

УДК 631.434

© 2021

**ТЕРМОДИНАМІЧНА СИСТЕМА
ҐРУНТУ, ЙОГО ГОМЕОСТАЗ
І ВІРОГІДНИЙ МЕХАНІЗМ
УТВОРЕННЯ СТРУКТУРИ***С.С. Коломієць*

*кандидат сільськогосподарських наук
Інститут водних проблем і меліорації НААН
вул. Васильківська, 37, м. Київ, 03022, Україна
e-mail: kss2006@ukr.net*

Надійшла 21.01.2021

Мета. Обґрунтування динамічної функціональної моделі термодинамічної системи ґрунту у взаємодії з циклічними факторами довкілля, розкриття внутрішніх гомеостатичних процесів, результатом дії яких стає відтворення ґрунтової структури. **Методи.** Системного аналізу, теоретичні — для узагальнень специфіки будови ґрунту та створення його фізичної моделі; експериментальні — для лабораторних досліджень. **Результати.** Лабораторними гідрофізичними випробуваннями зразків ґрунту непорушеної структури встановлено виникнення гістерезису водоутримувальної здатності ґрунту, величина якого може сягати 10–20 %. Головною причиною цього явища є затиснення повітря рідинними мембранами в розширеннях порового простору. Наведено результати впливу нагрівання зразка ґрунту сталого вологонасичення, які фіксують автоколивальний характер динаміки капілярного потенціалу в ґрунті, що свідчить про внутрішньопоровий перерозподіл вологи та локальний транспортний механізм конвективного переносу речовини. **Висновки.** Взаємодія ґрунту з термодинамічними факторами довкілля перетворює його в мікроградієнтну дисипативну структуру з виникненням низки субординаційних процесів. Основними результатами їхньої дії є періодичне підвищення локальної термодинамічної доступності живлення для рослин і формування нерівномірної в просторі цементації дисперсних часток, що стають зародками структурних окремоностей. Поняття гомеостазу ґрунту, поєднуючи субординаційні процеси, характеризує рівень енергоспоживання зовнішнього потоку енергії, за рахунок якого відтворюються основні властивості та структурна організація ґрунту.

Ключові слова: поровий простір, гетерогенність, гістерезисність, синергетика, капілярний потенціал, гомеостатичні процеси.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202103-02>

Ґрунт — це динамічна, жива біокосна система, здатна відтворювати свої властивості в умовах дії природних і антропогенних збурень. Внутрішні процеси, за рахунок дії яких відтворюються основні властивості і структурна організація системи, зокрема ґрунту, називаються

гомеостазом [1]. Ідентифікація цих внутрішніх (субординаційних) процесів у ґрунті сприятиме переходу до детермінованих параметричних моделей взаємодії ґрунту з факторами зовнішнього середовища, що відкриває шлях до свідомого цілеспрямованого управління властивостями ґрунтів.

Дослідженням взаємодії ґрунту із зовнішнім середовищем, що належать до екології ґрунтів, приділялося недостатньо уваги. Ідеї екології ґрунтів, що були започатковані одночасно зі становленням генетичного ґрунтознавства В.В. Докучаєвим, П.С. Косовичем, Л.І. Прасоловим, Б.Б. Полиновим, В.Г. Корневим, школою В.Р. Вільямса, а в подальшому розвинуті Г.В. Добровольським, Є.Д. Нікітіним, В.Р. Волобуєвим, П.П. Надточієм та іншими дослідниками, на жаль, не знайшли практичного застосування [2–4]. На цьому етапі зародження екології ґрунтів було сформовано положення про взаємозв'язок між ґрунтом і середовищем, про одночасну дію факторів ґрунтоутворення, концепцію парагенезису генетичних різновидів ґрунтів відповідно до просторової мінливості умов їх утворення, визначено екологічні функції ґрунтів. Однак не розглядали взаємодію ґрунту з факторами зовнішнього середовища в масштабі реального часу (аспект «ґрунт-момент») [5].

Саме поняття загальної екології передбачає розгляд постійної суб'єкт-об'єктної взаємодії на кількісному рівні. За визначенням, ґрунт є відкритою термодинамічною системою, що обмінюється з довкіллям **речовиною, енергією та інформацією** [1, 6]. На обміні речовиною з довкіллям ґрунтується нинішня система відтворення родючості ґрунту відповідно до закону повернення біогенних елементів. Проте без 2-х інших складових взаємодії ця система недостатньо ефективна, тому нині спостерігається подальша втрата родючості ґрунтів у всьому світі. Обмін ґрунту з довкіллям енергією визначає доступність для рослин складових живлення у векторі ґрунт–рослина–атмосфера. І рослини в продукційному процесі керуються правилом мінімізації витрат власної енергії на споживання. Фактично вивчення енергетичної взаємодії ґрунту з довкіллям почалося з формування Є. Букінгемом ще на початку минулого століття поняття потенціалу вологи [7] та винайдення В.Г. Корневим приладу для вимірювання сили утримання вологи ненасиченим ґрунтом — тензіометра [8]. Водоутримувальна здатність ґрунту визначає доступність для коренів рослин вологи

як основного агента живлення, через посередництво якого споживаються всі водорозчинні сполуки. Доступність для рослин вологи може бути ототожнена з доступністю складових живлення з ґрунту.

Обмін ґрунту з довкіллям інформацією практично не вивчений, це своєрідна *terra incognita*, хоча на цей аспект вчені звертали увагу ще в минулому сторіччі [9]. Лише завдяки становленню в 70–80 роки минулого сторіччя молодій науковій дисципліні — синергетики сформульовано концептуальні засади інформаційної взаємодії ґрунту з довкіллям, зокрема передачу зв'язаної інформації через ґрунтові режими і її накопичення в ґрунті у вигляді негентропії — від'ємної ентропії [10, 11]. Стійкість системи ґрунту зумовлена законом накопичення інформації: чим більше в системі інформації, тим вона стійкіша до зовнішніх факторів.

Отже, створення теорії агрогенної еволюції ґрунтів і теорії управління ґрунтовою родючістю неможливі без розгляду обміну ґрунту з довкіллям не лише речовиною, а й енергією та інформацією.

Мета досліджень — обґрунтування динамічної функціональної моделі термодинамічної системи ґрунту у взаємодії з циклічними факторами довкілля, розкриття внутрішніх гомеостатичних процесів, результатом дії яких є відтворення ґрунтової структури.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження, системний аналіз і синтез із застосуванням інструментарію синергетики, експериментальні лабораторні досліди із залученням термодинамічних гідрофізичних методів.

Результати досліджень. Першочерговим в екології ґрунтів є необхідність встановлення механізму дії зовнішніх кліматичних факторів на енергетичний стан гетерогенної системи ґрунту. Зовнішні термодинамічні параметри: температура ($T^{\circ}\text{C}$), атмосферний тиск ($P_{\text{атм}}$) та волога (θ) (опад) поширюються в ґрунтовому середовищі від поверхні ґрунту у вигляді теплових хвиль і хвиль зволоження, тобто мають градієнтну структуру. Термодинамічний стан (потенціал) трифазної гетерогенної системи ґрунту може бути визначений у будь-якій фазі. Проте найдоступніше його визначати у фазі рідини, через потенціал вологи [8],

який залежить від конфігурації водного тіла, що обмежується поверхнями розділу «тверді частки — рідина» і «рідина — повітря» та визначає рівень поверхневої енергії в системі. Саме ці поверхні розділу визначають фундаментальну властивість ґрунту — його **гетерогенність**. Іншою фундаментальною властивістю є його **гістерезисність**, що проявляється в неоднозначності зв'язку вологонасичення із силою водоутримувальної здатності ґрунту [12]. Чітке пояснення фізичної суті явища капілярного гістерезису було отримано на основі запропонованої моделі порового простору ґрунту у вигляді гофрованого еквівалентного капіляра [13], яка обґрунтовує наявність у розширених порового простору затиснутого повітря, що може перебувати в рівноважному стані. У ґрунті завжди є затиснуте повітря, кількість якого залежить від структури його порового простору та вологонасичення і може становити десятки відсотків від об'єму ґрунту. Найголовніше, що це повітря розосереджене в усьому об'ємі ґрунтового середовища і зі зміною зовнішніх термодинамічних параметрів реагує зміною свого об'єму і газового тиску. Фактично це затиснуте повітря діє як мікропомпа — стає розосередженим у об'ємі центром термодинамічної нерівноважності (ЦТН), з якого волога може витискуватися або, навпаки, надходити в тіло пори. Тобто в довікллі ЦТН періодично створюються радіальні градієнти, що призводять до локального відцентрового перерозподілу вологи в ґрунті. Фактично за взаємодії з мінливими зовнішніми кліматичними факторами ґрунт стає мікроградієнтною структурою з періодичним локальним перерозподілом речовини, де затиснуте повітря відіграє роль рушія, своєрідного «серця» рухомості порового розчину. Синергізм взаємодії цих мікрозон може призводити до зміни термодинамічного стану ґрунту на рівні макропараметра системи.

Особливу увагу слід звернути на локальний перерозподіл порового розчину в довікллі ЦТН, який конвективно транспортує різні сполуки. Саме такого транспортного механізму не вистачало в теоріях гумусоутворення [14] та концепціях формування структури [15]. Ще однією особливістю

затискання повітря є те, що зі зростанням газового тиску в бульбашці, з неї починається дифузія газів, які складають ґрунтову атмосферу. У ній уміст діоксиду вуглецю (CO_2) на порядок вищий за відкриту атмосферу — до 3–20 %. Саме цей газ має найвищу розчинність у поровому розчині і, дисоціюючи, підвищує концентрацію водневих іонів, тобто збільшує кислотність порового розчину (рН) у довікллі затиснутого повітря в певні періоди. Тобто ЦТН стає періодично ще й кислотним центром (КЦ), біля якого створюються відцентрові градієнти кислотності (рН). Кислотність є визначальним фактором фазової рівноваги для сполук, чутливих до цього параметра. Отже, у довікллі ЦТН+КЦ локально **порушується фазова рівновага**, що разом із локальною рухомістю порових розчинів створює умови певної просторової селекції і зонування сполук відцентрово від затиснутого повітря та унікальні можливості зміни об'єму елементарних пор через відносне пересування надлишковим газовим тиском звільнених від цементу дисперсних часток, що їх складають. Навкруги бульбашок затиснутого повітря формується ще й **екотон** ґрунтової мікробіоти відповідно до радіальної зональності екологічних умов їхнього життя в ґрунті.

Для синергетики [16], ключовим є **поняття активного кінетичного середовища**, і ґрунт повністю йому відповідає. У ньому наявне розподілене джерело енергії і/або речовини, багатой на енергію; кожний елементарний об'єм середовища перебуває в стані, далекому від термодинамічної рівноваги; зв'язок між сусідніми елементарними об'ємами здійснюється через процеси обміну.

Першочерговим для ґрунту є питання наявності розподіленого джерела енергії. Органічна речовина — резервуар енергії, яка повільно вивільняється в ґрунт за біохімічного її розкладу і фактично визначає його енергетичність. Однак кінетична складова енергобалансу ґрунту багаторазово перевищує енергоємність органічної речовини в ньому і залежить від рівня дисипації сонячної енергії, який визначається інтенсивністю енерговитратних субординаційних ґрунтових процесів. Саме такі процеси

і забезпечують гомеостаз ґрунту, результатом дії яких є відтворення певної його структури та гумусованості.

Структура ґрунту. У сучасній агрофізиці немає поняття елементарного об'єму як рівня організації ґрунтової маси [17]. Однак його наявність є фундаментальним для термодинаміки та синергетики. В агрофізиці під структурою ґрунту розуміють сукупність окремоостей, агрегатів, різних за розмірами, формою, міцністю та зв'язністю [15], характерних для кожного ґрунту і його горизонтів. Однак такий підхід для оцінки структури ґрунту як високоорганізованої системи є некоректним, оскільки співвідношення уламків є функцією способу порушення і багатьох інших чинників (температури, вологості та ін.). Найголовніше, що при цьому не враховується синергізм взаємодії всіх складових дисперсних елементів ґрунту. Рослина взаємодіє з ґрунтом як цілісною системою, а доступність живлення зумовлена потенціалом вологи як інтегровальним поняттям об'ємної будови ґрунту. Тому саме термодинамічні методи слід застосовувати для характеристики структури ґрунту.

Фундаментальною властивістю ґрунту є його гетерогенність, яку інтегрально характеризують площі поверхонь розділу «тверді частки–рідина» і «рідина-повітря». Інтегральною характеристикою **структури складення ґрунту є структура його порового простору**, яка визначає через поверхневий натяг рідини поверхневу енергію і перемінну силу зв'язку вологи з каркасом ґрунту, тобто його капілярний потенціал. Ця функціональна залежність капілярного потенціалу від вологонасичення $P=f(\theta)$ названа кривою водоутримувальної здатності ґрунту, або його основною гідрофізичною характеристикою (ОГХ) [18]. Фактично ОГХ є інтегральною кривою розподілу порового простору ґрунту за розмірами — радіусами вписаної кулі в уявні капіляри. Однак з урахуванням нерегулярності перетину уявних капілярів у реальному дисперсному середовищі поровий простір може бути охарактеризований 2-ма характерними розмірами — r_{\min} та r_{\max} [19]. Ці радіуси відповідають радіусам вписаної кулі в найвужчому місці тіла пори r_{\min} та в розширеннях пори — r_{\max} .

Саме ці радіуси кривизни порового розчину визначають капілярний тиск при осушенні і заповненні тіла пори під час сорбції та десорбції, що і є причиною капілярного гістерезису.

Запропонована фізична модель порового простору у вигляді гофрованого еквівалентного капіляра враховує нерегулярність перетину порового простору і характеризує інтегрально об'єм усіх капілярів через кривизну самого еквівалентного капіляра [19]. У розширеннях порового простору затиснуте повітря може бути в рівноважному стані, де виконується умова $r_{\max} \geq r_a \geq r_{\min}$ і де r_a — радіус узагальнювального меніску рідини на контакт з атмосферою [13]. При цьому до площі поверхні розділу рідина–повітря, сполученої з атмосферою, яку доцільно назвати **екстрагетерогенністю**, додається ще й площа поверхні розділу рідина–повітря в бульбашках затиснутого повітря, що може бути названа **інтрагетерогенністю**. Тобто структура порового простору ненасиченого вологою ґрунту в будь-який момент обмежується поверхнями розділу екстра- + інтрагетерогенності. У цьому полягає взаємозв'язок 2-х фундаментальних властивостей ґрунту — **гетерогенності та гістерезисності** [4, 12].

На рис. 1 показано результати лабораторного експерименту впливу теплового імпульсу на динаміку капілярного потенціалу ізольованого зразка лесовидної породи сталого вологонасичення. Саме лесовидні суглинки є основною материнською породою, на якій утворено найродючіші чорноземні ґрунти України.

Експеримент був таким: циліндричний зразок лесовидної породи порушеної структури сталої вологості $\theta = \text{const}$ об'ємом 10 дм^3 , ізольований від вологообміну з атмосферою (сполучався для газообміну з нею лише через лабіринт), був оснащений тензіометром. Температуру ґрунту контролювали лабораторними термометрами безпосередньо біля тензіометра. Ґрунт нагрівали на водяній бані від 20 до $60 \text{ }^\circ\text{C}$, що відповідає діапазону природної мінливості температури ґрунту, після чого його повільно охолоджували в атмосфері впродовж кількох діб.

Результатом дії теплового імпульсу (рис. 1,а) став автоколивальний процес

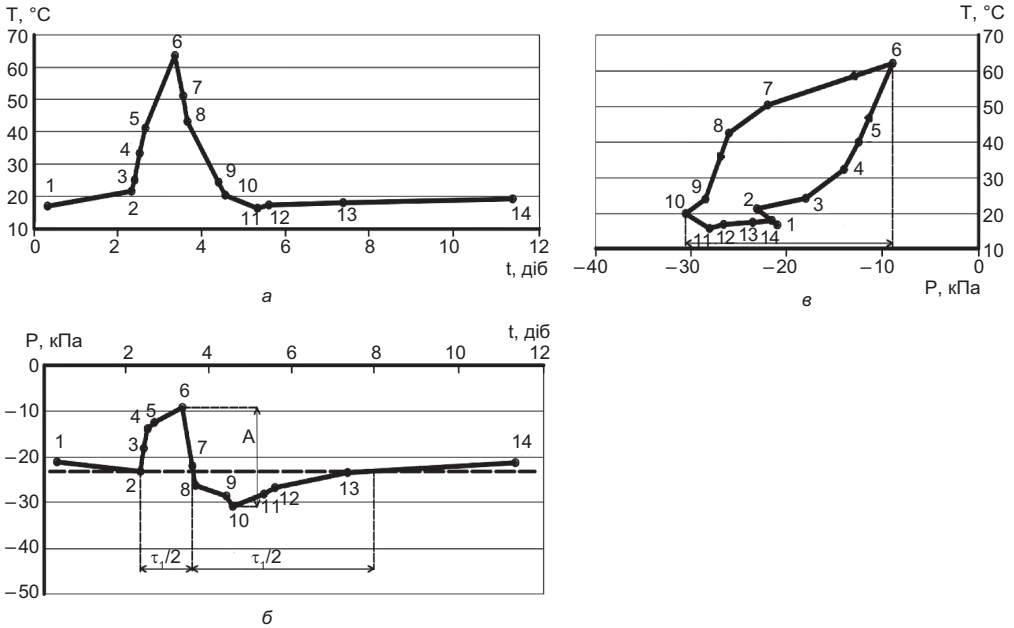


Рис. 1. Динаміка перерозподілу води в поровому просторі лесоподібного суглинку за сталого вологонасичення ($\theta = \text{const}$) під дією температури: а – хронологічні графіки температури зразків T $^{\circ}\text{C} = f(t)$; б – капілярного потенціалу води в ґрунті $P = f(t)$; в – петля температурного гістерезису капілярного потенціалу води $P = f(T$ $^{\circ}\text{C})$

зміни капілярного потенціалу зразка ґрунту за сталого вологонасичення (рис. 1, б). Цей процес можна пояснити істотною зміною інтрагетерогенності відповідно до прийнятої моделі гофрованого еквівалентного капіляра [13]. Оскільки за нагрівання відбувається лавиноподібне закриття рідинними мембранами пор дедалі більшого розміру за рахунок витиснення порового розчину з елементарних пор бульбашками затиснутого повітря, що збільшують об'єм, і зниження поверхневого натягу самого порового розчину зі іростанням температури. Тобто значно зростає інтрагетерогенність зразка ґрунту і його поверхнева енергія. Цей процес залежить від швидкості зростання температури зразка ґрунту, оскільки він породжує протилежний процес — порушення рівноваги і розчинення затиснутого повітря в найдрібніших порах, де $r_a \gg r_{\text{max}}$. Це призводить до першочергового розчинення в цих порах повітря, бо надлишковий газовий тиск у них визначається різницею радіусів кривизни менісків [13]. Зі зниженням швидкості нагрівання дія цих протилежних

процесів урівноважується, капілярний потенціал досягає свого максимуму, і з початком охолодження починається зворотний процес лавиноподібного розкриття пор найбільшого радіусу з відповідним зниженням капілярного потенціалу. Оскільки в найдрібніших порах повітря вже розчинилося, капілярний потенціал проходить початкові значення і продовжує знижуватися до величини, нижчої на 10 кПа. Потім починається напівперіод релаксації — повільного відновлення рівноважного стану. При цьому амплітуда динаміки потенціалу (A) становила 21,5 кПа.

Загалом інтенсивність таких субординаційних гомеостатичних процесів у ґрунті, що виникають за мінливості зовнішніх термодинамічних параметрів, визначається конструкцією термодинамічної системи, тобто структурою порового простору (СПП); наявністю води як «робочого тіла» в системі; інтенсивністю мінливості зовнішніх термодинамічних параметрів.

Добові коливання температури ґрунту можуть сягати глибини 50–70 см. Найві-

рогідніше рослини йшли через адаптацію свого фізіологічного циклу споживання до закономірностей добового циклу динаміки потенціалу вологи в ґрунті під дією добових коливань зовнішніх параметрів.

Консервативна характеристика об'ємної будови ґрунту — його ОГХ. Однак найінформативнішою є петля капілярного гістерезису ОГХ, отримана в режимі швидкої десорбції від ПВ та повільної рівноважної сорбції (рис. 2). Таку петлю слід розглядати як діаграму термодинамічного стану, що поєднує ємнісні властивості реального ґрунту (θ) з капілярним потенціалом (P) і включає область толерантності змінних значень потенціалу вологи відповідно до мінливості зовнішніх збурень. Адже криво швидкої десорбції від ПВ $\theta=f(P)$ отримують за відсутності в ґрунті затиснутого повітря, а рівноважна крива повільної сорбції характеризує вміст затиснутого повітря в розширенні пор за умови рівноваги: $r_{\max} \geq r_a \geq r_{\min}$. Різниця вологонасичення $\Delta\theta$ на гілках сорбції та десорбції за фіксованих значень капілярного потенціалу ($P = \text{const}$) характеризує сумарний об'єм затиснутого повітря в групі пор, де виконуються умови рівноваги. Від капілярного потенціалу за формулою Жюрена нескладно перейти до радіусів пористості: $r \approx \frac{0,15}{P, \text{ см вод.ст.}}$, см. Крива так званої структурної характеристики $V_{3n}=f(P)$, або $V_{3n}=f(r)$ характеризує особливості будови порового простору різних типів ґрунтів, що було експериментально досліджено на сотнях зразків і є важливою їхньою діагностичною ознакою (рис. 2,б). Експериментально підтверджено, що ця крива чутливо реагує на просторові і часові епігенетичні перебудови структури порового простору під дією зміни гомеостазу ґрунту будь-якого походження в масштабі реального часу, забезпечуючи кількісне порівняння структури ґрунту. Точність отримання кривих десорбції та сорбції в повторностях зазвичай становить $\pm 0,5\%$ за вологістю ґрунту. Слід звернути увагу на те, що для точки $P=0$ відповідно до формули Жюрена виникає невизначеність, адже $r = \infty$, тому експериментально криву рівноважної сорбції не доводять до значень $P=0$. Повторну десорбцію починають від значень $P = -0,5 \text{ кПа}$ [20].

Розмах петлі гістерезису за капілярним тиском (ΔP) за сталих значень вологості ($\theta = \text{const}$) інтегрально визначає характерні розміри пористості: r_{\min} на кривій швидкої десорбції та r_{\max} на кривій рівноважної сорбції. Якщо для модельних середовищ співвідношення $n = \frac{r_{\max}}{r_{\min}} = 1,77 \div 1,86$ характеризує елементарну пористість, то в реальному ґрунті, прийнявши за граничне співвідношення $n = \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \geq 2$, перевищення $n > 2$ характеризує вже розвиток макропористості (рис. 2,в). Таке визначення порогових значень макропористості в ґрунтах є більш обґрунтованим, особливо для ґрунтів різної дисперсності, ніж наявна в сучасній агрофізиці практика визначення макропористості за розмірами. Побудова на основі петлі гістерезису графіка значень $n_i = f\left(\frac{r_{\text{сорб}}}{r_{\text{десорб}}}\right)$ характеризує інтегральне відношення $\frac{r_{\max}}{r_{\min}}$ характерних розмірів пористості, на якому однозначно встановлюється пороговий розмір розвитку макропористості за значенням $n=2$. У добре оструктурених ґрунтах, зокрема чорноземних, значення n , за даними випробувань, може набувати кількох десятків. Наведена на рис. 2,а крива швидкої десорбції від ПВ є найінформативнішою. Вважається, що вона отримана за відсутності в ґрунті затиснутого повітря. Будь-які зміни вологонасичення залежно від швидкості процесу відхиляють поточний стан капілярного потенціалу (P_i) від цієї рівноважної кривої вправо за зволоження ґрунту (від точки 1 до точки 2). Коли зволоження припиняється, капілярний потенціал поволі повертається до рівноважної кривої (від точки 2 до точки 3). З початком десорбції залежно від швидкості процесу поточний стан (P_i) відхиляється вліво від рівноважної кривої в бік кривої швидкої десорбції (від точки 3 до точки 4). Призупинення процесу десорбції повертає поточні значення P_i на рівноважну криву (від точки 4 до точки 5). Зміни температури і атмосферного тиску також відхиляють поточні значення P_i від рівноважної кривої сорбції. Відхилення значень вправо від рівноважної кривої відображає напівперіод реакції ґрунту на зовнішні фактори, який є найпродуктивнішим для забезпечення

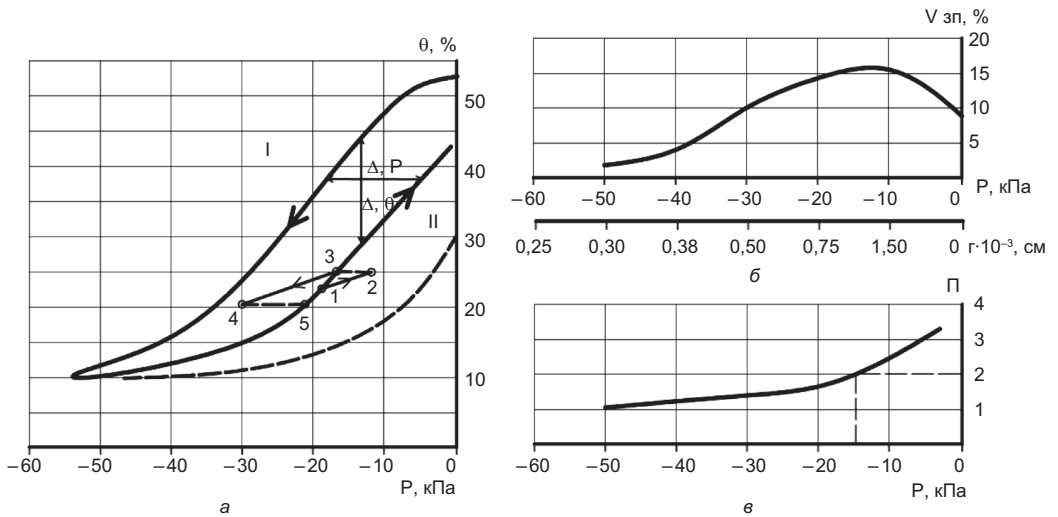


Рис. 2. Експериментальні гідрофізичні випробування зразків ґрунту: а — діаграма гістерезису термодинамічного стану реального ґрунту; б — структурна характеристика порового простору $V_{ан} = f(r)$; в — крива співвідношення характерних розмірів пористості $n = \frac{r_{max}}{r_{min}}$; I — область біфуркації, II — область толерантності

термодинамічної доступності порового розчину, тобто поліпшення продуктивної функції ґрунту. І саме він забезпечує процес нерівномірності цементації мінеральних елементів ґрунту, що формує зародки структурних окремостей. Напівперіод релаксації, що зумовлює відхилення поточних значень P_i вліво від рівноважної кривої, поки не розглядали, це потребує подальших експериментальних досліджень. Від кривої швидкої десорбції до вісі ординат є область (плато) толерантності (II), де можуть бути поточні значення P_i . Вліво від кривої швидкої десорбції та вправо від осі ординат розташована область біфуркації (I), при виході значень P_i до якої можуть відбуватися непередбачувані процеси перебудови або порушення цілісності ґрунту. Вліво від кривої швидкої десорбції висока швидкість десорбції може зменшувати об'єм пор, як це відбувається, скажімо, у межах капілярної облямівки на осушуваних землях за різких коливань РГВ. Вправо від осі ординат P_i набувають

додатних значень, від чого ґрунт може перейти в тіксотропний стан.

Отже, **гомеостаз ґрунту** виконує низку функцій і містить сукупність енерговитратних мікропроцесів у доквіллі макропор із затиснутим повітрям, що виникають під дією циклічно мінливих зовнішніх умов у вигляді локальних відцентрових циркуляційних потоків вологи з фазовими переходами. Вони забезпечують селекцію і зонування в просторі сполук, чутливих до кислотності порового розчину, створюючи оборотну нерівномірну цементацію дисперсних часток, яка під час порушення ґрунту забезпечує розпадання по макропорах і формує структурні окремості різної форми і розміру залежно від взаєморозташування макропор. Гомеостаз реалізує двоедину функцію ґрунту: продуктивну із забезпечення періодично підвищеної в просторі і часі доступності для рослин складових живлення та екологічну — зі збереження і накопичення складових живлення в структурі ґрунтової матриці.

Висновки

Взаємодія ґрунту з термодинамічними факторами доквілля перетворює його

в мікроградієнтну дисипативну структуру з виникненням низки субординаційних

енерговитратних мікропроцесів. Особлива роль у забезпеченні високої енергоефективності ґрунту належить воді як «робочому тілу» в термодинамічній системі ґрунту. Оскільки центрами термодинамічної нерівноважності, кислотними центрами та центрами екотонів стає затиснення в розширеннях порового простору рідинними мембранами повітря, яке починає реагувати на зміну зовнішніх параметрів довкілля.

Основними результатами переважно добової циклічної дії субординаційних процесів стає періодичне локальне підвищення

термодинамічної доступності елементів живлення для рослин і формування нерівномірної в просторі цементації дисперсних часток, що стають зародками структурних окремоствей.

Поняття гомеостазу ґрунту, поєднуючи субординаційні процеси, характеризує рівень енергоспоживання ґрунтом зовнішнього потоку енергії, за рахунок якого відтворюються основні властивості, структурна організація і продуктивна функція. Результатом досліджень стали нові знання і новітні методи діагностування ґрунтів.

Kolomiets S.

Institute of Water Problems and Land Reclamation NAAS, 37, Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine; e-mail: kss2006@ukr.net

Thermodynamic system of soil, its homeostasis, and probable mechanism of structure formation

Goal. To substantiate the dynamic functional model of the thermodynamic system of the soil in interaction with cyclic environmental factors, to disclose internal homeostatic processes, the result of which is the reproduction of the soil structure.

Methods. System analysis, theoretical — to generalize the specifics of soil structure and create its physical model; experimental — for laboratory research. **Results.** Laboratory hydrophysical tests of soil samples of the intact structure revealed the occurrence of hysteresis of water holding capacity of the soil, the value of which can reach 10–20%. The main reason for this phenomenon is the compression of air by liquid membranes in the pore space. The results of the influence of heating the soil sample of constant moisture saturation are presented,

which fix the self-oscillating character of the dynamics of capillary potential in the soil. That testifies to the intra-porous redistribution of moisture and the local transport mechanism of convective transport of the matter. **Conclusions.** The interaction of soil with thermodynamic environmental factors transforms it into a micro gradient dissipative structure with the emergence of many subordinate processes. The main results of their action are the periodic increase of local thermodynamic availability of nutrition for plants and the formation of non-uniform in space cementation of dispersed particles, which become the nuclei of structural units. The concept of soil homeostasis, combining subordination processes, characterizes the level of energy consumption of the external energy flow, due to which the basic properties and structural organization of the soil are reproduced.

Key words: pore space, heterogeneity, hysteresis, thermodynamic system, synergetics, capillary potential, homeostatic processes.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovishnyk202103-02>

Бібліографія

1. *Словник-довідник з агроекології*; за ред. О.І. Фурдичка. Київ: Основа, 2007. 272 с.

2. *Волбуев В.Р.* Екологія почв (очерки). Баку: АН Азерб. ССР, 1963. 260 с.

3. *Добровольський Г.В., Никитин Е.Д.* Экологические функции почвы. Москва: МГУ, 1986. 136 с.

4. *Надточій П.П., Мислива Т.М., Вольвач Ф.В.* Екологія ґрунту: монографія. Житомир: ПП Рута, 2010. 473 с.

5. *Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропогенных взаимодействий*; под ред. В.О. Таргульяна, С.В. Горячкина. Москва: ЛКИ, 2008. 692 с.

6. *Реймерс Н.Ф.* Природопользование. Словарь-справочник. Москва: Мысль, 1990. 650 с.

7. *Шевченко О.Л., Бублясь В.М., Коломієць С.С.* Основи перенесення вологи в зоні аерації: навч. посіб. Київ: Видав.-поліграф. центр «Київський університет», 2014. 270 с.

8. *Корнев В.Г.* Всасывающая сила почвы и принципы системы автоматического орошения почвы. Москва: Издание ГИСХМ, 1925. 30 с.

9. *Перельман А.И.* Биокосные системы Земли. Москва: Наука, 1977. 160 с.

10. *Пригожин И.Р.* Время, структура и флуктуация: Нобелевская лекция по химии 1977 года.

Успехи физических наук, 1980. Т.131. Вып.2. С185–207.

11. *Хакен Г.* Синергетика: иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. Москва: Мир, 1985. 419 с.

12. *Надточій П.П., Вольвач Ф.В., Гермашенко В.Г.* Екологія ґрунту та його забруднення. Київ: Аграрна наука, 1989. 287 с.

13. *Коломієць С.С.* Екологічна характеристика ґрунту. *Вісник аграрної науки*. Київ, 1999. №12. С.9–13.

14. *Федотов Г.Н., Шоба С.А.* Существующие представления о возможных путях формирования гумусовых веществ в почвах. *Почвоведение*. 2013. № 12. С. 1523–1529.

15. *Панасенко О.С.* Гумус структурних агрегатів чорноземів типових природних і агрогенних екосистем: монографія; за ред. В.В. Дегтярьова.

Харків: Майдан, 2015. 192 с.

16. *Дружинин Д.Л., Ванярхо В.Г.* Синергетика и методология системных исследований. *Системные исследования. Методологические проблемы*. Ежегодник. Москва: Наука, 1989. С.283–303.

17. *Добровольский Г.В.* Структурно-функциональная роль почвы в биосфере: монография. Москва: ГЕОС, 1999. 278 с.

18. *Глобус А.М.* Экспериментальная гидрофизика почв. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1969. 355 с.

19. *Лыков А.В.* Теория сушки. Москва: Госэнергоиздат, 1950. 416 с.

20. *Ромащенко М.І., Коломієць С.С., Білоброва А.С.* Система лабораторного діагностування водно-фізичних властивостей ґрунтів. *Меліорація і водне господарство*: Київ, 2019. №2. С. 199–208. doi:10.31073/mivg201902-193