

УДК 631.436.5.6:631.423.2(477.54)

Вплив гідротермічного режиму на міграцію карбонатів кальцію у темно-сірих опідзолених ґрунтах на схилах різних експозицій у Харківській області**В. Б. Соловей^а, О. О. Троценко^б** ✉

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 02.04.2024 Отримано після доопрацювання 14.06.2025 Затверджено до видання 17.06.2025 Доступно онлайн 01.07.2025	Представлено результати дослідження особливостей гідротермічного режиму темно-сірих опідзолених ґрунтів (Luvic Greyzemis Phaeozem (Loamic)) на схилах різної експозиції та сезонної динаміки міграції карбонатів кальцію у їхніх профілях. Дослідження проведено в Харківській області України на чотирьох близько розміщених локаціях: на схилах північно-західної та південно-східної експозицій, а також на рівнинній території та на дні балки. Встановлено, що сезонна глибина залягання карбонатів, як важлива морфологічна характеристика ґрунту, значною мірою залежить від динаміки температури і вмісту вологи у профілі ґрунту, зумовленої експозицією схилів. Вміст вологи у ґрунті визначали термостатно-ваговим методом, проби відбирали у шарі 0–120 см з кроком 10 см. Температуру ґрунту вимірювали цілодобово (з інтервалом 30 хвилин) протягом усього періоду досліджень за допомогою термосенсорів, оснащених цифровими датчиками DS18B20, встановленими з кроком 10 см (до 120 см) і одним датчиком на поверхні ґрунту (0 см). Кількість опадів вимірювали за допомогою опадоміра. Висоту снігового покриву і ступінь покриття фіксували щоденно за наявності снігу. Особливу увагу приділено ролі сезонних змін вологості ґрунту в процесах міграції та осадження карбонатів. Описано механізми вертикальної диференціації вмісту неорганічного вуглецю у ґрунтового профілі у формі карбонатів. Проаналізовано моделі їх міграції та її залежність від кліматичних, гідрологічних і біологічних чинників. Встановлено, що на північно-західному схилі, де тривалий час ґрунт залишається у стані підвищеної вологості, переважає низхідна вертикальна міграція розчинених карбонатів. На південно-східному схилі, в умовах високої інсоляції та інтенсивного випаровування, карбонати концентруються у верхніх горизонтах. На рівнинній ділянці спостерігаються проміжні (відносно схилових) гідротермічні характеристики ґрунту (сезонні коливання температури та вологості), які зумовлюють двоспрямовану міграцію карбонатів — їх вимивання в нижні горизонти восени та взимку і підйом угору навесні. У роботі розглянуто можливу індикаційну роль карбонатних конкрецій у ґрунтового профілі — як свідчення міграційно-аккумулятивних процесів, напрямку та інтенсивності міграції карбонатів, а також зміни гідротермічних умов у процесі ґрунтоутворення. Зазначено, що конкреції можуть мати як реліктове походження від материнської породи, так і бути результатом процесу ґрунтоутворення. За результатами спостережень доведено, що рельєф, гідротермічні умови та біологічна активність є ключовими факторами, які визначають розподіл і динаміку карбонатів у профілях досліджуваних темно-сірих опідзолених ґрунтів.

✉ trea140981@gmail.com

ORCID: ^а 0000-0001-9820-1780, ^б 0009-0007-0317-2907

Форма цитування: Соловей В. Б., Троценко О. О. Вплив гідротермічного режиму на міграцію карбонатів кальцію у темно-сірих опідзолених ґрунтах на схилах різних експозицій у Харківській області. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2025. Вип. 98. С. 36–54. doi: 10.31073/acss98-03

1. Вступ

Вивчення змін гідротермічного режиму та сезонної динаміки глибини залягання карбонатів кальцію у профілях темно-сірих опідзолених ґрунтів на схилах різної експозиції дозволяє виявити морфологічні особливості ґрунтів та чинники, що визначають перерозподіл карбонатів. Схили з різною орієнтацією створюють різні умови для термічних і гідрологічних процесів, що безпосередньо впливають на глибину залягання карбонатів та, відповідно, на морфологічні характеристики ґрунтів. Ці характеристики відображають реакцію ґрунтів на зовнішні чинники, зокрема на зміни кліматичних/погодних умов. Сезонні коливання зволоженості ґрунтів впливають на міграцію карбонатів, їх розчинення та осадження. Ґрунтовий вуглець представлений двома формами: органічним

вуглицем ґрунту (SOC) та неорганічним (SIC) [1]. Неорганічні компоненти включають мінеральні сполуки, що утворюються в результаті геохімічних процесів, пов'язаних з вивітрюванням вихідної породи та подальшим осадженням карбонатів у ґрунтовій товщі [2]. З огляду на походження, SIC поділяється на літогенний та педогенний [3]. Літогенні карбонати успадковані від вихідної породи, тоді як педогенні карбонати утворюються *in situ* у процесі педогенезу. Розмежування цих форм вимагає застосування морфологічних та ізотопних геохімічних методів аналізу [4]. Формування педогенних карбонатів відбувається за таких умов: а) лужна реакція ґрунтового розчину; б) наявність джерела CO₂, головним чином, у вигляді кореневого та мікробного дихання (для вироблення HCO₃⁻); в) доступність кальцію в іонній формі; г) помірний вміст вологи, тобто, утворення карбонату кальцію можливе за наявності у ґрунті води [5].

Фактори, що сприяють накопиченню педогенних карбонатів, включають як зовнішні джерела, такі як еолові пилові відкладення [6] і вплив ґрунтових вод [2], так і участь розчинених бікарбонат-іонів (HCO₃⁻) та іонів Ca²⁺/Mg²⁺, що надходять із ґрунтового розчину або опадів [7, 8] та з материнської породи [6, 9]. Особливе значення у вивченні ґрунту надається вертикальній диференціації SIC, яка визначається комплексом процесів — «осадження–розчинення–повторне осадження» та описується рівнянням: CaCO₃(тв.) + H₂CO₃(водн.) ↔ Ca²⁺ + 2HCO₃⁻ [10]. Накопичення SIC найбільш характерне для посушливих та напівпосушливих зон, де створюються сприятливі умови для збереження карбонатів у ґрунті [10]. Birkeland (1999) та Royer (1999), на яких посиляється Monger (2014) у роботі [5], зазначають, що педогенний карбонат не утворюється в ґрунтовому профілі при кількості опадів понад 500-760 мм. Також, було зазначено, що у посушливих зонах сучасних пустель, де відсутня рослинність, педогенний карбонат не формується. Це свідчить про те, що його утворення почалося лише після еволюції рослинного покриву, завдяки процесам кореневого дихання та виділенню CO₂. Більш сучасне дослідження вказує, що формування педогенних карбонатів можливо у пустелі в умовах тривалої аридності, з епізодичним зволоженням [11], що сприяло розвитку розрідженої рослинності, яка прискорювала накопичення педогенних карбонатів.

У роботі [5] виділяють два режими вуглецевого циклу: в умовах зволоження переважає вимивання розчинених форм у нижні горизонти або в систему підґрунтових вод (ґрунти, що промиваються), тоді як у посушливих регіонах зберігається стійкий запас карбонатів у верхній частині профілю (не промивні ґрунти). Осадження і вилугування карбонатів на глибоких рівнях ґрунту розглянуто [12].

Міграція карбонатів у ґрунтовому профілі може змінюватися з різних причин: низхідними рухами розчинів (*perdescendum*), висхідними рухами розчинів (*perascendum*), за відсутності значного руху (*in situ*) та під впливом біологічних факторів [13]. Однак, як відмічається в роботі [14] ні низхідне, ні висхідне переміщення розчинів не пояснюють повністю утворення карбонатних конкрецій у лесових відкладах. Автори [14] пропонують альтернативну модель — «евапотранспіраційну» (*perevapotranspiration*), де ключову роль відіграють процеси випаровування та транспірації. Модель *perevapotranspiration* пояснює формування вапняних конкрецій (CN — *calcareous nodules*, вміст CaCO₃ у яких коливається в межах 30–70 %) на схилах і біля коренів рослин через випаровування, міграцію розчинених речовин і вплив рослинності. Модель враховує спорадичний розподіл та асиметричні форми CN, а також їх розташування залежно від інтенсивності випаровування та щільності рослинного покриву. Модель також враховує вплив транспірації рослин і випаровування на переміщення карбонатів, що особливо важливо в умовах різної експозиції схилів (наприклад, південні схили характеризуються вищою інтенсивністю

випаровування). У пониженнях рельєфу (улоговини в межах схилу), накопичується більше води (завдяки поверхневому стоку), тому процеси осадження карбонатів можуть відрізнятись. Модель більш ефективна в посушливих регіонах, де випаровування перевищує інфільтрацію. У регіонах із сезонними змінами водного балансу (наприклад, зволоження в період осінь-зима і випаровування влітку) можливі періодичні коливання концентрації карбонатів у поверхневих шарах. Рослинність з високою транспірацією (наприклад, багаторічні трави) може локально підвищувати концентрацію кальцію та сприяти утворенню CN у кореневій зоні. Модель інтегрує концепцію «папілярів стоку» [15], яка розглядає процеси формування поверхневого стоку на схилах. Утворення мікрорельєфу і локального накопичення води, впливає на мікроклімат, вологість і формування CN. Апарат «папілярів стоку», пояснює механізм формування стоку на схилах, особливо в умовах, коли потік води є локальним та розосередженим. Це може пояснити механізм утворення CN, особливо в зонах з характерним для схилів рельєфом та водоутримувальними характеристиками ґрунту.

Опосередкований вплив підвищення температури ґрунту пов'язаний з активністю мікроорганізмів та ферментів, які прискорюють розкладання органічної речовини ґрунту (SOM) та виділення CO₂, що, своєю чергою, впливає на SIC. Вплив температури на біологічні та хімічні процеси в ґрунті має нелінійний характер і залежить від конкретних умов. Тобто, система «бікарбонат-мінерал-дихання-фотосинтез» приводиться в дію сонячною енергією [5], яка впливає на всю систему через термодинамічний показник — температуру повітря і ґрунту. Цей вплив можна розглядати через два основних механізми: біологічну активність та процеси випаровування.

Підвищення температури посилює біологічну активність ґрунту, включаючи активізацію дихання коренів та діяльність мікроорганізмів. Це веде до збільшення концентрації вуглекислого газу в ґрунтовому розчині та більш інтенсивного розчинення карбонатів [16]. Цей процес відповідає правилу Вант-Гоффа, згідно з яким швидкість реакції збільшується в 2-4 рази з підвищенням температури на кожні 10° С. Однак правило Вант-Гоффа справедливе лише в певному діапазоні температур, комфортних для рослин (від +10 до +35° С). Якщо температура підвищується до +40,0–60,0/65,0° С на поверхні, це значно погіршує умови існування для більшості рослин. У таких умовах спостерігаються негативні ефекти: денатурація білків, пригнічення фотосинтезу, посилення випаровування. Зростання рослин зупиняється, а за тривалого впливу таких температур настає їх загибель. Отже, правило Вант-Гоффа діє лише в межах діапазону сприятливих для рослин температур, і воно «не працює» за екстремальних температур (+60,0–65,0°С).

Підвищення температури також сприяє посиленню випаровування вологи із ґрунту та інтенсивності евапотранспірації, що призводить до перенасичення розчинів карбонатами та їх осадження. Однак, екстремальні умови посухи, посилені високими температурами, на думку Prasad (2008) за посиланням Sánchez-Bermúdez та ін. [17] призводять до значного пригнічення інтенсивності кореневого дихання, а також зменшення надходження асимільованого вуглецю до кореневої системи. Зокрема, під час теплового стресу рослини відкривають продихи для зниження температури листя шляхом транспірації. Однак, Reynolds-Henne (2010) за посиланням [17] вважає, що коли тепловий стрес поєднується з посухою, продихи залишаються закритими, що унеможливорює регуляцію температури листя та призводить до її підвищення. Таким чином, вплив температури на процеси евапотранспірації та подальшого осадження карбонатів необхідно аналізувати з урахуванням рівня зволоженості ґрунту.

Мета статті — виявити вплив динаміки температури та вологості ґрунту на сезонну міграцію карбонатів кальцію і пов'язані з нею зміни морфологічних індикаторів темно-сірих опідзолених ґрунтів на плакорі та схилах різної експозиції.

2. Об'єкти і методи досліджень

2.1. Об'єкти

Дослідження проведено у Харківській області, на території, що належить до зони Лісостепу, поблизу села Коротич, на чотирьох формах мезорельєфу, які формовані річковою та балковою системами: на схилах південно-східної та північно-західної експозицій однієї балки, у її днищі та на рівнинній ділянці. Додаткову інформацію про об'єкт дослідження можна отримати з попередньої публікації [18]. Обрані схили класифікували за такими морфологічними характеристиками [19]: крутістю, довжиною та формою.

Схил північно-західної експозиції, за крутістю $2,5\text{--}2,0^\circ$ належить до категорії пологих схилів, прямої форми, середньої довжини. Ґрунт — темно-сірий опідзолений підвищено зволожений важкосуглинковий на лесі (детальний опис профілю представлено у [18]). На схилі зафіксовано горбкуватий нанорельєф, утворений діяльністю землерийних тварин (Рис. 1). Невеликі підвищення діаметром 10–50 см і висотою 20–30 см є переважно мурашниками, утвореними в результаті активної діяльності мурах, а також можуть бути зумовлені ґрунтовими викидами польових мишей (*Microtus* spp.) і, рідше, сліпаків (*Spalax* spp.). Діяльність мешканців ґрунтового середовища — едафобіонтів сприяє формуванню нанорельєфу та додатковому перемішуванню ґрунту. Не всі викиди ґрунту, створені тваринами, закріплюються рослинністю: частина з них розмивається опадами, поступово вирівнюючись. У міжгорбкових пониженнях утворюються мікропротоки, які перерозподіляють поверхневий стік у напрямку балки. Тривалість снігового покриву на схилі Пн-Зх експозиції (покриття 50–100 %) у період 2023–2024 рр. — 55 діб.



Рис. 1. Схил Пн-Зх експозиції, елементи нанорельєфу (фото О. Троценко від 16.03.2025)

Схил південно-східної експозиції має опуклу форму, крутість — $5,0\text{--}4,0^\circ$, середньої довжини. Ґрунт — темно-сірий опідзолений сильноксероморфний (сильнозмитий) важкосуглинковий на лесі. Межа його розповсюдження проходить між нижньою частиною схилу та початком балки, де за напрямком на схід закінчується крутим спуском за 12 м до її днища. Тривалість снігового покриву на схилі Пд-Сх експозиції (покриття 50–100 %) у період 2023–2024 рр. — 48 діб.

Рівнинна ділянка (плакорна експозиція) є відносно рівною горизонтальною частиною земної поверхні, з майже відсутнім ухилом ($\alpha = 1-0^\circ$). Ґрунт — темно-сірий опідзолений важкосуглинковий на лесі. Тривалість утримання снігового покриву на плакорній експозиції (покриття 50–100 %) у період 2023–2024 рр. — 50 діб.

Рельєф відіграє певну роль у вологозабезпеченості схилів, впливаючи також і на формування ґрунтового профілю. Його характеристики — крутість, експозиція та наявність системи плоских знижень — папілярів стоку (ПС) — визначають інтенсивність втрати чи накопичення вологи. Глибина і характер ПС зумовлюють посушливість (ксероморфізм) ґрунтів, яка є їхньою природною, стійкою рисою з моменту утворення [15]. Внаслідок цього ґрунти на схилах мають різні потужність профілю й рівень зволоження, що варіюються залежно від особливостей рельєфу та орієнтації схилів. Відповідно до класифікації [20], ґрунт нижньої частини схилу Пн-Зх експозиції є підвищено зволеним, завдяки додатковому надходженню води з поверхневим стоком, а ґрунт опуклої частини схилу Пд-Сх експозиції, який характеризується погіршеними умовами вологозабезпечення є сильнопосушливим (сильноксероморфним).

Дно балки характеризується плоскою поверхнею, що приймає поверхневий стік під час сніготанення та інтенсивних дощів. Балка виконує функцію дренажу та орографічного перерозподілу тепла й вологи схилової території. Ґрунт — лучний опідзолений намитий важкосуглинковий на делювії. Протягом всього періоду досліджень, у ґрунті на дні балки не було виявлено карбонатних проявів, тому цю форму рельєфу та відповідний ґрунт з аналізу виключено.

На всіх ділянках переважають злаково-різнотравні асоціації (проективне покриття 75–85 %) з домінуванням костриці лучної (*Festuca pratensis*), тонконіга вузьколистого (*Poa angustifolia*), полинці (*Artemisia austriaca*), стоколосу безостого (*Bromus inermis*), шавлії лучної (*Salvia pratensis*) та конюшини лучної (*Trifolium pratense*). Коренева система рослин проникає на глибину 0,8–1,2 м, формуючи біогенні міграційні канали.

Територія досліджень, відповідно до ґрунтово-екологічного районування [20], належить до Підзони зволоженої Лісостепу (ПЛС-5), з гідротермічним коефіцієнтом (ГТКV-IX) у межах 1,00–1,20. У гідротермічному аспекті у періоді травень–липень спостерігаються умови підвищеного зволоження (ГТКV-VII — 1,10–1,20), тоді як у серпні–вересні — характерна недостатня зволоженість (ГТКVIII-IX — 0,81–0,90). За осінньо-зимовий період (листопад–березень) сума опадів у межах ПЛС-5 становить 160–180 мм [20].

Загальним для темно-сірого опідзоленого ґрунту досліджуваних територій є недостатність атмосферного зволоження і мала потужність снігового покриву. Високі температури ґрунту в літній період, при недостатньому зволоженні, призводять до його висушення [21]. Основне промочування ґрунту відбувається в осінньо-зимовий період і охоплює весь профіль, в окремі роки — глибше, тоді як у літній період зволоження розповсюджується у межах 0–40/50 см. Ґрунти тривалий час перебувають у стані позитивних температур (вище 0°). Період з температурами вище за 0°C значно перевищує період з температурою нижче 0°C . Карбонати у ґрунтових профілях мають педогенне походження; досліджувані ґрунти сформовані на лесових відкладах, за участю кореневої системи рослинності (деревної і трав'яної), на що вказує різке зниження вмісту гумусу з глибиною (з 50 см) [18].

2.2. Методи досліджень

Ґрунтові розрізи на майданчиках дослідження було закладено 24 квітня 2023 р. з прив'язкою до географічних координат за допомогою супутникового геопозиціонування (GPS, датум WGS84). Профілі ґрунтів було діагностовано, а морфологічні та генетичні особливості описано в польових умовах відповідно до ДСТУ 7535:2014¹. Опис будови профілю проводили з урахуванням традиційно застосовуваних морфологічних характеристик ґрунту [22]. Для відбирання проб ґрунту застосовували методичні вказівки відповідно до ДСТУ 4287:2004². Проби ґрунту для визначення вмісту польової вологи згідно з ДСТУ ISO 11465:2001³ були відібрані в 2023 р.: 22.06, 04.08 і 18.11; та у 2024 році: 14.03, 14.04, 03.07, 22.07, 04.10 і 17.11.

Одночасно з відбиранням проб ґрунту на визначення вмісту польової вологи проводили діагностування характеру скипання карбонатів кальцію від 10 % HCl, користуючись методом, описаним в Інструкції ФАО [19, с. 40]. Характер скипання ідентифікували критеріями, наданими в таблиці 1.

Таблиця 1

Метод польового визначення вмісту карбонатів у ґрунті за дією 10 % HCl (за [19, с. 40])

Характеристика ґрунту		Вміст карбонатів, %	Ознаки реакції ґрунту на 10 % HCl*
Карбонати відсутні	N	0	Відсутність видимого або чутного скипання
Слабокарбонатний	SL	0-2	Чутне скипання але не видиме
Середньокарбонатний	MO	2-10	Видиме скипання
Сильнокарбонатний	ST	10-25	Сильне видиме скипання. Бульбашки утворюють слабку піну
Дуже сильнокарбонатний	EX	> 25	Бурна реакція. Миттєво утворюється густа піна

*Примітка — опис ознак наближено до оригіналу [19]

Проби ґрунту для визначення рН водного згідно з ДСТУ 8346:2015⁴ були відібрані 24.04.2023 та 14.04.2024 рр. Проби ґрунту для визначення вмісту обмінних катіонів Ca, Mg, Na, K, згідно з ДСТУ 7861:2015⁵, були відібрані 24.04.2023 р.

Вимірювання температури ґрунту на різних глибинах і на поверхні проводили цілодобово протягом усього періоду досліджень за допомогою термосенсорів, розміщених на плакорі, у нижній частині схилу Пн-Зх експозиції та на опуклій частині схилу Пд-Сх експозиції. Кожен сенсор оснащений 12 цифровими датчиками температури DS18B20 (з точністю вимірювання $\pm 0,5^\circ\text{C}$ у діапазоні від -55 до $+125^\circ\text{C}$), розташованими вертикально на інструменті через кожні 10 см (глибини вимірювань від 10 до 120 см), а також одним датчиком температури DS18B20 на гнучкому дроті для вимірювання температури на поверхні ґрунту (0 см). Вимірювання здійснювали з інтервалом 30 хвилин

¹ ДСТУ 7535:2014. Якість ґрунту. Морфолого-генетичний профіль. Правила та порядок описування. [Чинний від 01.04.2015]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2015.

² ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб : [Чинний від 2004-30-04] Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 5 с.

³ ДСТУ ISO 11465:2001. Якість ґрунту. Визначення сухої речовини та вологості за масою. Гравіметричний метод: [Чинний від 2001-28-12] Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 7 с.

⁴ ДСТУ 8346:2015⁴ Якість ґрунту. Методи визначення питомої електропровідності, рН і щільного залишку водної витяжки : [Чинний від 2015-21-08] Київ : ДП «УкрНДНЦ» України, 2017. 7 с.

⁵ ДСТУ 7861:2015⁵ Якість ґрунту. Визначення обмінних кальцію, магнію, натрію і калію в ґрунті за Шолленбергером в модифікації ННЦ ІГА імені О. Н. Соколовського : Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 21 с.

упродовж доби, що детально описано в попередній публікації [21]. Вимірювання температури повітря здійснювали цифровими датчиками температури DS18B20, розміщеними в психрометричній будці на висоті 200 см над поверхнею ґрунту.

Вимірювання кількості атмосферних опадів проводили протягом усього періоду досліджень за допомогою опадоміра (циліндричне відро з прийомною площею 200 см² та мірний стакан на 100 поділок). Кількість опадів у міліметрах визначали за шкалою стакана з урахуванням поправки ($\pm 0,2$ мм). Спостереження за сніговим покривом проводили щоденно за наявності снігу. Ступінь покриття оцінювали з фіксованої точки огляду за 10-бальною шкалою, характер залягання — візуально за стандартною класифікацією. Висоту снігу вимірювали з точністю до 1 см, визначаючи середнє значення по трьох рейках, відповідно до Настанови гідрометеорологічним станціям і постам [24].

3. Результати досліджень

3.1. Ґрунт на схилі північно-західної експозиції

Глибини скипання карбонатів від дії 10 % HCl наведено у таблиці 2. Під час закладення ґрунтового розрізу (24.04.2023) карбонати, у будь-якій формі, не було виявлено у шарі 0–120 см. Упродовж 2023 р. у ґрунті фіксували скипання карбонатів від дії 10 % HCl і за характером реакції (див. табл. 1), виявили середню карбонатність ґрунту — МО [19].

Таблиця 2

Сезонна динаміка глибини скипання карбонатів у ґрунті на схилі північно-західної експозиції (досліджуваний шар 0–120 см)

2023 рік					2024 рік				
24.04.	22.06.	04.08.	18.11.	14.03.	14.04.	03.07.	22.07.	04.10.	17.11.
<i>Верхня межа скипання, см</i>									
N	85 (MO)	20 і 80 (MO)	100 (MO)	117 (SL)	N	N	N	N	N

Примітка: N — Видимі і чутні ознаки скипання відсутні

Середній вміст води у профілі (Рис. 2) та середні температури у ґрунті в шарі 10–120 см (Табл. 3) протягом періоду спостережень 2023 р. були оптимальними для взаємодії біологічних (евапотранспірація), фізичних (міграція розчинів) та хімічних (розчинення й осадження солей) процесів. Високі температури поверхні ґрунту ($32,0\text{--}35,0^\circ\text{C}$) створювали сприятливі умови для інтенсивного випаровування води. Однак промочування ґрунту (Табл. 4) через періодичні атмосферні опади (367 мм випало в період з 24.04 до 18.11.2023), дозволило рослинам активно евапотранспірувати, що призвело до коливання міграційної лінії карбонатів у ґрунтовому профілі і скипання (4.08.2023) на двох рівнях — 20 см (верхній горизонт, де переважали процеси випаровування та евапотранспірації) та 80 см (вертикальне переміщення розчинів); і на 100 см (18.11.2023) — глибинний горизонт, куди відбулося вертикальне переміщення розчинів. Таким чином, поєднання високих температур і достатнього зволоження забезпечило активну участь рослин у перерозподілі води та розчинених карбонатів, що призвело до певних змін у їх міграції.

Відсутність карбонатної лінії у досліджуваному профілі у період із квітня до листопада 2024 р. (Табл. 2) корелює з високими температурами поверхні ґрунту (Рис. 3) та дефіцитом води (Рис. 2, Табл. 4). Ці умови призводять до пригнічення кореневого дихання [17] і, як наслідок, зниження продукування CO_2 рослинами, необхідного для утворення вугільної кислоти (H_2CO_3) та розчинення карбонату кальцію, що припиняє його міграцію.

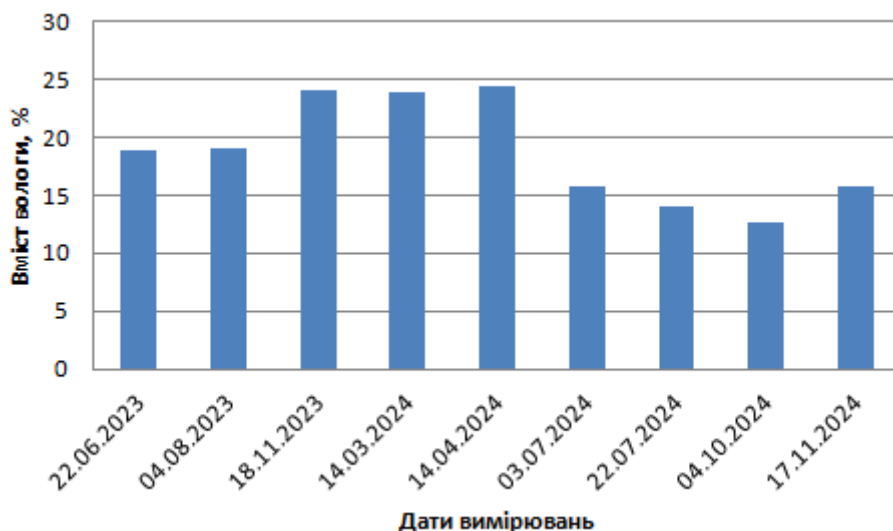


Рис. 2. Динаміка вмісту польової вологи у ґрунті на схилі північно-західної експозиції (середнє значення у шарі 0–120 см)

Таблиця 3

Температура у профілі і на поверхні ґрунту на схилі північно-західної експозиції

Глибина, см	Температура, °C					
	Середня	Max	Min	Середня	Max	Min
	22.06.2023–04.08.2023			05.08.2023–18.11.2023		
0	24,7	32,6	17,4	16,4	35,2	4,4
10-120	18,1	28,7	14,9	15,5	26,4	3,5

14 березня 2024 р. осадження CaCO_3 було зафіксовано вже на глибині 117 см (див. табл. 2), що зумовлено інфільтрацією опадів (220 мм) холодного періоду (Табл. 4), яка сприяла ще більшому вимиванню карбонатів. Порівняно з рівнем, зафіксованим 18 листопада 2023 р., глибина карбонатної межі знизилася на 17 см. Діагностика скипання на цей момент відповідала слабокарбонатному типу (0–2 %), за якого реакція на HCl була чутною, але візуально не проявлялася (SL).

Таблиця 4

Кількість опадів у досліджуваний період

Період	Сума опадів, мм
24.04.2023-18.11.2023	367
19.11.2023-14.03.2024	220
15.03.2024-17.11.2024	148

У період від 14 квітня до 17 листопада 2024 р. лінію карбонатів не виявлено (не скипали) у досліджуваному шарі (0–120 см).

Високі температури ґрунту протягом доби – зокрема, дані за 17.07.2024 р. (Рис. 3), свідчать про 6–10 годин із температурами 40–60°С на поверхні ґрунту. І це, у поєднанні з мінімальною кількістю опадів (див. табл. 4), призвело до висихання ґрунту (Рис. 2) на глибину кореневмісного шару.

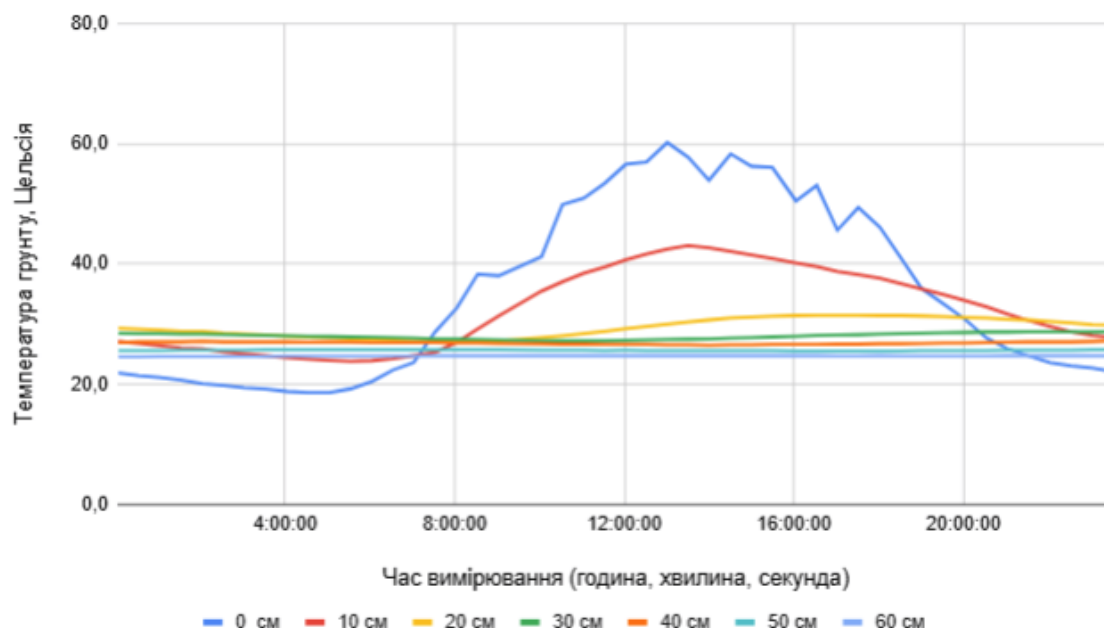


Рис. 3. Фрагмент запису значень температури ґрунту на схилі північно-західної експозиції 17.07.2024

Дефіцит вологи спричиняє низку фізіологічних змін у рослин, що знижує активність кореневої системи. За даними Prasad (2008) та Reynolds-Henne (2010), наведеними у роботі Sánchez-Bermúdez та ін. [17], це, зокрема, призводить до пригнічення кореневого дихання, зменшення надходження асимілятів до коренів (тобто зниження кількості органічних речовин — продуктів фотосинтезу, що транспортуються з листків до кореневої системи), а також до порушення температурної регуляції рослини внаслідок закриття продихів під час водного стресу (дефіциту вологи). Одним із наслідків цього процесу є зниження евапотранспірації. У результаті, у ґрунтовому профілі (у шарі 0–120 см) не спостерігали скипання карбонатів кальцію, що свідчить про припинення їх міграції в умовах високої температури та нестачі вологи, яка є необхідною для їх розчинення і переміщення у ґрунті. Таким чином, температурний і водний режими визначають інтенсивність міграції карбонатів і формування відповідних морфологічних ознак у ґрунтовому профілі.

Рівень рН змінюється залежно від глибини і періоду спостережень (Рис. 4). У квітні 2023 рН коливався від 6,8 до 7,2, що вказує на нейтральні та слаболужні умови. До квітня 2024 рН стабілізувався на рівні 7,2 майже у всіх горизонтах, що відповідає нейтральному середовищу. Нейтральний рівень рН сприяє утриманню кальцію та магнію у ґрунтовому комплексі, оскільки в таких умовах розчинність карбонатів (CaCO_3) знижується, що обмежує їх міграцію та сприяє осадженню, особливо за умов висихання ґрунту [8].

Слід зазначити, що нейтральна реакція ґрунтового середовища, особливо горизонту HE, є своєрідним наслідком кліматичних змін. За результатами великомасштабних обстежень 1957–1961 рр.⁶, реакція ґрунтового середовища верхнього горизонту темно-сірих опідзолених ґрунтів у межах території досліджень була, переважно, слабокислою або близькою до нейтральної (рНводн в межах 5,8–6,5).

⁶ Архівні матеріали великомасштабних обстежень ґрунтового покриття 1957–1961 рр. Фонд ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського» (Харків, Україна).

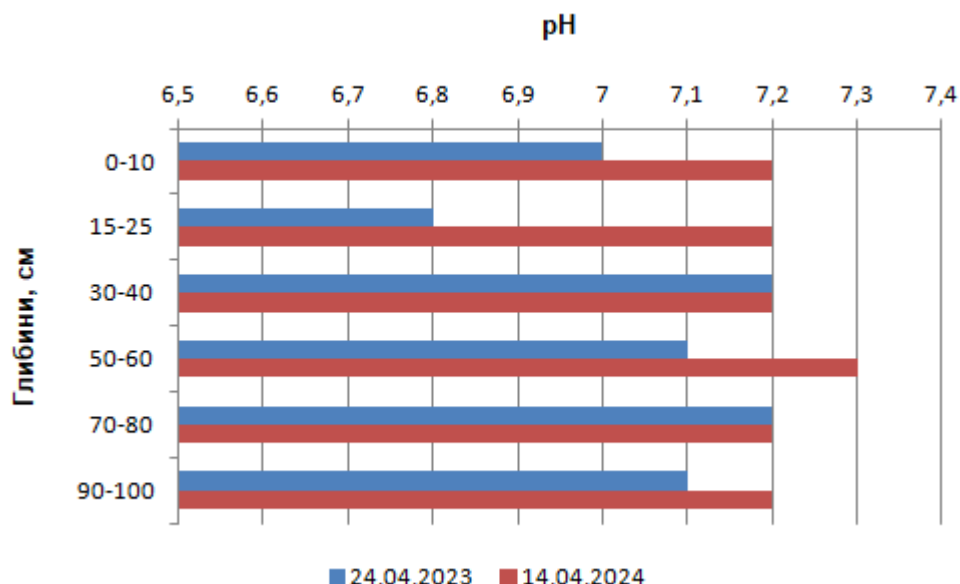


Рис. 4. Рівень рНводн у профілі ґрунту на схилі північно-західної експозиції

Основними обмінними катіонами в досліджуваному ґрунті є Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} та K^{+} і їхня концентрація змінюється залежно від глибини (Табл. 5).

Таблиця 5

Розподіл обмінних катіонів у профілі ґрунту на схилі Пн-Зх експозиції (24.04.2023)

Шар ґрунту, см	Вміст обмінних катіонів, ммоль/100 г				
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ
0-10	18,1	3,6	0,2	0,5	22,4
15-25	18,5	3,6	0,1	0,3	22,5
30-40	18,5	3,2	0,1	0,3	22,1
50-60	18,2	2,7	0,1	0,1	21,1
70-80	19,1	2,5	0,2	0,4	22,2
90-100	19,4	2,4	0,1	0,3	22,2

Кальцій (Ca^{2+}) є домінуючим катіоном у ґрунтовому профілі, його вміст залишається стабільно високим у межах досліджуваного профілю. Магній (Mg^{2+}) демонструє тенденцію до зниження концентрації з глибиною, особливо в шарі 70–100 см, що може бути пов'язано з його слабшим вимиванням у нижні шари порівняно з Ca^{2+} . Натрій (Na^{+}) та калій (K^{+}) містяться у значно нижчих концентраціях, ніж Ca^{2+} та Mg^{2+} . При цьому концентрація K^{+} дещо вища у верхньому шарі (0–10 см), що може бути пов'язано з біологічною активністю, зокрема процесами розкладання органічних решток.

Ґрунт на північно-західному схилі характеризується гідротермічним режимом, який зумовлений меншою інсоляцією та більшою вологістю. Це сприяє більш стабільному розподілу карбонатів у ґрунтовому профілі. Наявність карбонатів у ґрунтовому розчині залежить від сезонних коливань вологості. У періоди помірного зволоження скипання спостерігається на рівні розміщення основної маси коренів рослин, тоді як у періоди промочування всього профілю ґрунту відбувається вимивання розчинів за межі досліджуваної частини профілю.

Загальний висновок про ґрунт на схилі північно-західної експозиції (її нижньої частини) є таким: 1. Нестабільність глибини лінії скипання карбонатів та відсутність її рано навесні свідчить про переважання низхідних рухів води у холодний період. 2. Підлучення ґрунтових розчинів до нейтральних значень у теплий період зумовлюється посиленням евапотранспіраційних витрат води, особливо в умовах кліматичних змін.

3.2. Ґрунт на схилі південно-східної експозиції

На всіх етапах дослідження ґрунт на схилі південно-східної експозиції (опукла частина) демонстрував скипання з поверхні при різних рівнях вмісту польової вологи (Рис. 5) у всі сезони. Спостерігали бурну реакцію від 10 % HCl та миттєве утворення товстої пінистої плівки, що свідчить про дуже високий вміст карбонатів.



Рис. 5. Динаміка вмісту вологи у ґрунті на схилі Пд-Сх експозиції (середнє значення у шарі 0–120 см)

Особливу увагу було приділено зимовому періоду, коли температура ґрунту та повітря була нижче 0° С, рисунок 6 (а, б).



а) 05.02.25



б) 17.02.2025

Погодні умови:

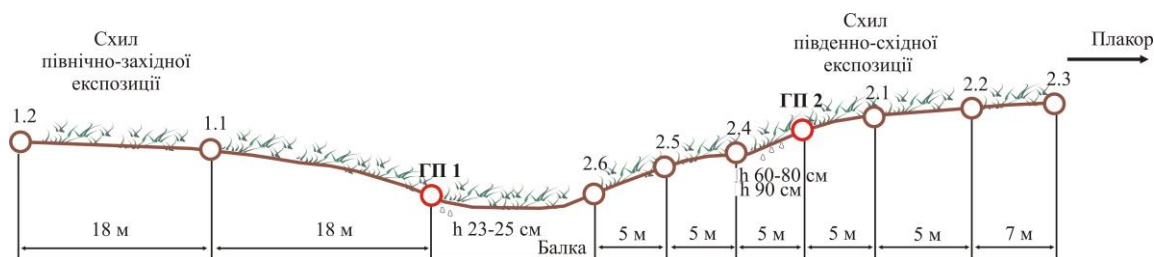
Температура повітря -1,2° С. Температура ґрунту: на поверхні (0 см) -1,1° С; на глибинах 5 см — +0,6° С, 10 см — +1,2° С. Висота снігового покриву — 2 см.

Температура повітря -5,5° С. Температура ґрунту: на поверхні (0 см) -1,2° С; на глибинах 5 см — -1,3° С, 10 см — -0,9° С. Висота снігового покриву — 5 см.

Рис. 6. Бурхливе скипання карбонатів у пробі з поверхні ґрунту (фото О. Троценко)

Всесезонна присутність карбонатів у поверхневому шарі ґрунту, включаючи періоди з температурами нижче 0°С (що зафіксовано на фото, рис. 6), коли біологічна активність і низхідна міграція розчинів мінімальні, узгоджується з моделлю "реєвапотранспірації" [14], яка пояснює акумуляцію карбонатів у верхніх горизонтах переважно завдяки висхідним потокам ґрунтового розчину під дією евапотранспірації, що є домінуючим процесом на схилах південної експозиції, які отримують додаткову інсоляцію, в умовах дефіциту вологи.

Ґрунт є короткопрофільним, сформованим на лесових відкладах [18], з наявністю карбонатів у вигляді прожилок та псевдоміцелію, останній є міграційною формою. Материнська порода (Рк 35–70 см) — палевий важкосуглинковий карбонатний лес (карбонати у вигляді прожилок і псевдоміцелію). Враховуючи ці спостереження, було закладено лінію трансект для більш детального вивчення розподілу карбонатів по профілю; лінія трансект схематично зображена на рисунку 7.



Позначення: ГП — ґрунтовий профіль; h — глибина залягання карбонатних конкрецій; 1.1...2.6 — точки відбирання проб.

Рис. 7. Схематичне зображення лінії трансект на схилах Пн-Зх та Пд-Сх експозицій

Згідно з даними додаткового обстеження (відбирання проб методом буріння), проведеного 03.07.2024, констатовано, що карбонати розподілені нерівномірно. На схилі Пд-Сх експозиції у точках ГП2, 2.1, 2.2, 2.4 та 2.5 скипання від 10 % НСІ фіксували з поверхні, тоді як у точці 2.3 реакція починалася лише з глибини 40 см, а у точці 2.6 карбонати взагалі не виявлено.

Під час польових досліджень було зафіксовано наявність поодиноких карбонатних конкрецій на глибинах 23–25, 60, 80 і 90 см. Як правило, їх вважають реліковими, успадкованими від материнської породи. На нашу думку, сформовану на підставі досліджень в інших локаціях, це пов'язано з літогранулометричною неоднорідністю лесової товщі. Неоднорідність може бути пояснена порівняно неглибоким підстиленням третинними пісками, що властиве відрогам (відгалуженням) Середньоруської височини, до яких належить і місце досліджень. У результаті на місці підстилення може, періодично, формуватися прошарок «капілярно-підвішеної вологи» з утворенням карбонатних конкрецій як наслідку тимчасового гідроморфізму. За відсутності пісків може бути підстилення глинами, тобто наявність водонепроникного шару, на якому можливе утворення верховодки. Це також зумовлює формування карбонатних конкрецій. В окремих випадках можливе формування конкрецій над похованими ґрунтами. У будь-якому разі наявність таких карбонатних артефактів може бути індикатором тимчасового гідроморфізму як у минулому, так і в рецентних умовах ґрунтоутворення.

Карбонатні конкреції морфологічно є різними, як це видно на рисунку 8. Новоутворення у ґрунті на Пд-Сх схилі за розмірами від 5–7 до 10–11 мм, округлої форми, білого або жовто-білого кольору. Спільні риси — твердість та щільність — розкришити можливо лише за допомогою додаткових інструментів; скипають від 10 % НСІ.



Рис. 8. Карбонатні конкреції у ґрунті на схилі Пд-Сх експозиції (фото О. Троценко)

Результати вимірювання рН (Табл. 6) свідчать про слаболужні та лужні умови, характерні для карбонатних ґрунтів. У квітні 2023 р. рН у верхніх горизонтах становив 7,6–8,1 із зростанням з глибиною. У квітні 2024 р. відмічено підвищення рН у всьому профілі до 8,0–8,6, тобто посилення лужності. Це може бути пов'язано з інтенсивним випаровуванням, що разом із сезонним висушуванням ґрунту, та підвищенням рН сприяє осадженню CaCO_3 [8].

Таблиця 6

Рівень рН_{водн.} та вміст одновалентних обмінних катіонів у ґрунті на схилі Пд-Сх експозиції

Шар ґрунту, см	рН водний		Вміст обмінних катіонів, ммоль/100 г	
			Na ⁺	K ⁺
	Дата відбирання проб			
	24.04.2023	14.04.2024	24.04.2023	
0-10	7,6	8,0	0,1	0,3
15-25	7,8	8,3	0,2	0,4
30-40	7,9	8,3	0,2	0,4
50-60	8,1	8,4	0,2	0,4
70-80	-	8,6	-	-
90-100	-	8,6	-	-

Концентрація Na⁺ є низькою (0,1–0,2 ммоль/100 г). Вміст K⁺ становив 0,3–0,4 ммоль/100 г (Табл. 6).

Лужні умови (рН 7,6–8,6) сприяють осадженню карбонатів (CaCO_3) і зменшують присутність кальцію та магнію у ґрунтовому розчині. Підвищення рН із глибиною (до 8,6 на глибині 70–100 см) вказує на можливе накопичення карбонатів у цій частині профілю.

Ґрунт на південно-східному схилі відрізняється більш помітними гідротермічними контрастами через інтенсивну інсоляцію та випаровування, порівняно з Пн-Зх схилом. Це призводить до швидкого висихання верхніх горизонтів. Таким чином, розподіл карбонатів у ґрунтовому профілі залежить від поєднання низки факторів, таких як мікрокліматичні умови (температура, випаровування), геоморфологія схилу (експозиція, опуклість) та властивості материнської породи (лесові відклади). Нерівномірний розподіл карбонатів свідчить про певну роль вертикальної міграції розчинів та впливу рослинного покриву на процеси утворення карбонатів.

Загальний висновок про ґрунт на схилі південно-східної експозиції (її опуклої частини) такий: 1) Ґрунт короткопрофільний, сформований на лесових відкладах. Морфологічні ознаки вказують на наявність карбонатів у вигляді прожилок і псевдоміцелію, що свідчить про присутність як стійких, так і міграційних форм карбонатних утворень. 2) Упродовж усього періоду досліджень, незалежно від сезонних і погодних умов, спостерігалось бурне скипання карбонатів з поверхні, що свідчить про ксероморфність ґрунту та можливий вплив ерозійних процесів, характерних для опуклих елементів рельєфу. 3) Дані, отримані за закладеною лінією трансект, засвідчують просторову мінливість глибини початку (верхньої межі) скипання карбонатів, тобто про неоднорідність їх залягання по схилу.

3.3. Ґрунт на рівнинній території

Ґрунт плакорної експозиції відповідає класичному уявленню про темно-сірі ґрунти опідзоленого ряду [25–27], за винятком більш лужної реакції ґрунтового розчину порівняно з даними минулого сторіччя. Морфологічний аналіз ґрунтового профілю показав наявність карбонатів у міграційній формі (псевдоміцелій) на глибині 50–70 см (Ihp/k) та у вигляді прожилок у материнській породі на глибині 70–95 см (P(i)k) [18]. Карбонатних конкрецій у профілі зафіксовано не було, проте не виключена їх наявність у підґрунті.

Вміст карбонатів у ґрунті оцінюється як середній (2–10 %), що характеризується помірним скипанням (МО) упродовж всього періоду спостережень (Рис. 9).

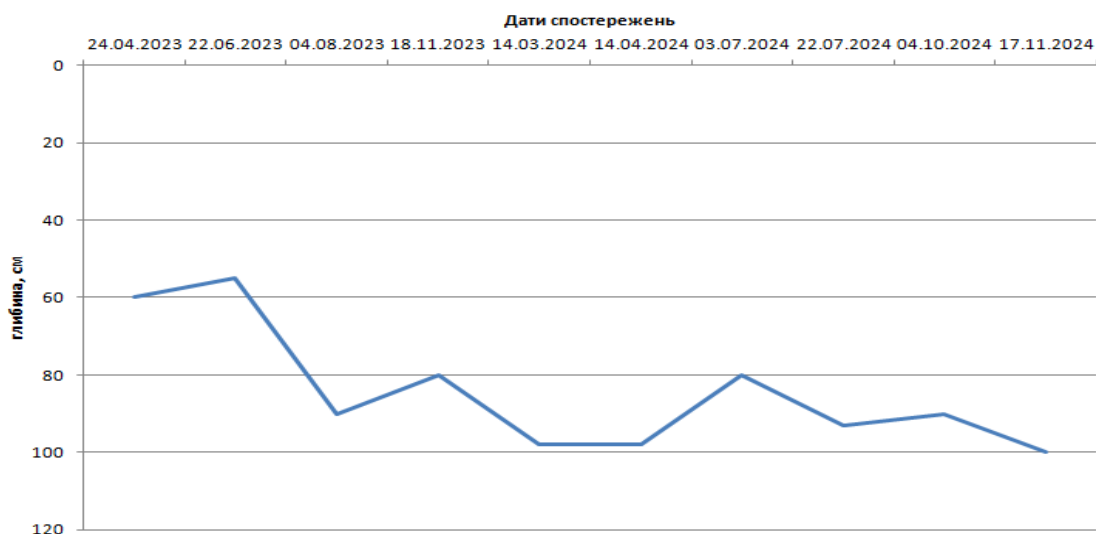


Рис. 9. Сезонна міграція карбонату кальцію по профілю ґрунту на рівнинній території

Сезонна динаміка розподілу карбонатів по профілю зумовлена змінами вологості та температури ґрунту. Вимивання CaCO_3 за межі морфологічних горизонтів вниз по профілю, зафіксоване 14.03.2024, пояснюється глибоким промочуванням ґрунту в осінньо-зимовий період (Рис. 10). Підйом «лінії скипання» до 80 см (03.07.2024) пов'язаний з весняним періодом, коли достатня вологість та комфортні температурні умови (на поверхні — $20,8^\circ\text{C}$, на глибині 5–80 см — $16,8^\circ\text{C}$) сприяли активній вегетації рослин та, як наслідок, вертикальній міграції карбонатів. Такі умови є оптимальними для розвитку кореневої системи та активності ґрунтової біоти [5, 16], що збільшує парціальний

тиск CO_2 у ґрунті, сприяє розчиненню карбонатів та їх вертикальній міграції з висхідними або низхідними потоками води.

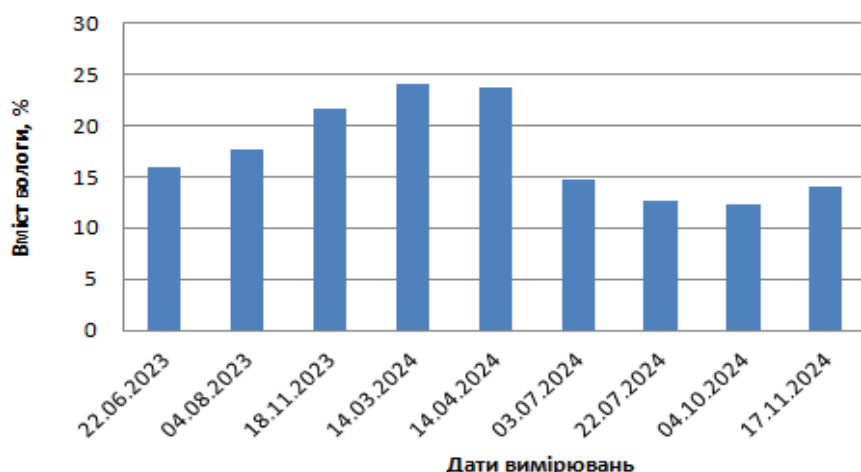


Рис. 10. Вміст польової води (%) у ґрунті на рівнинній території (середнє значення у шарі 0–120 см)

Верхня межа скипання на глибинах 93 (22.07.2024), 90 (04.10.2024) і 100 см (17.11.2024) (див. рис. 8) зумовлена наявністю карбонатних прожилок у материнській породі.

Рівень рН ґрунту на плакорній ділянці варіював в межах 6,8–8,0, що свідчить про нейтральні та слаболужні умови (Рис.11).

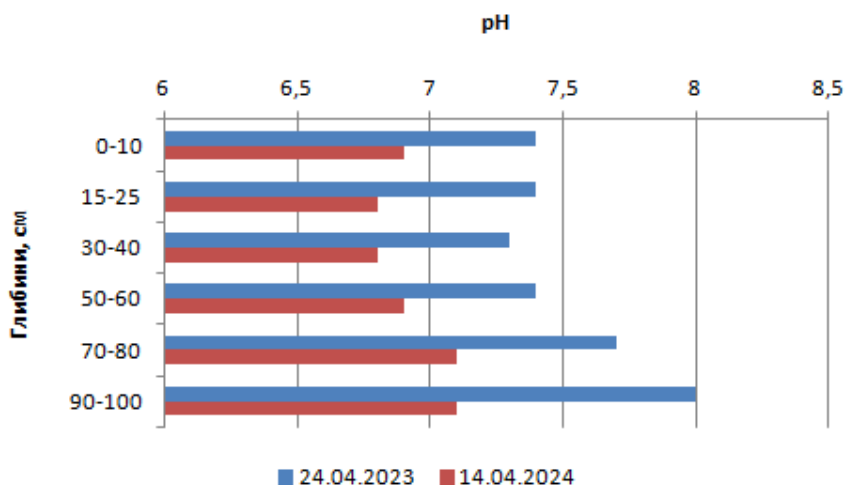


Рис. 11. Рівень рНводн. у ґрунті на рівнинній території

У квітні 2023 р. рН у верхніх горизонтах був стабільним (7,3–7,4) зі зростанням до 7,7–8,0 на глибині 70–100 см, що пов'язано з наявністю карбонатів у вигляді псевдоміцелію та прожилок. У квітні 2024 р. спостерігали зниження рН до 6,8–7,1 на більшості глибин, що свідчить про зменшення лужності ґрунтового розчину, через інтенсивне вимивання карбонатів у попередній період. Проте значення рН перевищують властиві верхнім горизонтам темно-сірих опідзолених ґрунтів, зафіксовані у минулому сторіччі. Як було відзначено для ґрунтів схилу північно-західної експозиції, це зумовлено кліматичними змінами зі збільшенням евапотранспіраційних витрат води.

Таким чином, динаміка розподілу карбонатів у профілі ґрунту на плакорній ділянці визначається комплексом факторів: сезонними змінами вологості, температурним режимом, вегетацією рослин та морфологічними особливостями ґрунту. Нейтральні та слаболужні умови сприяють утриманню карбонатів у

ґрунтовому комплексі, але їх міграція залежить від гідротермічних умов та біологічної активності.

Обмінний комплекс ґрунту представлений катіонами Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} та K^{+} (Табл. 7), концентрація яких змінюється залежно від глибини. Кальцій (Ca^{2+}) є основним катіоном у ґрунтовому обмінному комплексі з найвищим умістом на глибині 30–40 см, що пов'язано з підйомом карбонатів через транспірацію рослин (лінія скипання 55–60 см, квітень-липень 2023 р.). Концентрація магнію (Mg^{2+}) зменшується з глибиною, зокрема на рівнях 50–60 см. Концентрація натрію (Na^{+}) є низькою, з найбільшим умістом у шарі 30–40 см. Калій (K^{+}) рівномірно розподілений по профілю ґрунту.

Таблиця 7

Розподіл обмінних катіонів у профілі ґрунту на рівнинній території (24.04.2023)

Шар ґрунту, см	Вміст обмінних катіонів, ммоль/100 г				
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Сума
0-10	17,2	3,6	0,1	0,4	21,3
15-25	16,7	3,1	0,1	0,4	20,3
30-40	18,6	2,9	0,4	0,4	22,3
50-60	17,7	2,3	0,1	0,4	20,5
70-80	-	-	0,1	0,4	-
90-100	-	-	0,2	0,4	-

Ґрунт рівнинної території демонструє проміжні гідротермічні умови між Пн-Зх та Пд-Сх схилами. Тут спостерігається чіткий вплив сезонних змін вологості: в осінньо-зимовий період глибоке промочування сприяє вимиванню карбонатів у нижні горизонти, тоді як у весняний період достатня вологість та комфортні температури (16,8–20,8° С) активізують міграцію карбонатів у верхні шари. Нейтральний та слаболужний рН (6,8–8,0) сприяє утриманню карбонатів у ґрунті, але їх розподіл у профілі залежить від інтенсивності вимивання та випаровування.

Загальні висновки щодо ґрунту рівнинної території: 1. Морфолого-генетична будова профілю відповідає класичним уявленням, за винятком міграції лінії скипання у річному і сезонному циклах. 2. Підвищена лужність верхнього горизонту є наслідком кліматичних змін зі збільшенням інтенсивності міграційно-пульсаційного режиму карбонатів кальцію. 3. Міграційна зона знаходиться у середній та нижній частинах профілю, в межах 55–100 см, міграція залежить від рівня зволоженості ґрунту та транспірації. 4. Карбонатні новоутворення не виявлено.

Результати дослідження демонструють, що вплив термічного режиму на міграцію карбонатів кальцію (глибина карбонатної лінії, наявність конкрецій) є опосередкованим. Температура регулює інтенсивність евапотранспірації, що визначає напрямок руху (висхідний або низхідний) та концентрацію ґрунтових розчинів [14]. Також, температура зумовлює біологічну активність рослин, функціонування яких впливає на надходження CO_2 і, отже, на розчинення карбонатів. Таким чином, припинення розчинення карбонатів в умовах теплового та водного стресу є фактором, який зупиняє їх міграцію у профілі.

4. Висновки за результатами досліджень

Встановлено, що рельєф впливає на гідротермічний режим ґрунтів і визначає розподіл та міграцію карбонатів, що, своєю чергою, визначає специфіку морфологічної будови ґрунтового профілю. Коливання верхньої межі закипання карбонатів підтверджує динамічність процесів переміщення розчинів у ґрунті.

Сезонні зміни гідротермічного режиму у профілі ґрунту на північно-західному схилі впливають на міграцію карбонатів. Уповільнене танення снігу, затримка талих вод та обмежена інсоляція сприяють тривалому зволоженню ґрунту нижньої частини схилу, що впливає на його морфологічну будову. У холодний період спостерігається низхідний рух вологи, що спричинює вимивання карбонатів у глибші горизонти, тоді як у теплий період їх осадження зумовлюється високими температурами та активною евапотранспірацією. Нейтральні та слаболужні (рН 6,8–7,2) умови ґрунтового розчину сприяють утриманню кальцію та магнію в обмінному комплексі та забезпечують хімічну стабільність ґрунтового середовища.

Ґрунт південно-східного схилу (опукла частина) є короткопрофільним, сформованим на лесових відкладах, з високим вмістом карбонатів у вигляді прожилок і псевдоміцелію. Впродовж усіх сезонів спостерігалось бурне скипання карбонатів з поверхні, що свідчить про ксероморфність ґрунту та можливий вплив ерозійних процесів. Просторова мінливість глибини скипання карбонатів, виявлена за лінією трансект, свідчить про неоднорідність їхнього залягання по схилу. Слаболужні та лужні умови (рН 7,6–8,6) сприяють осадженню карбонатів і зниженню розчинності кальцію.

Ґрунт на рівнинній території відповідає класичним характеристикам темно-сірих опідзолених ґрунтів, за винятком підвищеної лужності верхніх горизонтів порівняно з даними минулого століття. Карбонати мігрують у межах 55–100 см залежно від сезонного зволоження та транспірації рослин, що підтверджено динамікою лінії скипання. Нейтрально-слаболужна (рН 6,8–8,0) реакція ґрунтового розчину сприяє утриманню карбонатів. Підвищена лужність верхнього горизонту може бути наслідком змін клімату.

Здобуті результати щодо впливу гідротермічного режиму дозволяють визначити особливості використання лінії скипання карбонатів як діагностичного критерію й удосконалити номенклатуру та класифікацію темно-сірих опідзолених ґрунтів на рівні виду. Динамічність лінії скипання за сезонами року та вірогідність її відсутності в окремі роки є додатковими аргументами на користь недоцільності окремого виділення так званих «реградованих» ґрунтів. Підвищення лужності цих ґрунтів, в аспекті змін клімату, є приводом для наукового переосмислення підходів щодо необхідності їх хімічної меліорації.

Внесок авторів: В. Б. Соловей — ідея, цілі та завдання дослідження, інтерпретація зданих даних, консультації з методологічних питань, критичний аналіз тексту, внесення правок; О. О. Троценко — розробка методичних підходів, проведення польових робіт, збирання, аналіз та інтерпретація даних, підготовка рукопису. Автори ознайомлені з опублікованою версією рукопису і згодні з нею.

Список використаних джерел

1. Khalidy R., Arnaud E., Santos R., M. Natural and human-induced factors on the accumulation and migration of pedogenic carbonate in soil: A Review. *Land*. 2022. 11(9). 1448. <https://doi.org/10.3390/land11091448>
2. Monger H. C., Krammer R. A., Khresat S., Cole D. R., Wang X., Wang J. Sequestration of inorganic carbon in soil and groundwater. *Geology*. 2015. 43(5). P. 375–378. <https://doi.org/10.1130/G36449.1>
3. Leogrande R., Vitti C., Castellini M., Mastrangelo M., Pedrero F., Vivaldi G. A., Stellacci A. M. Comparison of Two Methods for Total Inorganic Carbon Estimation in Three Soil Types in Mediterranean Area. *Land*. 2021. 10(4). 409. <https://doi.org/10.3390/land10040409>
4. Sanderman J. Can management induced changes in the carbonate system drive soil carbon sequestration? A review with particular focus on Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2012. Vol. 155. P. 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.015>
5. Monger H. C. Soils as generators and sinks of inorganic carbon in geologic time. In *Soil Carbon*; A. E. Hartemink, K. McSweeney (Eds.). Springer: Cham, Switzerland, 2014; P. 27–36.
6. Dietrich F., Diaz N., Deschamps P., Ngatcha B., N., Sebag D., & Verrecchia E. P. Origin of calcium in pedogenic carbonate nodules from silicate watersheds in the Far North Region of Cameroon: Respective contribution of in situ weathering source and dust input. *Chemical Geology*. 2017. 460(5). P. 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.04.015>
7. Dang C., Kong F., Li Y., Jiang Z., Xi M. Soil inorganic carbon dynamic change mediated by anthropogenic activities: An integrated study using meta-analysis and random forest model. *Science of The Total Environment*. 2022. 835. 155463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155463>

8. Emmerich W. E. Carbon dioxide fluxes in a semiarid environment with high carbonate soils. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2003. 116(1-2). P. 91-102. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00231-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00231-9)
9. Batool M., Cihacek L. J., Alghamdi R. S. Soil inorganic carbon formation and the sequestration of secondary carbonates in global carbon pools: A Review. *Soil Syst.* 2024. 8(1). 15. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010015>
10. Wang Y., Li Y., Ye X., Chu Y., Wang X. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. *Science of The Total Environment*. 2010. 408(8). P. 1925-1931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.01.015>
11. Amit R., Simhai O., Ayalon A., Enzel Y., Matmon, A., Crouvi, O., ...McDonald, E. Transition from arid to hyper-arid environment in the southern Levant deserts as recorded by early Pleistocene cummulic Aridisols. *Quaternary Science Reviews*. 2011. 30(3-4). P. 312-323. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.11.007>
12. Kim J. H., Jobbágy E. G., Richter D. D., Trumbore S. E., Jackson R. B. Agricultural acceleration of soil carbonate weathering. *Global Change Biology*. 2020. 26(10). 5988-6002. <https://doi.org/10.1111/gcb.15207>
13. Monger, H. C. Pedogenic Carbonates: Links between biotic and abiotic CaCO₃. In Proceedings of the 17th WCSS, Bangkok, Thailand, 14–21 August 2002. Symposium 20, paper 897.
14. Li Y., Zhang W., Aydin A., Deng X. Formation of calcareous nodules in loess–paleosol sequences: Reviews of existing models with a proposed new “per evapotranspiration model”. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. 154. P. 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2017.12.002>
15. Полупан М. І., Балюк С. А., Соловей В. Б., Величко В. А., Волков П. О. Природний механізм захисту схилових ґрунтів від водної ерозії. / За ред. М. І. Полупана. Київ: Фенікс, 2011. 144 с. <https://doi.org/10.31073/978-000-000-0>
16. Naorem A., Jayaraman S., Dalal R. C., Patra A., Rao C., & Lal R. Soil Inorganic Carbon as a Potential Sink in Carbon Storage in Dryland Soils—A Review. *Agriculture*. 2022. 2(8). 1256. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081256>
17. Sánchez-Bermúdez M., del Pozo J. C., Pernas M. Effects of Combined Abiotic Stresses Related to Climate Change on Root Growth in Crops. *Front. Plant Sci.* 2022. Vol. 13. 918537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918537>
18. Соловей В. Б., Троценко О. О. Порівняльна морфолого-генетична характеристика опідзолених ґрунтів плакорного і схилових місцеположень. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ “ІГА ім. О. Н. Соколовського”. Харків: 2024. Вип. 97. С. 4–17. <https://doi.org/10.31073/acss97-01>
19. *Guidelines for soil description*. Fourth edition, corrected and supplemented. (2012). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome Retrieved from <https://www.fao.org/4/a0541e/a0541e.pdf>
20. Полупан М. І., Соловей В. Б., Величко В. А. Класифікація ґрунтів України / за ред. М. І. Полупана. Київ: Аграрна наука, 2005. 300 с. <https://doi.org/10.31073/966-540-013-4>
21. Соловей В. Б., Троценко О. О. (2024). Термічні режими опідзолених ґрунтів схилових та рівнинних місцеположень. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. Серія: Агрономія і біологія. 56(2). С. 57-66. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.2.8>
22. Гринь Г. С. Полевая диагностика почв : учебное пособие. Под общей редакцией профессора А. М. Гринченко. ХСХИ. Харьков, 1974. 224 с.
23. Соловей В. Б., Троценко О. О. Різноглибинне дослідження температурного режиму ґрунтів цифровими датчиками. *Таврійський науковий вісник. Серія : Сільськогосподарські науки*. 2023. № 131. С. 211–219. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.131.27>
24. *Настанова гідрометеорологічним станціям і постам : Метеорологічні спостереження на станціях* (Випуск 3. Частина 1). Державна гідрометеорологічна служба. Київ, 2011. 280 с. URL: <http://www.cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/images/PraciSpivrobitnikiv/mastanovy-3.pdf>
25. Бреус Н. М. Черноземы Лесостепной зоны умеренно континентальной восточноевропейской фации. *Черноземы СССР (Украина)*. М.: Колос, 1981. С. 38–79.
26. Медведев В. В. *Структура почвы (методы, генезис, классификация, эволюция, география, мониторинг, охрана)*. Харьков, 2008. 406 с.
27. Почвы Украины и повышение их плодородия : Экология, режимы и процессы, классификация и генетико-производственные аспекты / под ред. Н. И. Полупана. Киев: Урожай, 1988. Т. 1. 296 с.

UDC 631.436.5.6:631.423.2(477.54)

The influence of the hydrothermal regime on the migration of calcium carbonates in dark gray podzolized soils on slopes with different exposures in Kharkiv region

V. B. Solovei, O. O. Trotsenko ✉

National Scientific Center “Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky”, Kharkiv, Ukraine

✉ trea140981@gmail.com

Received 02.04.2025; Revised 14.06.2025; Accepted 17.06.2025; Available online 01.07.2025

Abstract

The paper presents the results of a study on the hydrothermal regime of dark gray podzolized soils (Luvic Greyzem Phaeozem (Loamic)) on slopes with different exposures and the seasonal dynamics of calcium carbonate migration within their profiles. The research was conducted in the Kharkiv region of Ukraine at four closely located sites: on slopes with northwestern and southeastern exposures, as well as on a flat area and at the bottom of a gully. It was established that the seasonal depth of carbonate occurrence, as an important morphological characteristic of the soil, largely depends on the dynamics of temperature and moisture content in the soil profile, which are determined by slope exposure. Soil moisture content was measured using the thermostat-weight method, with samples taken from the 0–120 cm layer at 10 cm intervals. Soil temperature was recorded continuously at 30-minute intervals throughout the study period using thermosensors equipped with DS18B20 digital sensors, installed at 10 cm intervals (down to 120 cm); one sensor placed on the soil surface (0 cm). Precipitation amounts were recorded using a rain gauge. Snow cover depth and coverage extent were documented daily when snow was present. Special attention was paid to the role of seasonal changes in soil moisture in the processes of carbonate migration and sedimentation. The mechanisms of vertical differentiation of inorganic carbon in the soil profile in the form of carbonates are described. The study analyzes migration models and their dependence on climatic, hydrological, and biological factors. It was found that on the northwestern slope, where the soil remains in a state of elevated moisture for a prolonged period, downward vertical migration of dissolved carbonates predominates. On the southeastern slope, under conditions of

high insolation and intense evaporation, carbonates accumulate in the upper horizons. On the flat area, intermediate hydrothermal soil characteristics (relative to the slopes) were observed — seasonal fluctuations in temperature and moisture result in bidirectional carbonate migration: leaching into lower horizons in autumn and winter, and upward movement in spring. The study also considers the potential indicative role of carbonate concretions in the soil profile — as evidence of migration–accumulation processes, the direction and intensity of carbonate migration, and changes in hydrothermal conditions during soil formation. It is noted that concretions may be of relict origin from the parent material or the result of pedogenic processes. The observations demonstrate that topography, hydrothermal conditions, and biological activity are key factors determining the distribution and dynamics of carbonates in the profiles of the studied dark gray podzolized soils.

Keywords: calcium carbonates; migration; slopes; exposure; hydrothermal regime; dark gray podzolized soils.

Citing: Solovei, V. B., & Trotsenko, O. O. (2025). The influence of the hydrothermal regime on the migration of calcium carbonates in dark gray podzolized soils on slopes with different exposures in Kharkiv region. *AgroChemistry and Soil Science*, 98, 36–54. doi:10.31073/acss98-03 [in Ukrainian].

References

1. Khalidy, R., Amaud, E., & Santos, R., M. (2022). Natural and Human-Induced Factors on the Accumulation and Migration of Pedogenic Carbonate in Soil: A Review. *Land*, 11 (9), 1448. <https://doi.org/10.3390/land11091448>
2. Monger, H. C., Kraimer, R. A., Khresat, S., Cole, D. R., Wang, X., & Wang, J. (2015). Sequestration of inorganic carbon in soil and groundwater. *Geology*, 43(5), P. 375-378. <https://doi.org/10.1130/G36449.1>
3. Leogrande, R., Vitti, C., Castellini, M., Mastrangelo, M., Pedrero, F., Vivaldi, G. A., & Stellacci, A. M. (2021). Comparison of Two Methods for Total Inorganic Carbon Estimation in Three Soil Types in Mediterranean Area. *Land*, 10 (4), 409. <https://doi.org/10.3390/land10040409>
4. Sanderman, J. (2012). Can management induced changes in the carbonate system drive soil carbon sequestration? A review with particular focus on Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 155, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.015>
5. Monger, H. C. (2014). Soils as generators and sinks of inorganic carbon in geologic time. In A. E. Hartemink, K. McSweeney (Eds.), *Soil Carbon* (pp. 27-36). Springer: Cham, Switzerland.
6. Dietrich, F., Diaz, N., Deschamps, P., Ngatcha, B., N., Sebag, D., & Verrecchia, E. P. (2017). Origin of calcium in pedogenic carbonate nodules from silicate watersheds in the Far North Region of Cameroon: Respective contribution of in situ weathering source and dust input. *Chemical Geology*, 460(5), 54-69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.04.015>
7. Dang, C., Kong, F., Li, Y., Jiang, Z., & Xi, M. (2022). Soil inorganic carbon dynamic change mediated by anthropogenic activities: An integrated study using meta-analysis and random forest model. *Science of The Total Environment*, 835, 155463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155463>
8. Emmerich, W. E. (2003). Carbon dioxide fluxes in a semiarid environment with high carbonate soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116(1-2), 91-102. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00231-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00231-9)
9. Batool, M., Cihacek, L. J., & Alghamdi, R. S. (2024). Soil inorganic carbon formation and the sequestration of secondary carbonates in global carbon pools: A Review. *Soil Sys*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010015>
10. Wang, Y., Li, Y., Ye, X., Chu, Y., & Wang, X. (2010). Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. *Science of The Total Environment*, 408(8), 1925-1931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.01.015>
11. Amit, R., Simhai, O., Ayalon, A., Enzel, Y., Matmon, A., Crouvi, O., ... McDonald, E. (2011). Transition from arid to hyper-arid environment in the southern Levant deserts as recorded by early Pleistocene cummulic Aridisols. *Quaternary Science Reviews*, 30(3-4), 312-323. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.11.007>
12. Kim, J. H., Jobbágy, E. G., Richter, D. D., Trumbore, S. E., & Jackson, R. B. (2020). Agricultural acceleration of soil carbonate weathering. *Global Change Biology*, 26(10), 5988-6002. <https://doi.org/10.1111/gcb.15207>
13. Monger, H. C. (2002). Pedogenic Carbonates: Links between biotic and abiotic CaCO₃. *Proceedings of the 17th WCSS*, Bangkok, Thailand, 14–21 August 2002. Symposium 20, paper 897.
14. Li, Y., Zhang, W., Aydin, A., & Deng, X. (2018). Formation of calcareous nodules in loess–paleosol sequences: Reviews of existing models with a proposed new “per evapotranspiration model”. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.12.002>
15. Polupan, M. I., Baliuk, S. A., Solovei, V. B., Velychko, V. A., & Volkov, P. O. (2011). Natural mechanism of protection of slope soils from water erosion. M. I. Polupan (Ed.). Kyiv: Fenix. <https://doi.org/10.31073/978-000-000-0> [In Ukrainian]
16. Naorem, A., Jayaraman, S., Dalal, R. C., Patra, A., Rao, C., & Lal, R. (2022). Soil Inorganic Carbon as a Potential Sink in Carbon Storage in Dryland Soils – A Review. *Agriculture*, 2(8), 1256. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081256>
17. Sánchez-Bermúdez, M., del Pozo, J. C., & Pernas, M. (2022). Effects of Combined Abiotic Stresses Related to Climate Change on Root Growth in Crops. *Front. Plant Sci.*, 13, 918537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918537>
18. Solovei, V. B., & Trotsenko, O. O. (2024). Comparative morphological-genetic characteristics of podzolized soils on plateau and slope locations. *AgroChemistry and Soil Science*, 97, 4-17. <https://doi.org/10.31073/acss97-01> [In Ukrainian]
19. *Guidelines for soil description*. Fourth edition, corrected and supplemented. (2012). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome Retrieved from <https://www.fao.org/4/a0541e/a0541e.pdf>
20. Polupan, M. I., Solovei, V. B., & Velychko, V. A. (2005). *Classification of Soils of Ukraine*. Ed. M. I. Polupan. Kyiv: Ahrama Nauka. <https://doi.org/10.31073/966-540-013-4> [In Ukrainian].
21. Solovei, V. B., & Trotsenko, E. A. (2024). Thermal regimes of podzolic soils on sloping and plain locations. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. The series: Agronomy and Biology, 56(2), 57-66. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.2.8> [In Ukrainian]
22. Grin, G. S. (1974). Field diagnostics of soils: a tutorial. (General editorship of prof. A. M. Grinchenko). Kharkiv. [in Russian]
23. Solovei, V. B., & Trotsenko, E. A. (2023). Multilevel investigation of soil temperature regime using digital sensor. *Taurida Scientific Herald. Series: Agricultural Sciences*, 131, 211–219. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.131.27> [In Ukrainian].
24. State Hydrometeorological Service. (2011). *Guidelines for Hydrometeorological Stations and Posts : Meteorological Observations at Stations* (Issue 3, Part 1). Kyiv. Retrieved from <http://www.cgo-sreznivskyi.kyiv.ua/images/PraciSpivrobitnikiv/mastanovy-3.pdf> [In Ukrainian].
25. Breus, N. M. (1981). Chernozems of the Forest-Steppe Zone of the Moderately Continental East European Facies, [38–79]. In *Chernozems of the USSR (Ukraine)*. Moscow: Kolos [In Russian].
26. Medvedev, V. V. (2008). *Soil structure (methods, genesis, classification, evolution, geography, monitoring, protection)*. Kharkiv. [in Russian].
27. Polupan, N. I. (Ed.). (1988). *Soils of Ukraine and increasing their fertility : Ecology, regimes and processes, classification and genetic-production aspects* (Vol. 1.). Kyiv: Urozhay [In Russian].