок мінералізації гумусу, т/га; C_ρ — маса $\text{C}_{\text{орг}}$ унаслідок мінералізації побічної продукції, поукісних і кореневих решток, т/га; $\text{C}_{(\gamma+\rho)}$ — загальна маса $\text{C}_{\text{орг}}$ унаслідок мінералізації, т/га; C_j — маса $\text{C}_{\text{орг}}$ унаслідок дихання ґрунтових мікроорганізмів, т/га.

Визначення рівня забезпечення потенційної біопродуктивності культур за $\text{C}_{\text{орг}}$ проведено балансом цього ресурсу, а сам баланс $\text{C}_{\text{орг}}$ визначено як різницю між надходженням $\text{C}_{\text{орг}}$ до агроценозу та його залученням з побічної продукції у гумус. Витратна стаття включає винесення $\text{C}_{\text{орг}}$ урожаєм, масою $\text{C}_{\text{орг}}$ побічної продукції внаслідок мінералізації. Для простоти розрахунку C_j прийняли як константу для всіх варіантів. Баланс вуглецю розраховано за загальноприйнятою методикою з урахуванням винесення азоту (N) за рівнем урожайності культур, а на основі цих розрахунків розраховано баланс N в агроценозах сівозмін за рекомендаціями офіційного видання «Шосте національне повідомлення України з питань зміни клімату, 2012 р.». Баланс азоту розраховано за загальноприйнятою методикою [9].

Результати досліджень. Уміст $\text{C}_{\text{орг}}$ в основній продукції змінювався в інтервалі 4,04–8,48 т/га за коефіцієнта варіації (Coef.v) Coef.v=53,6%. У сівозмінах № 5 і № 16 уміст $\text{C}_{\text{орг}}$ перевищував максимальні типові значення ($\text{C}_{\text{орг}}=11,8-13,3$ т/га), в сівозмінах 18, 14, 17, 13 уміст $\text{C}_{\text{орг}}$ був меншим за значення нижньої межі типового вмісту ($\text{C}_{\text{орг}}<4,04$ т/га). У решті сівозмін уміст $\text{C}_{\text{орг}}$ був у типовому інтервалі значень.

Уміст $\text{C}_{\text{орг}}$ у побічній продукції та коренях змінювався в інтервалі типових значень 5,60–7,01 т/га за співвідношення побічної продукції до маси коріння 2,21–2,26 до 1. Коефіцієнт варіації маси побічної продукції разом із коренями становив 16,9%, а по-статейно — Coef.v=30,6% і Coef.v=28,1%

1. Структура сівозмін у досліді

| № | Структура сівозмін у досліді |
|--------|--|
| 18* | 50% зернові, 10% бобові, 20% просапні, 20% кормові. Без добрив |
| 5* | 50% зернові, 20% просапні, 30% кормові |
| 17* | 40% зернові, 20% бобові, 30% технічні, 10% кормові |
| 12* | 50% зернові, 10% буряки цукрові, 30% кормові, 10% горох |
| 7* | 50% зернові, 10% бобові, 30% просапні, 10% кормові |
| 14* | 70% зернові, 10% бобові, 20% технічні |
| 9* | 50% зернові, 10% бобові, 20% просапні, 20%кормові. 3 добривами |
| 8* | 50% зернові, 30% технічні, 20% кормові |
| 2* | 50% зернові, 20% буряки цукрові, 20% горох, 10% кормові |
| 16** | 56% зернові (28% пшениця озима), 30% технічні, 14% однорічні трави |
| 13** | 72% зернові, 14% буряки цукрові, 14% багаторічні трави |
| 4*** | 60% зернові (40% колосові ярі), 20% ріпак, 20% горох |
| 1*** | 60% зернові, 20% буряки цукрові, 20% однорічні трави |
| 11*** | 60% зернові (40% пшениця озима), 20% ріпак, 20% однорічні трави |
| 11a*** | 40% зернові, 40% буряки цукрові та соя, 20% горох |
| 4a*** | 60% зернові (40% колосові ярі), 20% буряки цукрові, 20% горох |
| 6*** | 40% зернові, 40% технічні (20% соя, 20% ріпак), 20% горох |
| 6a*** | 40% зернові, 20% горох, 20% буряки цукрові, 20% кукурудза на силос |
| 15*** | 60% зернові, 20% буряки цукрові, 20% однорічні трави |
| 1a*** | 60% зернові, 20% горох, 20% буряки цукрові |
| 10a*** | 60% зернові, 20% буряки цукрові, 20% однорічні трави |
| 15a*** | 60% зернові, 20% буряки цукрові, 20% однорічні трави |
| 10*** | 60% зернові (40% кукурудза), 20% горох, 20% кормові |
| 3 | 50% зернові (25% кукурудза), 25% буряки цукрові, 25% кормові |
| 13a# | 66% зернові (33% ячмінь), 34% соя |
| 3a# | 66% зернові (33% ячмінь), 34% горох |
| 3б# | 66% зернові (33% пшениця яра), 34% соя |
| 16в# | 66% кукурудза, 34% соя |

Примітка: * — 10-пільні сівозміни; ** — 7-пільні; *** — 5-пільні; 3 — 4-пільна сівозміна; # — 3-пільні сівозміни.

відповідно. За виходом побічної продукції найбільш продуктивними були сівозміни 9, 2, 13, а за наростанням кореневої маси — сівозміни 8, 12. У сівозмінах 9, 8, 12 загальний уміст $C_{орг}$ перевищував верхню типову межу (7,1 т/га), а у сівозмінах 18, 7, 17, 13 уміст $C_{орг}$ був меншим за 5,6 т/га. Уміст $C_{орг}$ у загальній фітомасі змінювався у типовому інтервалі значень 10–15 т/га за коефіцієнта варіації 29,5%. Найвищим уміст $C_{орг}$ у загальній фітомасі мали сівозміни 5 і 16 (>15 т/га), у сівозмінах 18, 14, 17, 13 накопичення $C_{орг}$ було найменш ефективним (<10 т/га).

Типовий інтервал $C_{орг}$ від мінералізації гумусу становив 1,13–1,43 т/га за несуттєвого відхилення від середнього значення: $Coef.v=19,1\%$. Найвищий рівень мінералізації гумусу виявлено у сівозмінах 9, 8, 12, 16 ($C_{орг}>1,43$ т/га), а в п'яти сівозмінах 18, 7, 17, 2, 13 мінералізація гумусу була меншою за

нижню межу типових значень ($C_{орг}<1,13$ т/га). Інтервал зміни $C_{орг}$ від мінералізації достовірно був вищим в 1,14–1,15 раза за абсолютним значенням, ніж інтервал зміни $C_{орг}$ мінералізації гумусу. Найефективнішою гуміфікація побічної продукції була у сівозмінах з насиченням багаторічними травами і зерно-бобовими культурами (9, 8, 12, 2, 16), а у сівозмінах 18 і 7 рівень накопичення $C_{орг}$ за рахунок гуміфікації знижується за межу мінімального типового значення (<1,29 т/га).

Баланс $C_{орг}$ у 7–10-пільних сівозмінах змінювався у додатному інтервалі значень, лише у сівозміні 18 (контроль без добрив) баланс $C_{орг}$ мав від'ємне значення.

У сівозмінах з високим насиченням багаторічними травами і бобовими (9, 8, 12) баланс $C_{орг}$ перевищував максимальне типове значення ($B_{C_{орг}}>1,23$ т/га), а у решти сівозмін, окрім 18 і 16, $B_{C_{орг}}$ був більшим за мінімальне

2. Уміст органічного вуглецю в складових загальній фітомасі та баланс вуглецю в 7–10-пільних сівозмінах за 2005–2015 рр.

| № сівозміни | Уміст органічного вуглецю, C _{орг} , т/га | | | | C _{орг} мінералізації, т/га | C _{орг} гуміфікації побічної продукції, т/га | Баланс: C _{орг} , т/га | Ємність балансу, т/га | Інтенсивність балансу, % | C _{орг} до N |
|--------------------------------------|--|---------|--------|-----------|--------------------------------------|---|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| | основна продукція | побічна | корені | *разом | | | | | | |
| <i>10-пільні сівозміни</i> | | | | | | | | | | |
| 18 | 3,7 | 3,1 | 1,8 | 8,6/4,9 | 1,07 | 1,06 | -0,06 | 2,13 | 99 | 31:1 |
| 5 | 11,8 | 3,5 | 2,1 | 17,6/5,8 | 1,17 | 1,44 | +0,27 | 2,61 | 123 | 23:1 |
| 17 | 3,8 | 3,4 | 1,6 | 8,8/5,0 | 1,10 | 1,30 | +0,20 | 2,41 | 115 | 22:1 |
| 12 | 5,8 | 5,0 | 1,9 | 12,7/6,9 | 1,12 | 1,61 | +0,49 | 2,79 | 113 | 21:1 |
| 7 | 6,7 | 3,9 | 1,6 | 12,2/5,5 | 1,05 | 1,17 | +0,12 | 2,21 | 111 | 19:1 |
| 14 | 2,9 | 4,6 | 1,8 | 9,3/6,4 | 1,20 | 1,40 | +0,20 | 2,60 | 118 | 18:1 |
| 9 | 6,4 | 5,9 | 2,0 | 14,4/8,0 | 1,52 | 1,65 | +1,32 | 3,17 | 108 | 20:1 |
| 8 | 4,5 | 4,8 | 2,7 | 12,0/7,5 | 1,48 | 1,73 | +2,54 | 3,21 | 117 | 22:1 |
| 2 | 6,0 | 3,6 | 3,6 | 13,2/7,2 | 1,76 | 1,96 | +1,98 | 3,72 | 111 | 22:1 |
| <i>7-пільні сівозміни</i> | | | | | | | | | | |
| 16 | 13,3 | 5,1 | 1,86 | 20,1/6,9 | 1,52 | 1,60 | +0,08 | 3,12 | 105 | 21:1 |
| 13 | 4,0 | 8,0 | 1,86 | 9,3/5,3 | 1,11 | 1,27 | +0,16 | 2,38 | 114 | 25:1 |
| <i>Статистична оцінка параметрів</i> | | | | | | | | | | |
| Mean | 6,26 | 4,63 | 2,07 | 6,31/12,5 | 1,28 | 1,47 | 0,66 | | 112 | 22:1 |
| Coef.v, % | 53,6 | 30,6 | 28,1 | 16,9/29,5 | 19,1 | 18,1 | 132 | | 5,86 | 15,7 |
| HIP _{0,05} | 2,22 | 0,95 | 0,41 | 0,71/2,46 | 0,15 | 0,18 | 0,57 | | 4,36 | 2,31 |

*Чисельник — в усій фітомасі, знаменник — побічна продукція+корені.

типове значення. Інтенсивність балансу C_{орг} по групі 7–10-пільних сівозмін знаходилась у межах типового інтервалу (I₆=108–116%), лише на контролі без добрив (№ 18) та у сівозміні № 16 інтенсивність балансу виходила за межі нижнього типового значення (I₆<108%).

Співвідношення C_{орг} до N змінювалося в інтервалі від 20:1 до 24:1 за незначної варіації параметра Coef.v=15,7%. Співвідношення C_{орг} до N, яке перевищувало верхню типову межу, виявлено у сівозмінах 18 і 13, а за межею мінімального типового значення співвідношення C_{орг} до N мали сівозміни 7 і 14. У табл. 2 наведено вміст C_{орг} в складових загальній фітомасі та баланс C_{орг} у 7–10-пільних сівозмінах за значенням по медіані. У табл. 3 наведено вміст C_{орг} у складових загальній фітомасі та баланс C_{орг} у 3–5-пільних сівозмінах за значенням по медіані за 2005–2015 рр.

У короткоротаційних сівозмінах типізований запас C_{орг} в основній продукції становив 2,20–4,18 т/га, що в 1,8–2,03 раза менше порівняно зі співвідношенням за 7–10-пільних сівозмін. Коефіцієнт варіації зріс

до 58,6%. У п'яти сівозмінах (1а, 6а, 10а, 15а, 3) запас C_{орг} в основній продукції виходив за межу максимального типового значення (>4,18 т/га), а у семи сівозмінах (4, 6, 10, 11, 3а, 3б, 13а) запас C_{орг} був за межею нижнього типового значення (<2,20 т/га). За вмістом C_{орг} у побічній продукції сформовано типізований інтервал 3,39–4,65 т/га, що більш звужений порівняно із 7–10-пільними сівозмінами. Коефіцієнт варіації становив 30,6%. Запас C_{орг} у корінні в типізованому інтервалі значень становив 1,88–2,68 т/га, що більш звужений відносно групи сівозмін з тривалою ротацією.

Співвідношення запасу C_{орг} побічної продукції і коріння становило 1,75–1,80:1, що більш звужено (2,21–2,25:1) відносно сівозмін з тривалою ротацією.

Типізований інтервал запасу C_{орг} побічної продукції та коренів загалом становив 5,37–6,99 т/га за більш високого коефіцієнта варіації — 35%. Запас C_{орг} у загальній фітомасі становив 7,67–11,0 т/га проти 10,0–15,0 т/га у 7–10-пільних сівозмінах, а запас C_{орг} у загальній фітомасі перевищував верхню типову

3. Уміст органічного вуглецю в складових загальної фітомаси та баланс вуглецю в 3–5-пільних сівозмінах за 2005–2015 рр.

| № сівозміни | Уміст органічного вуглецю, С _{орг} , т/га | | | | С _{орг} Мінералізація побічної продукції, т/га | С _{орг} Гуміфікація побічної продукції, т/га | Баланс С _{орг} , т/га | Ємність балансу, т/га | Інтенсивність балансу, % | С _{орг} до N |
|--------------------------------------|--|---------|--------|-----------|---|---|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| | основна продукція | побічна | корені | *разом | | | | | | |
| <i>5-пільні сівозміни</i> | | | | | | | | | | |
| 4 | 1,2 | 3,2 | 2,2 | 6,6/5,4 | 1,08 | 1,48 | +0,40 | 2,56 | 138 | 22:1 |
| 1 | 3,2 | 5,0 | 2,2 | 14,0/7,0 | 1,24 | 1,61 | +0,36 | 2,85 | 130 | 30:1 |
| 11 | 2,2 | 3,0 | 3,0 | 8,0/5,8 | 1,07 | 1,15 | +0,08 | 2,21 | 108 | 22:1 |
| 11a | 4,0 | 4,2 | 1,8 | 9,8/5,8 | 1,21 | 1,46 | +0,26 | 2,67 | 122 | 19:1 |
| 4a | 4,0 | 4,2 | 1,2 | 9,4/5,4 | 0,98 | 1,16 | +0,18 | 2,46 | 114 | 25:1 |
| 6 | 1,4 | 4,2 | 3,6 | 8,0/6,6 | 1,14 | 1,84 | +0,70 | 2,98 | 161 | 24:1 |
| 6a | 6,4 | 3,6 | 1,6 | 11,0/5,0 | 1,06 | 1,15 | +0,09 | 2,21 | 108 | 20:1 |
| 15 | 2,8 | 5,0 | 3,0 | 11,0/8,4 | 1,81 | 1,95 | +0,14 | 3,76 | 106 | 24:1 |
| 1a | 4,4 | 5,2 | 1,2 | 11,0/6,4 | 1,26 | 1,50 | +0,24 | 2,76 | 118 | 58:1 |
| 10a | 4,6 | 4,6 | 1,8 | 11,0/6,4 | 1,52 | 1,58 | +0,07 | 3,10 | 104 | 27:1 |
| 15a | 5,4 | 3,0 | 4,0 | 12,0/7,0 | 1,44 | 2,00 | +0,56 | 3,44 | 139 | 22:1 |
| 10 | 1,8 | 5,0 | 2,2 | 8,0/7,2 | 1,57 | 2,44 | +0,87 | 4,01 | 156 | 22:1 |
| <i>4-пільна сівозміна</i> | | | | | | | | | | |
| 3 | 6,5 | 6,25 | 2,75 | 15,3/8,8 | 1,54 | 2,00 | +0,46 | 3,54 | 130 | 30:1 |
| <i>3-пільні сівозміни</i> | | | | | | | | | | |
| 13a | 1,1 | 2,3 | 2,0 | 5,3/4,3 | 0,83 | 1,13 | +0,30 | 1,96 | 136 | 17:1 |
| 3a | 1,3 | 2,3 | 1,3 | 5,0/3,7 | 0,82 | 1,07 | +0,26 | 1,89 | 132 | 20:1 |
| 3б | 1,0 | 2,0 | 1,3 | 2,6/3,3 | 0,72 | 1,03 | +0,33 | 1,75 | 143 | 20:1 |
| 16б | 2,3 | 5,3 | 3,0 | 10,7/8,3 | 1,73 | 2,37 | +0,63 | 4,12 | 157 | 20:1 |
| <i>Статистична оцінка параметрів</i> | | | | | | | | | | |
| Coef.v, % | 58,6 | 30,6 | 38,2 | 27,5/35,0 | 26,1 | 28,5 | 66,2 | | 14,2 | 37,4 |
| НІР _{0,05} | 0,95 | 0,63 | 0,44 | 0,81/1,67 | 0,17 | 0,23 | 0,13 | | 9,41 | 4,75 |

*Чисельник — в усій фітомасі, знаменник — побічна продукція+корені.

межу у сівозмінах 1, 15а, 3, 16б, а у сівозмінах 4, 3а, 3б, 13а знижувався за межу мінімальних типових значень.

Типовий інтервал зміни С_{орг} від мінералізації гумусу в 3–5-пільних сівозмінах становив 1,07–1,41 т/га за середнього значення 1,24 т/га та коефіцієнта варіації 26,1%, що дещо гірше порівняно із сівозмінами з тривалою ротацією. Коефіцієнт варіації зріс у 1,36 раза, а за нижнім типовим значенням мінералізації відхилення зросло на 5%. Визначено групу сівозмін (1а, 10, 10а, 15, 15а, 3, 16б), де мінералізація гумусу перевищує 1,41 т/га, а у сівозмінах 10, 10а, 15, 16б рівень мінералізації становив 1,52–1,81 т/га, що не спостерігалось у групі сівозмін з тривалою ротацією. Встановлено групу сівозмін із низьким рівнем мінералізації гумусу (4а, 6а, 3а, 3б, 13а) — 0,72–0,98 т/га.

Типізований інтервал С_{орг} гуміфікації побічної продукції становив 1,35–1,82 т/га, що вище в 1,05–1,10 раза порівняно із сівозмінами з тривалою ротацією. Розширення інтервальних значень мінералізації пов'язано зі зростанням коефіцієнта варіації рівня гуміфікації побічної продукції, який зріс в 1,58 раза. Виявлено групу сівозмін (6, 10, 15, 15а, 3, 16б), де рівень гуміфікації досягає 1,84–2,44 т/га, що значно перевищує рівень гуміфікації сівозмін з тривалою ротацією. Між мінералізацією органічної речовини гумусу та гуміфікацією побічної продукції виявлено прямий кореляційний зв'язок: за 7–10-пільних сівозмін — R=0,74±0,03, за короткоротаційних сівозмін — R=0,87±0,03. Також виявлено, що між процесами мінералізації, гуміфікації та продуктивністю існує пряма на рівні середнього рівня кореляційна залежність: за сівозмін

з тривалою ротацією — $R=0,62-0,66\pm 0,02$, а в сівозмiнах із короткою ротацією зв'язок посилюється в 1,18–1,29 рази і досягає значень $R=+0,78-0,80\pm 0,02$.

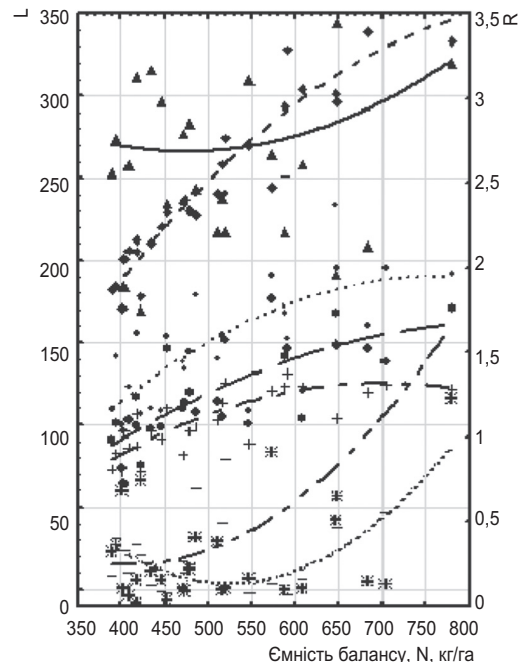
Баланс $C_{\text{орг}}$ у 3–5-пільних сівозмiнах був додатним за типового інтервального значення $\Delta=+048\div +0,22$ т/га при $\text{Coef.v}=66,2\%$. Середнє значення балансу $C_{\text{орг}}$ було меншим в 1,88 рази (+0,35 т/га), а інтенсивність балансу змінювалася у типовому інтервалі 121–139% за невисокого коефіцієнта варіації ($\text{Coef.v}=14,2\%$).

Аналіз співвідношення органічного вуглецю в агроценозах короткоротаційних сівозмiн до азоту показав, що у середньому співвідношення становило 25:1, а інтервал типових значень змінювався від 30:1 до 20:1 при $\text{Coef.v}=37,4\%$. Порівняно із сівозмiнами з тривалою ротацією середнє значення співвідношення $C_{\text{орг}}$ до N зросло на 114%, а діапазон типових інтервальных значень по верхньому значенню зріс на 125%. При цьому коефіцієнт варіації зріс у 2,38 рази. Як у 7–10-, так і в 3–5-пільних сівозмiнах співвідношення $C_{\text{орг}}$ до N знаходилося в оптимальному інтервалі значень (близько 25:1). Розширення співвідношення $C_{\text{орг}}$ до N за сівозмiн з тривалою ротацією пов'язане з насиченням їх багаторічними травами. Існує залежність, згідно з якою коли до ґрунту надходить органічна речовина при співвідношенні $C:N>30-40$ за нестачі азоту, то багато вуглецю втрачається в атмосферу за рахунок дихання, а при співвідношенні $C:N<10-20$ за нестачі $C_{\text{орг}}$ коефіцієнти гуміфікації знижуються. Згідно із залежністю лише у сівозмiнах № 1, 1а, 3 співвідношення вуглецю до азоту становило 27–30:1, що потребує висівання сидератів для доведення співвідношення до 25:1. Виявлено групу сівозмiн (6а, 11а, 13а, 3а, 3б), де співвідношення вуглецю до азоту становить 17–20:1, що потребує додаткового залучення $C_{\text{орг}}$ для посилення гуміфікації побічної продукції.

Оцінка ємності балансу $C_{\text{орг}}$ ($\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$) в агроценозах короткоротаційних сівозмiн показала, що типізований інтервал його зміни становить 2,46–3,22 т/га, що дещо ширше порівняно із сівозмiнами з тривалою ротацією при зростанні коефіцієнта варіації до 25,9%. Кореляційний зв'язок між $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ і продуктивністю 3–5-пільних сівозмiн досягає $R=0,76-0,82\pm 0,02$. Зі зростанням

продуктивності сівозмiн пропорційно зростає як мінералізація, так і гуміфікація $C_{\text{орг}}$. Ємність балансу в короткоротаційних сівозмiнах за максимальними показниками перевищує 4 т/га (10, 16б), тоді як при утриманні 7–10-пільних сівозмiн максимальне значення $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ не досягає 4 т/га.

У загальній моделі зв'язків встановлено, що між $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ та ємністю балансу N ($\text{Ємб.}-N$) встановлено прямий кореляційний зв'язок ($R=0,72\pm 0,003; R^2=0,52$), а на одиницю витрати $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ приходить 120 одиниць $\text{Ємб.}-N$, що свідчить про тісний зв'язок між азотним і вуглецевим обігом в агроценозах різноротаційних сівозмiн (рисунок). У сівозмiнах тривалої та короткої ротації окремо зв'язок між зазначеними показниками також був на рівні прямих сильних кореляційних зв'язків, що свідчить про спряженість азотно-вуглецевого обігу незалежно від ротаційності сівозмiн. Проте, встановлено, що між $\text{Ємб.}-N$ та $C_{\text{орг}}$ від мінералізації гумусу виявлено прямий кореляційний зв'язок ($R=0,74-0,78\pm 0,003$;



Залежність ємності балансу азоту від головних статей азотно-вуглецевого обігу в різноротаційних сівозмiнах (загальна модель): \blacktriangle — N-мінералізація гумусу, кг/га (L); \blacksquare — N-разом, кг/га (L); \times — баланс-N, кг/га (L); \cdot — $C_{\text{орг}}$ мінералізації, т/га (R)

$R^2=0,55-0,61$), а на одиницю витрати $\text{Ємб.}-\text{N}$ приходилося 0,003 одиниці $C_{\text{орг}}$ від мінералізації гумусу в сівозміні з короткою ротацією та 0,002 одиниці $C_{\text{орг}}$ в сівозмінах з тривалою ротацією, що в 1,5 раза менше.

7–10-пільні сівозміни. $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{N}$ -мін. гум., кг/га: $y=60,1+0,09 \cdot x$; $r=0,75$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{N}_2\text{O}$: $y=1,21+0,007 \cdot x$; $r=0,65$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{N}$ -разом, кг/га: $y=49,2+0,39 \cdot x$; $r=0,85$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Баланс-N}$: $y=-100,9+0,21 \cdot x$; $r=0,72$; $\text{Ємб.}-\text{N}:C_{\text{орг}}$ (мінер.): $y=0,49+0,002 \cdot x$; $r=0,74$; $\text{Ємб.}-\text{N}:C_{\text{орг}}$ (гум): $y=0,59+0,002 \cdot x$; $r=0,75$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Баланс } C_{\text{орг}}$: $y=-2,20+0,005 \cdot x$; $r=0,74$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$: $y=1,11+0,003 \cdot x$; $r=0,76$.

3–5-пільні сівозміни. $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{N}$ -мін. гум., кг/га: $y=10,05+0,18 \cdot x$; $r=0,79$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{N}_2\text{O}$: $y=0,58+0,003 \cdot x$; $r=0,62$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{N}$ -разом, кг/га: $y=-18,2+0,51 \cdot x$; $r=0,83$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Баланс-N}$: $y=35,0-0,024 \cdot x$; $r=-0,07$; $\text{Ємб.}-\text{N}:C_{\text{орг}}$ (мінер): $y=-0,03+0,003 \cdot x$; $r=0,78$; $\text{Ємб.}-\text{N}:C_{\text{орг}}$ (гум): $y=0,013+0,003 \cdot x$; $r=0,69$.

Між $\text{Ємб.}-\text{N}$ та $C_{\text{орг}}$ гуміфікації побічної продукції встановлено пряму сильну кореляцію ($R=0,70-0,75 \pm 0,003$; $R^2=0,49-0,66$) незалежно від ротаційності і типу сівозмін. На одиницю $\text{Ємб.}-\text{N}$ приходиться 0,02 одиниці органічного вуглецю гуміфікації побічної продукції в сівозмінах з тривалою ротацією, тоді як в сівозмінах з короткою ротацією 0,003 одиниці $C_{\text{орг}}$ від гуміфікації побічної продукції, що в 1,5 раза ефективніше порівняно із сівозмінами з тривалою ротацією.

Між $\text{Ємб.}-\text{N}$ та $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ виявлено прямий кореляційний зв'язок на рівні прямої сильної кореляції ($R=0,73-0,75 \pm 0,003$; $R^2=0,53-0,56$) для сівозмін з тривалою та короткою ротаціями, а на одиницю витрати $\text{Ємб.}-\text{N}$ приходиться 0,003 одиниці витрати $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ в 10-пільних сівозмінах та 0,005 одиниць $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$, що в 1,78 раза більше.

У загальній моделі залежності зазначених параметрів азотно-вуглецевого обігу зв'язок був на рівні прямої сильної кореляції ($R=0,71 \pm 0,003$; $R^2=0,50$), а на одиницю $\text{Ємб.}-\text{N}$ приходилося 0,004 одиниці $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$.

7–10-пільні сівозміни. $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$: $y=1,09+0,003 \cdot x$; $r=0,77$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{к.о.}$, т/га: $y=4,59+0,003 \cdot x$; $r=0,45$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Пр. прот.}$, т/га: $y=0,40+0,0002 \cdot x$; $r=0,41$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Енер. к.о.}$: $y=28,4+0,011 \cdot x$; $r=0,35$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Маса основ}$. прод., т/га: $y=5,83+0,015 \cdot x$; $r=0,56$.

3–5-пільні сівозміни. $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$: $y=$

$0,112+0,005 \cdot x$; $r=0,73$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{к.о.}$, т/га: $y=-0,021+0,012 \cdot x$; $r=0,79$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Перетр. прот.}$, т/га: $y=0,34+0,0004 \cdot x$; $r=0,65$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Енер. к.о.}$: $y=-1,08+0,065 \cdot x$; $r=0,81$; $\text{Ємб.}-\text{N}:\text{Маса осн. прод.}$, т/га: $y=-2,12+0,03 \cdot x$; $r=0,55$;

У свою чергу, між $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ та параметрами продуктивності сівозмін виявлено пряму сильну кореляцію ($R=0,69-0,71 \pm 0,002$; $R^2=0,48-0,50$), а між $\text{Ємб.}-\text{N}$ і параметрами продуктивності сівозмін зв'язок був прямим на рівні сильної кореляції: $R=0,70-0,74 \pm 0,002$; $R^2=0,49-0,55$. У сівозмінах з тривалою ротацією між $\text{Ємб.}-\text{N}$ та $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ зв'язок був на рівні прямої сильної кореляції ($R=0,75 \pm 0,003$; $R^2=0,56$). Між $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ і параметрами продуктивності зв'язок послабився до прямого середнього рівня ($R=0,56-0,59 \pm 0,003$; $R^2=0,31-0,35$), а на одиницю $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ приходилося 0,35 од. виходу к.од. та 0,07 од. перетравного протеїну (рис. 4). У короткоротаційних сівозмінах зв'язок між $\text{Ємб.}-\text{N}$ та $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ посилювався до прямої сильної кореляції, як у сівозмінах з тривалою ротацією, а між $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ і параметрами продуктивності зв'язок посилювався до рівня прямої сильної кореляції: $R=0,76-0,83 \pm 0,003$; $R^2=0,58-0,69$, на одиницю $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ приходилося 1,65 од. виходу к.од. та 0,62 од. перетравного протеїну, що у 4,7 і 8,9 раза ефективніше відносно формування продуктивності 7–10-пільних сівозмін. За сівозмін з тривалою ротацією на одиницю $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ приходилося 3,42 одиниці енергоємності зерно-протеїнових одиниць, тоді як у 3–5-пільних сівозмінах на одиницю $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ — 8,77 енергетичних одиниць, що в 2,56 раза ефективніше. Між зазначеними показниками у першому випадку кореляційний зв'язок був на рівні прямої середньої кореляції, у другому випадку зв'язок був на рівні прямої сильної кореляції, що свідчить про більш високу продуктивність 3–5-пільних сівозмін. У короткоротаційних сівозмінах водночас посилюється зв'язок між $\text{Ємб.}-\text{N}$ та $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$ та продуктивністю, якістю й енергетичною цінністю основної продукції: $R=0,59-0,79 \pm 0,003$; $R^2=0,31-0,65$ для $\text{Ємб.}-\text{N}$ та $R=0,76-0,82 \pm 0,003$; $R^2=0,58-0,66$ для $\text{Ємб.}-C_{\text{орг}}$, тоді як у сівозмінах з тривалою ротацією синхронізація посилення зв'язків послаблюється до середнього рівня, азотний обіг стає детермінованим у формуванні продуктивності сівозмін.

Висновки

У разі залишення всієї побічної продукції у 7–10-польних сівозмiнах баланс $C_{\text{орг}}$ був додатним, а максимальна продуктивність збігалася з найвищими значеннями балансу (1,32–2,54 т/га) та ємності балансу (3,17–3,72 т/га). У 3–5-польних сівозмiнах баланс $C_{\text{орг}}$ був менш профіцитним (+0,56–+0,87 т/га), але і ємність балансу $C_{\text{орг}}$ зростала за прояву максимальної продуктивності до 4,01–4,12 т/га.

Виявлено кореляційний зв'язок між ємністю балансу $C_{\text{орг}}$ і продуктивністю сівозмiн, а зі зростанням продуктивності сівозмiн пропорційно зростає як мінералізація, так і гуміфікація $C_{\text{орг}}$. Ємність балансу в короткоротаційних сівозмiнах за максимальними показниками перевищує 4 т/га, тоді як за 7–10-польних сівозмiн максимальне значення ємності балансу не досягає 4 т/га.

Співвідношення $C_{\text{орг}}$ до азоту, незалежно від типу сівозмiн, знаходиться в оптимальних межах (20–30:1), що створює оптимальні умови для гуміфікації побічної продукції

і утворення гумусу. Це підтверджують балансові розрахунки азоту і $C_{\text{орг}}$.

У загальній моделі зв'язків встановлено, що між $\text{Ємб.} - C_{\text{орг}}$ та $\text{Ємб.} - N$ існує прямий кореляційний зв'язок, а на одиницю витрати $\text{Ємб.} - C_{\text{орг}}$ приходиться 120 одиниць $\text{Ємб.} - N$, що свідчить про тісний зв'язок між азотним і вуглецевим обігами в агроценозах різноротаційних сівозмiн. У сівозмiнах тривалої та короткої ротації окремо зв'язок між зазначеними показниками також був на рівні прямих сильних кореляційних зв'язків, що свідчить про спряженість азотно-вуглецевого обігу незалежно від ротаційності сівозмiн.

У короткоротаційних сівозмiнах водночас посилюється зв'язок між $\text{Ємб.} - N$ та $\text{Ємб.} - C_{\text{орг}}$ та продуктивністю, якістю й енергетичною цінністю основної продукції, тоді як в сівозмiнах з тривалою ротацією синхронізація посилення зв'язків послаблюється до середнього рівня, а азотний обіг в агроценозах сівозмiн стає детермінувальним у формуванні їхньої продуктивності.

Демиденко А.В.¹, Шаповал І.С.², Бойко П.І.³, Величко В.А.⁴

^{1, 2} Черкасская государственная сельскохозяйственная опытная станция ННЦ «Институт земледелия НААН», ул. Докучаева, 13, с. Холоднянское Смелянского р-на Черкасской обл., 20731, Украина, ³ ННЦ «Институт земледелия НААН», ул. Машиностроителей, 26, пгт Чабаны Киево-Святошинского р-на Киевской обл., 08162, Украина, ⁴ ННЦ «Институт почвоведения и агрохимии имени А.Н. Соколовского НААН», ул. Чайковская, 4, г. Харьков, 61024, Украина; e-mail: ¹⁻²smilachipv@ukr.net, ³izaan@ukr.net, ⁴agrovvisnyk@ukr.net

Углеродно-азотный оборот в агроценозах севооборотов

Цель. Установить нормативные параметры типизации баланса и содержания органического углерода $C_{\text{орг}}$ в агроценозах разноротационных севооборотов, как составляющих методологии агроэкологической оценки их производительности при использовании побочной продукции в качестве органических удобрений в условиях современной климатической системы Лесостепи Украины. **Методы.** Обобщение результатов многолетних исследований в полевом стационарном опыте, статистический: дисперсионный, корреляционный, факторный, кластерный анализ параметров производительности, качественных и количественных статей баланса азота, углерода. **Результаты.** При полном оставлении побочной продукции

в 7–10-польных севооборотах баланс $C_{\text{орг}}$ был положительным, а максимальная производительность совпадала с высокими значениями баланса (+1,32–2,54 т/га) и емкости баланса (3,17–3,72 т/га). В 3–5-польных севооборотах баланс $C_{\text{орг}}$ был менее профицитным (+0,56–+0,87 т/га), но и емкость баланса $C_{\text{орг}}$ возрастала при проявлении максимальной производительности до 4,01–4,12 т / га. Установлена прямая корреляционная связь между емкостью баланса $C_{\text{орг}}$ и производительностью севооборотов, а с ростом производительности севооборотов пропорционально растет как минерализация, так и гумификация $C_{\text{орг}}$. Емкость баланса в короткоротационных севооборотах по максимальным показателям превышает 4 т/га, тогда как при 7–10-польных севооборотах максимальное значение емкости баланса меньше 4 т/га. **Выводы.** Соотношение $C_{\text{орг}}$ к азоту в агроценозе, независимо от типа севооборотов, находится в оптимальных пределах (20–30:1), что создает оптимальные условия для гумификации побочной продукции и образования гумуса. Это подтверждают балансовые расчеты азота и органического углерода.

Ключевые слова: баланс органического углерода, емкость баланса, производительность, разноротационные севообороты, корреляция, факторный анализ.

<https://doi.org/10.31073/agrovvisnyk201809-10>

Demidenko O.¹, Shapoval I.², Boiko P.³, Velychko V.⁴
^{1, 2}Cherkassy state agricultural experimental station of

NSC «Institute of agriculture of NAAS», Dokuchayev Str., 13, Kholodnianske, Smilianskyi region, Cherkassy oblast, 20731, Ukraine, ³NSC «Institute of agriculture of NAAS», Mashynobudivnykiv Str., 2b, Chabany, Kyiv-Svitoshyn region, Kyiv oblast, 08162, Ukraine, ⁴NSC «A.N.Sokolovsky Institute of soil science and agrochemistry of NAAS», Chaikovska Str., 4, Kharkiv, 61024, Ukraine; e-mail: ¹⁻²smilachipv@ukr.net, ³izaan@ukr.net, ⁴agrovivnyk@ukr.net

Carbon-nitric turnover in agrocenoses of crop rotations

The purpose. To determine normative parameters of typification of balance and content of organic carbon C_{org} in agrocenoses of different crop rotations, as components of methodology of agroecological assessment of their productivity at use of collateral production as organic fertilizers in conditions of modern climatic system of Forest-steppe of Ukraine. **Methods.** Generalization of results of long-term researches in field stationary experiment, statistical: dispersive, correlation, factorial, cluster analysis of parameters of productivity, qualitative and quantitative clauses of balance of nitrogen, carbon. **Results.** At full leaving of collateral production

in 7–10-field crop rotations balance of C_{org} was positive, and the maximal productivity coincided with high values of balance (+1,32–2,54 t/hectare) and capacity of balance (3,17–3,72 t/hectare). In 3–5-field crop rotations balance of C_{org} was less profitable (+0,56–+0,87 t/hectare), but also capacity of balance of C_{org} increased at the maximal productivity up to 4,01–4,12 t/hectare. Direct correlation is fixed between capacity of balance of C_{org} and productivity of crop rotations. With growth of productivity of crop rotations proportionally grows both mineralization, and humification of C_{org} . Capacity of balance in short crop rotations on the maximal parameters exceeds 4 t/hectare whereas at 7–10-field crop rotations the maximal value of capacity of balance is less 4 t/hectare. **Conclusions.** Ratio C_{org} to nitrogen in agrocenoses, irrespective of type of crop rotations, is in optimum limits (20–30:1), that creates optimum conditions for humification of collateral production and formation of humus. It is confirmed by balance calculations of nitrogen and organic carbon.

Key words: balance of organic carbon, capacity of balance, productivity, different crop rotations, correlation, factorial analysis.

<https://doi.org/10.31073/agrovivnyk201809-10>

Бібліографія

1. Базилевич Н.И., Тутлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. 381 с.
2. Голубятников Л.Л., Мохов И.И., Елисеєв А.В. Цикл азота в земной климатической системе. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2013. Т. 49. № 3. С. 255–270.
3. Мусеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. Москва: Наука, 1985. 272 с.
4. Thornton P.E., Doney S.C., Lindsay K. et al. Carbon-nitrogen interactions regulate climate-carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere-ocean general circulation model. *Biogeosciences*. 2009. V. 6. P. 2099–2120.
5. Vitousek P.M., Howarth R.W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*. 1991. V. 13. P. 87–115.
6. Крапивин В.Ф., Свиричев Ю.М., Тарко А.М. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. Москва: Наука, 1982. 272 с.
7. Friedlingstein P., Cox P., Betts R.A. et al. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison. *J. Climate*. 2006. V. 19. № 22. P. 3337–3353.
8. Canadell J.G., Pataki D.E., Gifford R. et al. Saturation of the terrestrial carbon sink. Eds: Canadell J.G., Pataki D.E., Pitelka L. Terrestrial ecosystems in a changing world. The IGBP Series. V. XXIV. N.Y.: Springer-Verlag, 2007. P. 59–73.
9. Sabine C.L., Heimann M., Artaxo P. et al.

Current status and past trends of the global carbon cycle. Field C.B., Raupach M.R. (Eds.) SCOPE 62: The global carbon cycle. London: Island Press, 2004. P. 17–44.

10. Kapshtyk M.V., Demydenko O.V. The ways to ecologically balanced development of agro ecosystems in the Forest-steppe zone of Ukraine. *International J. of Agricultural Research and Review: ISSN -2360-7971: V. 2(8): pp 092-098*, August, 2014.

11. Denman K.L., Brasseur G., Chidthaisong A. et al. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. Eds: Solomon S., Qin D., Manning M. et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 2007. P. 499–588.

12. Чимтдоржиева Э.О. Запасы углерода в чернозёмах и каштановых почвах Забайкалья и эмисия CO_2 : автореферат дис. канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2011. 21 с.

13. Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D. et al. Modelling vegetation and the carbon cycle as interactive elements of the climate system. Ed. Pearce R. *Meteorology at the millennium*. N.Y.: Academic Press, 2001. P. 259–279.

14. Благодатский С.А., Ларионова А.А., Евдокимов И.В. Действие минеральных соединений азота на интенсивность дыхания и эффективность роста микроорганизмов в почве. *Почвоведение*. 1992. № 9. С. 88–96.

15. Zaehle S., Dalmonech D. Carbon-nitrogen interactions on land at global scales: current understanding in modelling climate biosphere feedbacks. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2011. V. 3. P. 311–320.