УДК 631.4+631.8

**ІННОВАЦІЙНІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕМЕНТАМИ
РОДЮЧОСТІ ҐРУНТІВ****Р. Трускавецький, д. с.-г. н.**

ORCID ID: 0000-0002-2542-8527

В. Зубковська, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-8124-8635

І. Хижняк, м. н. с.

ORCID ID: 0000-0003-4950-3752

*Національний науковий центр**«Інститут ґрунтознавства і агрохімії імені О. Н. Соколовського»*<https://doi.org/10.31734/agronomy2020.01.181>**Трускавецький Р., Зубковська В., Хижняк І. Інноваційні моделі управління елементами родючості ґрунтів**

Стаття присвячена теоретичним принципам системного управління ґрунтовими режимами, вирішенню проблем точної діагностики та збалансованої оптимізації елементів родючості ґрунтів. Основну увагу акцентовано на проблемі діагностики та оптимізації елементів родючості, вирішення якої здійснено на теоретичних засадах показників буферних властивостей ґрунтів – оціночних критеріїв саморегуляції їхніх режимів (факторів родючості). Буферну здатність ґрунту відносно біогенних елементів слід трактувати як здатність ґрунту чинити опір процесам зміни концентрацій цих елементів у ґрунтовому розчині (фактор інтенсивності – ΦI) під впливом зростаючих доз їхнього внесення і, навпаки, при вилученні їх із ґрунтового розчину. Діагностуванню підлягають передусім основні чинники та елементи родючості – параметри їхнього пулу, динамічність, процеси мобілізації та іммобілізації за різних умов навантажень. На основі вихідних даних створюють графічні моделі оптимізації з обов'язковим параметричним показом меж та інтервалів оптимального, бажано також допустимого і незадовільного агроекологічного стану елемента родючості. Оптимальні параметри, які є невід'ємною складовою моделі управління, для кожного окремого біогенного елемента визначають експериментально для різних за своїми буферними властивостями ґрунтів і за відношенням до конкретної культури чи групи фізіологічно близьких культур. Методи оптимального управління основними функціями ґрунтів передбачають вибір та пошук найефективніших варіантів агротехнологічних операцій. Для цього використовують передусім реакцію рослин на зміну стану елементів родючості в ґрунтовому середовищі. Оптимізація передбачає застосування комплексу заходів, спрямованих на переведення та постійне утримання кожного елемента родючості в оптимальних для рослин параметрах як у просторовому, так і часовому вимірах.

Інноваційні моделі управління елементами родючості ґрунтів, що побудовані на факторах їхньої інтенсивності, параметрах агроекологічного стану та показниках буферних властивостей дають змогу розраховувати дози, здійснити ефективний вибір способів внесення і визначити тривалість післядії добрив, меліорантів та інших агротехнологічних операцій, нейтралізувати негативні впливи на функціонування ґрунтових систем.

Ключові слова: елементи родючості, діагностика, оптимізація, фактор інтенсивності, калій-буферність, фосфат-буферність.

Truskavetskiy R., Zubkovskaya V., Khyzhniak I. Innovative models of soil fertility elements management

The article is devoted to the theoretical principles of system management of soil regimes, solving problems of accurate diagnostics and balanced optimization of soil fertility elements. The main attention is focused on the problem of diagnostics and optimization of fertility elements, the solution of which is carried out on the theoretical basis of indicators of buffer properties of soils – evaluation criteria of self-regulation of their regimes (fertility factors). The buffering capacity of the soil relative to nutrients should be interpreted as the ability of the soil to resist changes in the concentrations of these elements in the soil solution (intensity factor – ΦI) under the influence of increasing doses and, conversely, when removing them from the soil solution. First of all, are to be diagnosed, the main factors and elements of fertility – the parameters of their pool, dynamism, processes of mobilization and immobilization under different load conditions. Graphical optimization models are created on the basis of initial data with the obligatory parametric display of the limits and intervals of the optimal, preferably also acceptable and unsatisfactory agroecological state of the fertility element. The optimal parameters, which are an integral part of the management model, for each individual biogenic element are determined experimentally for different buffer properties of soils and in relation to a particular culture or group of physiologically close crops. Methods of optimal management of the main functions of soils involve the selection and search for the most effective options for

agro-technological operations. To do this, use, first of all, the reaction of plants to changes in the state of fertility elements in the soil environment. Optimization involves the use of a set of measures aimed at the transfer and constant maintenance of each element of fertility in the optimal parameters for plants in both spatial and temporal dimensions.

Innovative models of management of soil fertility elements, that are built on factors of their intensity, parameters of agroecological condition and indicators of buffer properties allow to calculate doses, to make an effective choice of methods of application and to determine the duration of the aftereffect of fertilizers, ameliorants and other agro-technological operations, to neutralize the negative effects on the functioning of soil systems.

Key words: fertility elements, diagnostics, optimization, intensity factor, potassium buffering, phosphate buffering.

Постановка проблеми. Проблема родючості ґрунтів завжди була і залишається найактуальнішою проблемою світового масштабу, від вирішення якої залежить доля всього людства. Діагностування елементів родючості та оптимізація їхнього стану є ключовим принципом у виконанні управлінських завдань. Елементи родючості, які підлягають діагностуванню, визначаються як матеріальні елементарні носії ґрунтових режимів, що залучаються в процес біотичного кругообігу і безпосередньо впливають на ріст і розвиток рослин.

Діагностика та оптимізація – це безальтернативні атрибути моделей управління агроecологічним станом ґрунтів. Цей стан залежить від рівня внутрішньої системної організації ґрунтового тіла та режимів його функціонування. Завдяки відомим науковим працям [1; 2; 10] доведено, що недостатньо діагностувати поживний режим ґрунту тільки за вмістом рухомих форм біогенних елементів.

У процесі онтогенетичного розвитку рослин концентрація елементів мінерального живлення в ґрунтовому розчині різних за генетичною будовою та рівнем окультуреності ґрунтів постійно змінюється під впливом зовнішніх навантажень на ґрундове середовище. Динамічність і амплітуда коливань цих змін зумовлена внутрішньогрунтовими механізмами саморегуляції завдяки буферним властивостям ґрунтів. Тому виникла необхідність у встановленні принципово нових діагностичних критеріїв, які б враховували динамічність концентрації та запасів у ґрунті найдоступніших для рослин форм знаходження біогенних елементів (так званий фактор інтенсивності – ФІ).

Сучасна практика діагностування має на озброєнні цілу низку найрізноманітніших методик з визначення рухомих, слаборухомих та різної міцності зв'язку біогенних елементів з біо-органомінеральним комплексом (БІОРМІК) ґрунту. Проте кореляція між різними формами знаходження біогенних елементів у ґрунті та урожаєм, як правило, відсутня, що зумовлено не тільки явищами антагонізму-синергізму біогенних елементів у ґрунтовому розчині, а й буферною (саморегуляторною) здатністю ґрунту. Цю здатність вико-

ристано в побудові моделей управління й оцінено як інноваційний методологічний прийом. Сам процес установаження нової рівноваги (тривалість релаксації) здійснюється буферними механізмами, що притаманні БІОРМІК-у ґрунту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У сучасному ґрунтоутворенні, як свідчать численні літературні й аналітично-інформаційні джерела [5; 7–9; 11], домінують процеси деградації ґрунтів і ґрунтового покриву, передусім на орних землях інтенсивного сільськогосподарських використання. Тому за основу беремо положення [4; 6], що агробіогеоценоз (агроекосистема) – це створена людиною сільськогосподарська екосистема, *базовими структурно-функціональними компонентами якої є окультурений ґрунтовий блок* (едафотоп), штучний одно- або багатоконпонентний фітоценоз, а супутніми – цілі природні зоо- та мікробні комплекси, а також атмосфера (з відповідними кліматичними ресурсами місцевості). Отже, зважаючи на актуальність збереження високих якісних функціональних характеристик основного компонента агроекосистем – ґрунтів України, припинення деградаційних ґрунтових процесів і задля примноження родючого та екофункціонального потенціалів ґрунтів, а за цим і ефективності цілої агроекосистеми, виникає необхідність розроблення прогностичних моделей їхньої еволюційної спрямованості.

Постановка завдання. Нашим завданням було удосконалити методи функціональної (динамічної) діагностики основних елементів родючості та розробити сучасні моделі управління ними.

Виклад основного матеріалу. Для діагностування виділяють щонайменше три станові позиції ґрунту відносно елемента родючості – оптимальна, задовільна (допустима), незадовільна до критичної. Відомо, що природний потенціал доступних для рослин біогенних елементів, навіть у потенційно родючих чорноземах, не задовольняє фізіологічні потреби сучасних сортів сільськогосподарських культур. Для переведення вихідного параметра елемента родючості в оптимальну зону й стійкого

утримання в ній виникає необхідність визначення його відхилення від оптимальних значень.

Модель управління базується на результатах функціональної діагностики, тобто на встановленні поведінки біогенних елементів, їхньої динамічності й характеру впливу на формування урожаю. Функціональна діагностика покликана передусім оцінювати рівень відхилення стану кожного, зокрема, елемента родючості (виснаження чи збагачення), від його генетично урівноваженого природного стану, а також динаміку відтворення оптимального стану елемента родючості.

До найдієвішого і динамічного чинника формування урожаю слід віднести ґрунтовий розчин, речовинний склад якого постійно змінюється. Ґрунтовий розчин є безпосереднім джерелом водно-мінерального живлення рослин і становить собою рідку фазу ґрунту – продуктивну вологу разом із розчиненими в ній мінеральними, органічними та орґано-мінеральними сполуками, асоціатами, комплексами, дисоційованими іонами, тощо. Постійне підтримання ґрунтового розчину в агроекологічно якісному стані впродовж усієї вегетації рослини – основне цільове завдання управління процесом. Уміст біогенних елементів у ґрунтовому розчині змінюються в процесі ґрунтоутворення (вивітрювання і деструкції твердої фази ґрунту), органічної секвестрації вуглецю, азотфіксації, міграції й акумуляції речовин, господарської діяльності людини. У лабораторно-аналітичній практиці ґрунтовий розчин вивчають, імітуючи його різними витяжками з ґрунту – водною і нейтрально-сольо-

вою, а також за допомогою ґрунтових паст, суспензій, центрифуг, тощо. Такі витяжки не впливають деструктивно на БІОРМІК ґрунту і тим самим не спричиняють істотної зміни хімічного складу й реакції ґрунтового розчину.

Оптимальні параметри як невід’ємні складові моделі управління для кожного окремого біогенного елемента визначають експериментально для різних за своїми буферними властивостями ґрунтів і за відношенням до конкретної культури чи групи фізіологічно близьких культур.

Буферну здатність ґрунту відносно біогенних елементів слід трактувати як здатність ґрунту чинити опір процесам зміни концентрацій цих елементів у ґрунтовому розчині (ФІ) під впливом зростаючих доз їхнього внесення, агротехнологічних операцій, кліматичних змін і погоди, мінерального живлення рослин. Застосування методів із визначення буферної здатності різноманітних ґрунтів дає змогу обґрунтувати, здавалося б, парадоксальне явище – відсутність кореляцій між ФІ елемента родючості та урожаєм. Встановлено [3; 10], що в ґрунтовому розчині концентрація нітратних, амонійних, фосфорних, калійних, кальцієвих та інших іонів може бути мінімальною, але за якісно функціонуючих ґрунтових буферних механізмів створюються сприятливі умови для нормального мінерального живлення рослин, аніж за високого, але нестабільного ФІ, що притаманно низько- та надто високобуферним ґрунтам.

Створення моделі управління (рис. 1) починається з аналізу вихідного агроекологічного стану ґрунтів.

Рис. 1. Загальна схема управління родючістю ґрунтів.

Діагностуванню підлягають передусім основні чинники та елементи родючості – параметри їхнього пулу, динамічність, процеси мобілізації та іммобілізації за різних умов навантажень.

На основі вихідних даних створюють графічні моделі оптимізації з обов'язковим параметричним показом меж та інтервалів оптимального агроекологічного стану елемента родючості, що визначають експериментально в польових і вегетаційних дослідках за установленою схемою залежно від ґрунтового різновиду й культури. Для автоматизованої побудови графічних моделей управління ми розробили відповідні комп'ютерні програми, що дають змогу істотно спростити весь процес формалізації експериментальних даних, діагностування та оптимізації (управління).

Поглиблення знань з проблем буферної здатності ґрунтів відкриває новий етап у розвитку теоретичних основ агроґрунтознавства та керованого землеробства. Нині для всіх ґрунтових відмін польових стаціонарних дослідів, в яких вивчають ефективність добрив та меліорантів і яких в Україні залишилось лічене число, сповна реально розробити моделі управління з наступною екстраполяцією їх на аналогічні за буферними властивостями ґрунтові об'єкти, зокрема і на ґрунтах Західних регіонів України. За ігнорування діагностичної та управлінської значущості буферних властивостей ґрунтів важко уявити подальший інноваційний прогрес у теорії й практиці застосування добрив і меліорантів, мінерального живлення рослин і керованого землеробства.

Методи оптимального управління основними функціями ґрунтів передбачають вибір та пошук найефективніших варіантів агротехнологічних операцій. Для цього використовують передусім реакцію рослин на зміну стану елементів родючості в ґрунтовому середовищі. Оптимізація передбачає комплекс заходів, спрямованих на постійне утримання стану елемента родючості (продуктивної вологи, біогенних елементів) в оптимальних для рослин параметрах як у просторі, так і в часі.

У практиці землеробства, як правило, вибір найефективнішого комплексу агрозаходів здійснюється на основі польових дослідів. Проте поширення їхніх результатів через низку невизначеностей, зокрема, через різноманітність ґрунтових, кліматичних, погодних, господарських та інших умов, істотно обмежене.

Формування рентабельного та якісного урожаю здійснюється на основних принципах точного (керованого) землеробства. Ці принципи передбачають постійно діючий моніторинг за станом

основних функцій ґрунтів, своєчасну корекцію і реалізацію меліоративних та агрозаходів з одночасним розв'язанням стратегічних цільових задач. Режими ґрунту (водно-повітряний, поживний, тепловий, кислотно-основний, окисно-відновний, еколого-санітарний, тощо) функціонують у синергетично вираженій гармонії лише за умов досягнення оптимальності їхнього стану. Функціонування ґрунтових систем в оптимальних режимах (як основний закон землеробства) є запорукою отримання високорентабельних та якісних урожаїв.

Стабільний і найефективніший режим функціонування ґрунтів в оптимальних межах має місце на ґрунтах із високою природною якістю, яку можна оцінити системою буферних механізмів. Останні й визначають рівень керованості режимами функціонування ґрунту. На рис. 2 показано загальний вигляд графічної моделі, зокрема кривої буферності (ВТ–Д), що характеризує динаміку фосфатного й калійного стану ґрунту з відміченим на ній відрізком з оптимальними параметрами «фактору інтенсивності» (К–Л).

Управління калійним і фосфатним режимами передбачає діагностику та оптимізацію, які здійснюють, використовуючи криву буферності (див. рис.1). На неї наносять експериментально встановлені оптимальні межі концентрації фосфатних і калійних іонів у ґрунтовому розчині. За розміщенням відображуваної точки на кривій буферності оцінюють фосфатний і калійний стан ґрунту. Для прикладу, в таблиці наведено параметри оптимуму рР і рК основних різновидів ґрунтів Полісся.

Слід зазначити, що на низькобуферних ґрунтах, порівняно з високобуферними, для переведення елемента родючості в оптимальну зону витрачається менше як енергетичних, так і матеріальних ресурсів. Проте режим оптимального функціонування в цьому разі нестійкий і швидко втрачається. На ґрунтах із надто високою іммобілізаційною буферною ємністю режим оптимального функціонування характеризується високою стійкістю, проте досягається значно більшими ресурсними витратами, аніж за умов низькобуферних ґрунтів.

Отже, режим оптимального функціонування ґрунтів забезпечується ґрунтовими буферними механізмами, без пізнання яких успішно розв'язати тактичні й стратегічні цільові задачі з відтворення родючості та охорони ґрунтових ресурсів неможливо.

Тактичні цільові задачі передбачають отримання якісного і високого рівня урожайності через

прямий вплив на стан елементів родючості й утримання цього стану в оптимальних параметрах. Цього досягають відповідною системою удобрення і обробітку, структурою сівозмін, водорегулюванням, тощо. При цьому залишаються якби в

тіні проблеми розв'язання стратегічних задач удосконалення внутрішньої агроекологічно доцільної організації ґрунтових систем, яку можна діагностувати тільки на підставі оцінки якості й характеру функціонування буферних механізмів.

— — — безбуферний субстрат (чистий кварцовий пісок) – А–В;
 ————— **КРИВА БУФЕРНОСТІ ҐРУНТУ** – ВТ–Д.

Рис. 1. Графічна модель діагностики та оптимізації фосфатного і калійного стану ґрунту [3]:

ВТ – вихідний стан елемента родючості; О – точка термодинамічної рівноваги обміну; АБВ – стандартна площа буферної ємності (100 балів); ОДВ – площа мобілізаційної буферної ємності (бем); ОГА – площа іммобілізаційної буферної ємності (беім); КЛ – відрізок кривої буферності в межах оптимальних параметрів «ФАКТОРУ ІНТЕНСИВНОСТІ».

Таблиця

Оптимальні параметри показників активності фосфатних (рР) і калійних іонів (рК) в основних різновидах ґрунтів Полісся

Ґрунт	Вихідний (природний) параметр рР (чисельник) і рК (знаменник)	Оптимум рР і рК	
		нижній	верхній
Дерново-підзолистий зв'язнопіщаний	<u>5,45</u>	<u>3,9</u>	<u>3,2</u>
	5,50	3,7	2,8
Дерново-підзолистий супіщаний	<u>5,05</u>	<u>4,0</u>	<u>3,2</u>
	4,9	4,0	3,0
Дерновий опідзолений оглеєний суглинковий	<u>5,16</u>	<u>4,4</u>	не встановлено
	—	—	—
Торфовий низинний середньозольний	<u>4,54</u>	<u>4,0</u>	<u>3,3</u>
	4,32	3,8	3,0
Торфовий низинний багатозольний карбонатний	<u>5,65</u>	<u>5,4</u>	не встановлено
	4,43	4,0	3,2

Проте лише в гармонійному поєднанні тактичних і стратегічних цільових задач досягається високий еколого-економічний ефект. Особливо це проявляється в процесах використання ґрунтових ресурсів Західних регіонів України, де поширені гідроморфні, з підвищеною кислотністю та ерозійно-деградовані ґрунти. Без обґрунтованої системи удобрення і меліорації тут не обійтись. Остання дає змогу підвищити продуктивність земельних угідь, як мінімум, удвічі.

Вагомим лімітним чинником урожайності на гідроморфних ґрунтах виступають повітряний (аераційний – дефіцит кисню) та окисно-відновний режими, без оптимізації яких регуляція інших режимів, зокрема, кислотно-основного і трофного, є агроекологічно недоцільною, витратною і безперспективною. Формування штучних високогідро- і аеробуферних механізмів саморегуляції в таких ґрунтах є необхідним фоном, на якому оптимізуються всі інші основні режими. Виходячи з цього, ми й звертаємо увагу землекористувачів на перспективність використання інноваційних моделей управління родючістю в їхній практичній діяльності з упровадження сучасних досягнень у системі керованого землеробства. Такі моделі розробляють для кожного робочого поля залежно від структури ґрунтового покриву.

Висновки

1. Інноваційні моделі управління елементами родючості ґрунтів в графічному відображенні містять:

- криву буферності еталонного різновиду ґрунту відносно діагностованого елемента з відміченим на ній відрізком меж його оптимального стану;
- точку розміщення на кривій буферності параметра фактора інтенсивності елемента родючості на момент діагностики;
- зростаючі дози навантажень на ґрунт (вісь абсцис) та показники зміни ФІ під впливом зростаючих навантажень (вісь ординат).

2. Побудовані на факторах інтенсивності, параметрах агроекологічного стану та показниках буферних властивостей графічні моделі допома-

гають розраховувати дози, здійснювати вибір найефективніших способів застосування добрив і меліорантів, визначати тривалість їхньої післядії, нейтралізувати негативні впливи на функціонування ґрунтових систем, довести їх до оптимального стану та стійко утримувати в ньому.

Бібліографічний список

1. Aslyng H. C. The lime and phosphate potentials of soils; the solubility and availability of phosphates. *Royal. Vet. Agr. Coll.* Copenhagen: Jearb, 1954. Vol. 1. P. 1–50.
2. Beckett P. H. T., White R. E. Studies of the phosphate potentials of soils. Part III: The pool of labile in organic phosphate. *Plant and Soil*. 1964. Vol. 21, № 2–3. P. 253–282.
3. Балюк С. А., Трускавецький Р. С. Моделі системного управління потенціалом родючості ґрунтів (на прикладі Харківської і Волинської областей) / за ред. С. А. Балюка і Р. С. Трускавецького. Київ; Харків, 2018. 116 с.
4. Гнатів П. С., Снітинський В. В., Нечай О. С., Зинюк О. Д., Пасічник Т. В., Зеліско О. В. Екосистеми і системний аналіз / за ред. П. С. Гнатіва і В. В. Снітинського. Львів: Колір ПРО, 2017. 416 с.
5. Основи управління родючістю ґрунтів / Р. С. Трускавецький, Ю. Л. Цапко; за наук. ред.: Р. С. Трускавецького. Харків: ФОП Бровін О. В., 2016. 388 с.
6. Снітинський В., Гнатів П., Зинюк О., Корінець Ю., Дацко Т. Системний підхід в агроекології: дослідницький і навчальний аспекти. *Вісник ЛНАУ: агрономія*. 2019. № 23. С. 34–40. doi.org/10.31734/agronomy2019.01.034.
7. Соколов М. С., Дородных Ю. Л., Марченко А. И. Здоровая почва как необходимое условие жизни человека. *Почвоведение*. 2010. № 7. С. 858–866.
8. Соколовський А. Н. Сельскохозяйственное почвоведение. Москва: Госиздат-Сельхозиздат, 1956. 332 с.
9. Стратегія збалансованого використання, відтворення і управління ґрунтовими ресурсами України / за ред. С. А. Балюка і В. В. Медведєва. Київ: Аграрна наука, 2012. 239 с.
10. Трускавецький Р. С. Буферна здатність ґрунтів та їх основні функції. Харків: Нове слово, 2003. 225 с.
11. Шоба С. А. Горизонти почвоведення: ітоги і перспективи. *Почвоведение*. 2009. № 5. С. 515–520.

Стаття надійшла 12.03.2020