

УДК 631.45:631.8

<https://doi.org/10.31713/vs220257>

Клименко М. О., д.с.-г.н., професор, Колесник Т. М., к.с.-г.н., доцент, Сорока В. С., к.с.-г.н., доцент, Налобіна О. О., д.т.н., професор, Ковальчук Н. С., к.с.-г.н., доцент, Голотюк М. В., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, m.o.klimenko@nuwm.edu.ua; t.m.kolesnyk@nuwm.edu.ua; v.s.soroka@nuwm.edu.ua; o.o.nalobina@nuwm.edu.ua; n.s.kovalchuk@nuwm.edu.ua; m.v.holotiuk@nuwm.edu.ua)

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ РОДЮЧОСТІ ҐРУНТУ ПІД ВПЛИВОМ БАГАТОРІЧНОГО ВИРОЩУВАННЯ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ

У статті розглянуто раціональне використання ґрунтових ресурсів, що є одним із ключових чинників забезпечення сталого розвитку аграрного сектору. Багаторічне вирощування пшениці озимої супроводжується змінами фізико-хімічних та біологічних властивостей ґрунту, що впливає на його родючість. В умовах інтенсивного землеробства особливого значення набуває математичне моделювання процесів, що відбуваються у ґрунті, для розробки ефективних заходів його збереження та підвищення продуктивності агроєкосистем. Зміна родючості ґрунту під впливом багаторічного вирощування пшениці озимої є складним процесом, що включає динаміку водного балансу, трансформацію органічної речовини, баланс поживних елементів, зокрема азоту, а також зміну кислотності та мікробіологічної активності ґрунту. Водний баланс визначається співвідношенням опадів, випаровування, поверхневого стоку та інфільтрації. Зниження запасів вологи може негативно впливати на продуктивність культури, особливо в умовах посухи, що підтверджується результатами математичного моделювання. Одним із важливих показників родючості ґрунту є вміст органічної речовини, яка відіграє ключову роль у формуванні структури ґрунту, його водоутримувальної здатності та забезпеченні рослин елементами живлення. Баланс азоту є динамічним показником, що залежить від надходження добрив, біологічної азотфіксації та втрат через денітрифікацію та вилуговування. Одним із критичних факторів, що впливає на біохімічні процеси у ґрунті, є

його кислотність. Модель зміни рН демонструє тенденцію до підкислення ґрунту, що може бути наслідком використання мінеральних добрив та природних процесів вивітрювання. Зниження рН ґрунту погіршує доступність поживних елементів та може негативно впливати на розвиток мікроорганізмів. Оптимізація кислотно-лужного балансу можлива шляхом періодичного вапнування та застосування органічних речовин із буферними властивостями.

Ключові слова: родючість ґрунту; пшениця озима; ґрунтові фактори; мінеральні добрива; врожайність; водний баланс; кислотність ґрунту; мікробіологічна активність.

Вступ. Родючість ґрунту є ключовим фактором ефективності сільськогосподарського виробництва, що безпосередньо впливає на врожайність культур та економічну стабільність аграрного сектору. Сучасне сільське господарство стикається з численними викликами, серед яких деградація ґрунтових ресурсів посідає одне з провідних місць. Основними чинниками зниження родючості є інтенсивне використання земель без належного відновлення їхньої структури, вичерпання запасів органічної речовини, зниження вмісту поживних елементів, порушення мікробіологічної активності ґрунту та ерозійні процеси.

Пшениця озима, як одна з найважливіших зернових культур, вирощується на значних площах у багатьох регіонах світу. Її інтенсивне вирощування в умовах монокультурного землеробства створює додатковий тиск на ґрунтові ресурси. Це призводить до зниження вмісту органічної речовини, погіршення фізико-хімічних властивостей ґрунту, а також до зменшення біорізноманіття ґрунтових мікроорганізмів. Така ситуація обумовлює необхідність глибокого аналізу процесів, що відбуваються в ґрунті під впливом тривалого вирощування пшениці озимої [1; 2; 3].

Збереження родючості ґрунтів є не лише агротехнічною, а й екологічною проблемою. В умовах глобальних кліматичних змін важливо розробляти адаптивні технології землеробства, які дозволяють підтримувати баланс між інтенсивністю виробництва та охороною ґрунтових ресурсів. Математичне моделювання змін у ґрунті дає змогу прогнозувати наслідки різних агротехнічних заходів, що є

важливим інструментом для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень у сільському господарстві [4; 5; 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика зміни родючості ґрунту в умовах інтенсивного сільськогосподарського виробництва є предметом численних наукових досліджень як в Україні, так і за кордоном. Зокрема, у роботах Панова І. В. (2018) розглянуто основні принципи сталого землеробства та агроекологічного менеджменту, що сприяють підтриманню родючості ґрунту. Автор акцентує увагу на необхідності інтеграції органічних добрив, сівозмін та інших агротехнічних заходів для збереження ґрунтових ресурсів [7; 8].

Smith і Johnson (2020) у своїй роботі «Soil Fertility and Sustainable Agriculture» висвітлюють важливість збалансованого підходу до управління поживними речовинами. Вони підкреслюють, що довготривале вирощування однієї культури без належної ротації та відновлення органічної речовини призводить до суттєвого зниження ґрунтової родючості.

Значний внесок у дослідження механізмів деградації ґрунту зроблено в межах міжнародних програм під егідою FAO (2021), де розглядаються глобальні тенденції щодо стану ґрунтових ресурсів. У звітах FAO особлива увага приділяється впливу кліматичних змін на ґрунтові екосистеми та важливості адаптивного землеробства для збереження родючості [10].

Також важливими є дослідження, що стосуються використання математичних моделей для прогнозування змін у ґрунті. Наприклад, роботи Brown et al. (2019) демонструють ефективність диференціальних моделей для оцінки динаміки поживних речовин та ерозійних процесів. Їхні дослідження підтверджують, що моделювання дозволяє прогнозувати вплив різних агротехнічних сценаріїв на довгострокову родючість ґрунту.

Таким чином, аналіз наявної літератури підтверджує необхідність комплексного підходу до вивчення змін родючості ґрунту. Це включає як емпіричні дослідження, так і використання математичних моделей для обґрунтування ефективних агротехнічних стратегій [11].

Мета і завдання дослідження. Визначити вплив багаторічного вирощування пшениці озимої на зміну родючості ґрунту та розробити

оптимальні агротехнологічні заходи для її збереження і підвищення на основі математичного моделювання.

Виклад основного матеріалу. Моделювання зміни родючості ґрунту під впливом багаторічного вирощування пшениці озимої є важливим аспектом агрономічних досліджень, що дозволяє оцінити довгостроковий вплив агротехнічних заходів на якість ґрунтів. Пшениця озима, як основна сільськогосподарська культура, виснажує ґрунт внаслідок постійного вилучення з нього поживних речовин, води та елементів живлення. Проте, за умови раціонального землеробства та застосування сучасних методів удобрення, можна значно зменшити негативний вплив на родючість ґрунту.

Вода є ключовим фактором, що визначає ефективність росту рослин та зміни родючості ґрунту. Модель балансу води в ґрунті можна записати як:

$$\frac{dW(t)}{dt} = P(t) - E(t) - R(t) - D(t), \quad (1)$$

де $W(t)$ – об'єм води в ґрунті на момент часу t (мм); $P(t)$ – кількість опадів на момент часу t (мм); $E(t)$ – евапотранспірація (мм), яка залежить від погодних умов і стадії розвитку рослин; $R(t)$ – стік води (мм), що залежить від типу ґрунту і рельєфу місцевості; $D(t)$ – випаровування води із ґрунту (мм), що також змінюється в залежності від температури та вологості.

Ця модель дозволяє оцінити зміни водного режиму в ґрунті протягом вегетаційного періоду та оцінити, як вологість ґрунту впливає на родючість.

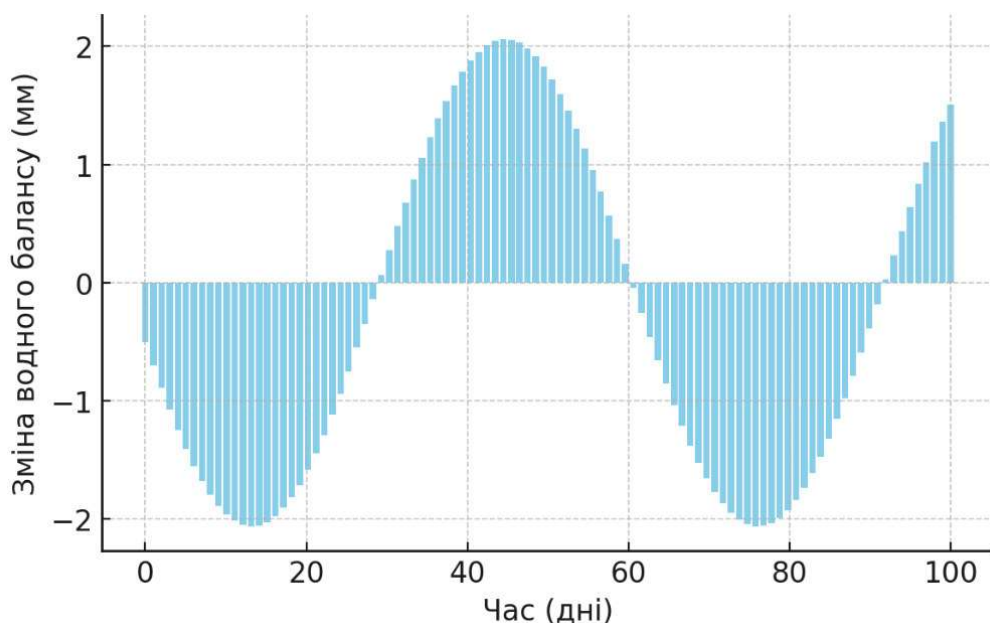


Рис. 1. Баланс води в ґрунті

Графік (рис. 1) демонструє коливання водного балансу в залежності від часу. Опади, евапотранспірація, стік та випаровування – основні чинники, що впливають на баланс. Зміни мають періодичний характер, що свідчить про сезонний вплив кліматичних умов. У певні моменти часу баланс води може ставати від'ємним, що може призводити до посухи.

Процес мінералізації органічних речовин є важливим для забезпечення ґрунту доступними поживними елементами. Це можна описати за допомогою моделі першого порядку:

$$\frac{dC(t)}{dt} = k \cdot C(t), \quad (2)$$

де $C(t)$ – кількість органічної речовини в ґрунті на момент часу t (кг/га); k – коефіцієнт швидкості мінералізації органічної речовини.

Модель описує зниження кількості органічної речовини в ґрунті через процеси розкладу та трансформації в доступні форми поживних елементів. Цей процес має великий вплив на родючість, оскільки органічні сполуки є основним джерелом азоту, фосфору та інших макроелементів.

Графічне відображення моделі (рис. 2) показує, що кількість органічної речовини зменшується експоненційно впродовж часу. Це пояснюється процесами мінералізації, коли органічні сполуки перетворюються на мінеральні форми, доступні для рослин. Така

тенденція може свідчити про необхідність додаткового внесення органічних добрив для підтримки рівня гумусу в ґрунті.

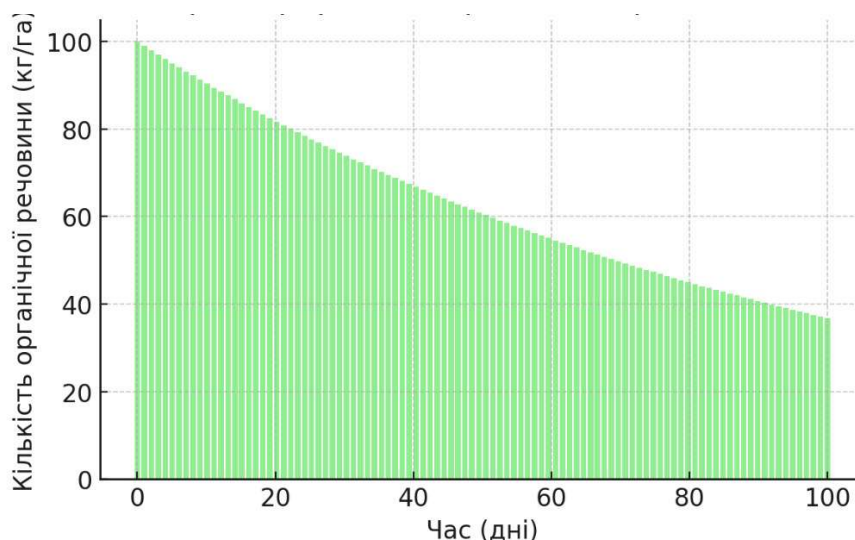


Рис. 2. Трансформація органічної речовини

Для розрахунку азотного балансу в ґрунті можна використати модель, що враховує як надходження, так і вилучення азоту з ґрунту:

$$\frac{dN(t)}{dt} = N_{in}(t) - N_{out}(t) + N_{fix}(t) - N_{loss}(t), \quad (3)$$

де $N(t)$ – кількість азоту в ґрунті на момент часу t (кг/га); $N_{in}(t)$ – надходження азоту (наприклад, через внесення добрив або дощування); $N_{out}(t)$ – вилучення азоту рослинами; $N_{fix}(t)$ – азотфіксація (яка залежить від присутності бобових культур або спеціальних мікроорганізмів); $N_{loss}(t)$ – втрати азоту через денітрифікацію, випаровування, вимивання тощо.

Ця модель дозволяє оцінити динаміку азоту в ґрунті під впливом вирощування пшениці та визначити, як це впливає на родючість.

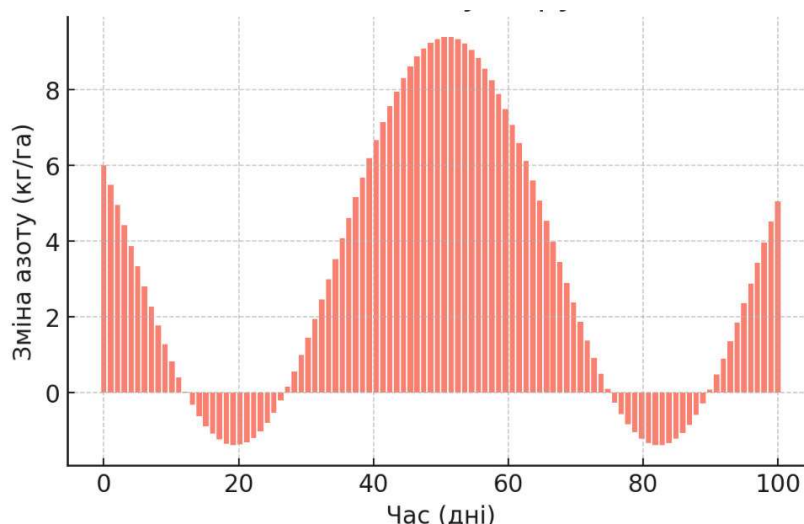


Рис. 3. Баланс азоту в ґрунті

Графік балансу азоту (рис. 3) демонструє коливання надходження та втрат азоту. Основні джерела надходження – внесення добрив і азотфіксація, а втрати зумовлені денітрифікацією та вилуговуванням. У певні періоди баланс стає від'ємним, що може свідчити про дефіцит азоту в ґрунті. Це може негативно впливати на врожайність пшениці озимої та потребувати корекції агротехнічних заходів.

Зміна рН ґрунту є важливим показником, що визначає доступність поживних речовин для рослин. Модель зміни рН ґрунту може виглядати так:

$$\frac{d(pH)}{dt} = \alpha \cdot I_{H^+}(t) - \beta \cdot O_{H^+}(t), \quad (4)$$

де pH – рівень кислотності ґрунту на момент часу t ; $I_{H^+}(t)$ – кількість водневих іонів, що надходять в ґрунт (наприклад, через кислотні дощі або внесення добрив); $O_{H^+}(t)$ – кількість водневих іонів, що нейтралізуються або виводяться з ґрунту в результаті взаємодії з мінералами або органічними сполуками; α , β – коефіцієнти, що залежать від властивостей ґрунту.

Модель дає змогу дослідити, як агротехнічні заходи (наприклад, внесення вапна або органічних добрив) впливають на кислотність ґрунту та, відповідно, на його родючість.

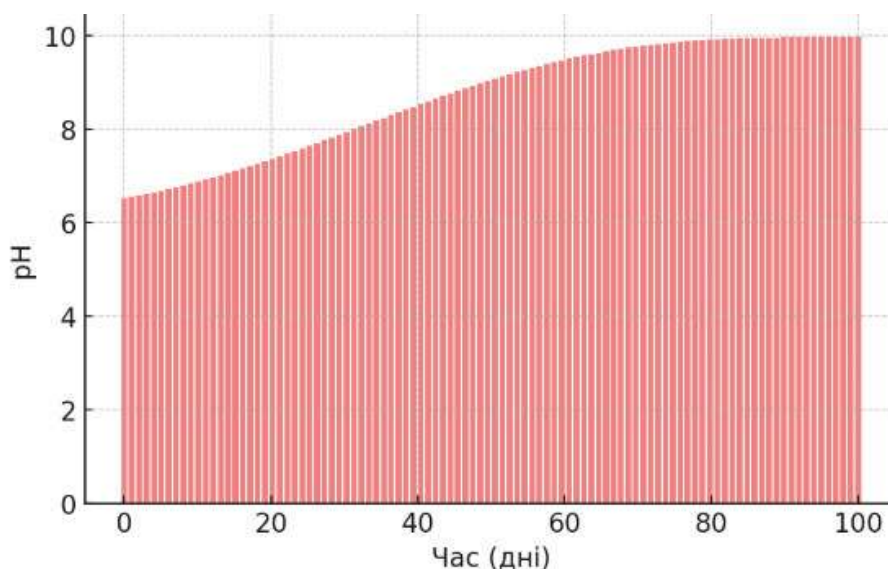


Рис. 4. Зміна кислотності ґрунту pH

Зміна кислотності (рис. 4) має хвилеподібний характер, що пов'язано з періодичним надходженням водневих іонів та процесами нейтралізації. В цілому, спостерігається тенденція до поступового зниження pH , що може вказувати на підкислення ґрунту. Це може бути наслідком застосування мінеральних добрив або природних процесів. Підкислення ґрунту потребує вапнування для збереження оптимального рівня pH .

Біологічна активність ґрунту (переважно діяльність мікроорганізмів) має важливе значення для підтримки родючості. Модель зміни біологічної активності ґрунту може мати вигляд:

$$\frac{dB(t)}{dt} = \gamma \cdot B(t) \cdot \left(1 - \frac{B(t)}{B_{\max}}\right) - \delta \cdot B(t), \quad (5)$$

де $B(t)$ – кількість активних мікроорганізмів в ґрунті на момент часу t ; $B_{\max}$ – максимальна кількість мікроорганізмів, яку може підтримувати ґрунт; γ – коефіцієнт росту популяції мікроорганізмів; δ – коефіцієнт смертності мікроорганізмів.

Ця модель враховує логістичний ріст популяції мікроорганізмів, який обмежений максимальним рівнем біологічної активності ґрунту.

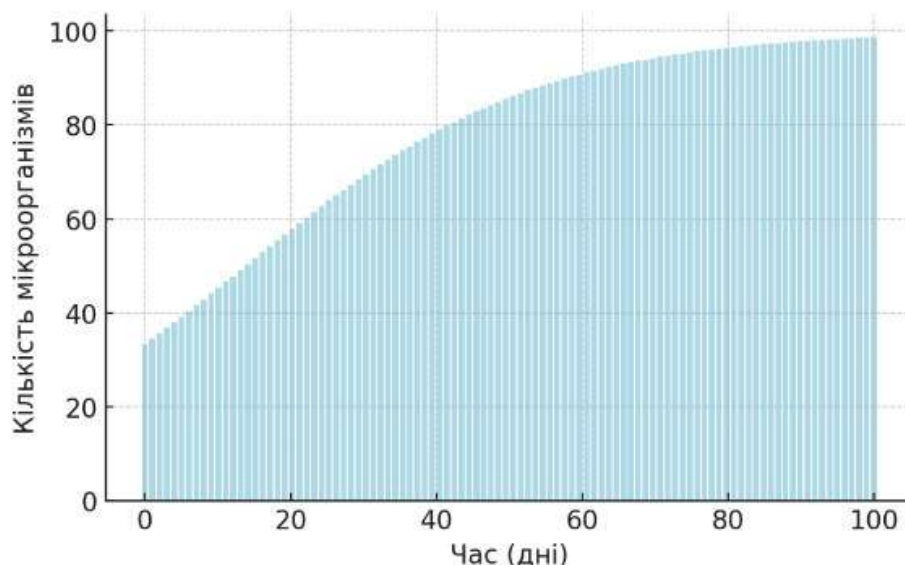


Рис. 5. Біологічна активність ґрунту

Графік (рис. 5) показує нелінійне зростання кількості мікроорганізмів у ґрунті, що відповідає логістичній моделі. Спочатку активне збільшення чисельності мікроорганізмів сповільнюється через обмеженість ресурсів. Це означає, що на початкових етапах розвитку екосистеми мікробіота активно розмножується, але з часом стабілізується. Підтримка біологічної активності ґрунту потребує раціонального використання органічних добрив і агротехнічних заходів.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було побудовано математичні моделі, що описують зміну основних показників родючості ґрунту під впливом багаторічного вирощування пшениці озимої. Аналіз отриманих даних засвідчив, що баланс води в ґрунті зазнає суттєвих коливань, зумовлених сезонними змінами опадів, евапотранспірації та стоку. У критичні періоди можливе зниження запасів вологи, що може негативно впливати на врожайність культури, особливо в умовах посухи, що потребує оптимізації зрошувальних заходів. Виявлено закономірність поступового зменшення вмісту органічної речовини внаслідок її мінералізації, що може призводити до зниження рівня гумусу та погіршення агрофізичних властивостей ґрунту. Відсутність належних заходів із відновлення органічної складової може спричинити деградаційні процеси, що обґрунтовує необхідність внесення органічних добрив або використання сидератів. Динаміка балансу

азоту демонструє значні коливання, зумовлені надходженням добрив, процесами азотфіксації, а також втратами через вилугування й денітрифікацію. Дефіцит азоту в окремі періоди може обмежувати продуктивність озимої пшениці, що потребує диференційованого підходу до удобрення. Дослідження змін кислотності ґрунту вказує на тенденцію до його поступового підкислення, що пов'язано як із природними процесами, так і з використанням мінеральних добрив. Зниження рН може негативно впливати на біологічну активність мікроорганізмів і доступність поживних речовин, що обґрунтовує необхідність періодичного вапнування. Встановлено, що біологічна активність ґрунту поступово стабілізується, що свідчить про формування рівноваги між ростом і смертністю мікроорганізмів. Висока мікробіологічна активність є важливим чинником підтримки ґрунтової родючості, що може бути забезпечено шляхом раціонального внесення органічних добрив і мінімізації механічного обробітку ґрунту. Отримані результати можуть бути використані для розробки агротехнологій, спрямованих на збереження та покращення родючості ґрунту при довготривалому вирощуванні пшениці озимої. Застосування математичного моделювання дає змогу прогнозувати зміни стану ґрунту та оптимізувати систему його управління з метою підвищення продуктивності агроєкосистем.

1. Шевчук М. Й., Ковальчук Н. С., Колесник Т. М., Клименко М. О. Агроєкологічна ефективність застосування ферментованого органічного добрива на дерново-слабопідзолистому ґрунті : монографія. Рівне : НУВГП, 2017. 183 с.
2. Мазуркевич Л. І. Вплив тривалого застосування добрив на вміст поживних елементів у ґрунті, врожайність пшениці ярої та якість зерна. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер. Агрономія*. 2014. Вип. 195(1). С. 78–84.
3. Гамаюнова В. В., Панфілова А. В., Кувшинова А. О., Касаткіна Т. О., Бакланова Т. В., Нагірний В. В. Збільшення зерновиробництва в зоні Степу України за рахунок вирощування ячменю та оптимізації його живлення. *Наукові горизонти. Scientific Horizons*. Житомир, 2020. № 2(87). С. 15–23.
4. Господаренко Г. М., Любич В. В., Калантир В. В. Удобрення пшениці твердої озимої. *Topical issues of modern science and education : the XI International Science Conference, March 11–13, 2021, Tallin, Estonia*. Р. 12–15.
5. Гамаюнова В. В., Литовченко А. О. Реакція сортів пшениці озимої на фактори та умови вирощування в зоні Степу України. *Вісник Харківського національного аграрного університету імені В. В. Докучаєва. Сер. Рослинництво, селекція і насінництво, плодоовочівництво і зберігання*. 2017. No 1. С. 43–52.

6. Польовий В. М., Ященко Л. А., Ровна Г. Ф., Колесник Т. М. Еколого-економічні аспекти вирощування сільськогосподарських культур на дерново-підзолистому ґрунті Західного Полісся. *Агроекологічний журнал*. 2022. № 1. С. 91–98. 7. Наукові основи агропромислового виробництва в зоні Полісся і західному регіоні України / Зубець М. В. та ін. Київ : Аграрна наука, 2010. 944 с. 8. Панов І. В. Агроекологія: основи стійкого землеробства. Київ : Агронаука, 2018. 312 с. 9. Smith J., Johnson R. Soil Fertility and Sustainable Agriculture. *Journal of Agricultural Science*. 2020. Vol. 15, No. 3. P. 245–259. 10. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of the World's Soil Resources: Main Report. Rome : FAO, 2021. 650 p. 11. Brown A., Green P., White S. Modeling Soil Nutrient Dynamics. *Environmental Modelling & Software*. 2019. Vol. 30, No. 7. P. 112–126.

REFERENCES:

1. Shevchuk M. Y., Kovalchuk N. S., Kolesnyk T. M., Klymenko M. O. Ahroekolohichna efektyvnist zastosuvannya fermentovanoho orhanichnogo dobryva na dernovo-slabopidzolystomu grunti : monohrafiia. Rivne : NUVHP, 2017. 183 s. 2. Mazurkevych L. I. Vplyv tryvalooho zastosuvannya dobryv na vmist pozhyvnykh elementiv u hrunti, vrozhaunist pshenytsi yaroї ta yakist zerna. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy. Ser. Ahronomiia*. 2014. Vyp. 195(1). S. 78–84. 3. Hamaiunova V. V., Panfilova A. V., Kuvshynova A. O., Kasatkina T. O., Baklanova T. V., Nahirnyi V. V. Zbilshennia zernovyrobnytstva v zoni Stepu Ukrainy za rakhunok vyroshchuvannya yachmeniu ta optymizatsii yoho zhyvlennia. *Naukovi horyzonty. Scientific Horizons*. Zhytomyr, 2020. No 2(87). S. 15–23. 4. Hospodarenko H. M., Liubych V. V., Kalantyr V. V. Udobrennia pshenytsi tvrdoї ozymoї. *Topical issues of modern science and education : the XI International Science Conference*, March 11–13, 2021, Tallin, Estonia. P. 12–15. 5. Hamaiunova V. V., Lytovchenko A. O. Reaktsiia sortiv pshenytsi ozymoї na faktory ta umovy vyroshchuvannya v zoni Stepu Ukrainy. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu imeni V. V. Dokuchaieva. Ser. Roslynnytstvo, selektsiia i nasinnytstvo, plodoovochivnytstvo i zberihannia*. 2017. No 1. S. 43–52. 6. Polovyi V. M., Yashchenko L. A., Rowna H. F., Kolesnyk T. M. Ekoloho-ekonomichni aspekty vyroshchuvannya silskohospodarskykh kultur na dernovo-pidzolystomu hrunti Zakhidnoho Polissia. *Ahroekolohichni zhurnal*. 2022. № 1. S. 91–98. 7. Naukovi osnovy ahropromysloвого vyrobnytstva v zoni Polissia i zakhidnomu rehioni Ukrainy / Zubets M. V. ta in. Kyiv : Ahrarna nauka, 2010. 944 s. 8. Panov I. V. Ahroekolohiia: osnovy stiikoho zemlerobstva. Kyiv : Ahronauka, 2018. 312 s. 9. Smith J., Johnson R. Soil Fertility and Sustainable Agriculture. *Journal of Agricultural Science*. 2020. Vol. 15, No. 3. P. 245–259. 10. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of the World's Soil

Resources: Main Report. Rome : FAO, 2021. 650 p. **11.** Brown A., Green P., White S. Modeling Soil Nutrient Dynamics. *Environmental Modelling & Software*. 2019. Vol. 30, No. 7. P. 112–126.

Klymenko M. O., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Kolesnyk T. M., Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D), Associate Professor, Soroka V. S., Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D), Associate Professor, Nalobina O. O., Doctor of Engineering, Professor, Kovalchuk N. S., Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D), Associate Professor, Holotiuk M. V., Candidate of Engineering (Ph.D), Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

SIMULATION OF CHANGES IN SOIL FERTILITY UNDER THE INFLUENCE OF MULTI-YEAR CULTIVATION OF WINTER WHEAT

The article discusses the rational use of soil resources, which is one of the key factors in ensuring the sustainable development of the agricultural sector. Long-term cultivation of winter wheat is accompanied by changes in the physical, chemical and biological properties of the soil, which affects its fertility. In the conditions of intensive agriculture, mathematical modeling of the processes occurring in the soil is of particular importance for the development of effective measures for its conservation and increasing the productivity of agroecosystems. The change in soil fertility under the influence of perennial winter wheat cultivation is a complex process that includes the dynamics of the water balance, the transformation of organic matter, the balance of nutrients, in particular nitrogen, as well as the change in acidity and microbiological activity of the soil. The water balance is determined by the ratio of precipitation, evaporation, surface runoff and infiltration. A decrease in moisture reserves can negatively affect crop productivity, especially in drought conditions, which is confirmed by the results of mathematical modeling. One of the important indicators of soil fertility is the content of organic matter, which plays a key role in forming the structure of the soil, its water-holding capacity and providing plants with nutrients. The nitrogen balance is a dynamic indicator that depends on the input of fertilizers, biological nitrogen fixation and losses due to denitrification and

leaching. One of the critical factors affecting biochemical processes in the soil is its acidity. The pH change model shows a tendency to acidification of the soil, which may be a consequence of the use of mineral fertilizers and natural weathering processes. A decrease in soil pH impairs the availability of nutrients and can negatively affect the development of microorganisms. Optimizing the acid-alkaline balance is possible through periodic liming and the use of organic substances with buffering properties.

***Keywords:* soil fertility; winter wheat; soil factors; mineral fertilizers; productivity; water balance; soil acidity; microbiological activity.**