

## ВПЛИВ ДЕФІЦИТУ ВОЛОГИ НА ВМІСТ МІКРОЕЛЕМЕНТІВ ТА ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН У ҐРУНТАХ

ТКАЧУК О.П. – доктор сільськогосподарських наук, професор

[orcid.org/0000-0002-0647-6662](https://orcid.org/0000-0002-0647-6662)

Вінницький національний аграрний університет

КУЗЕМСЬКИЙ В.М. – аспірант

[orcid.org/0009-0001-5465-6932](https://orcid.org/0009-0001-5465-6932)

Вінницький національний аграрний університет

**Постановка проблеми.** Через потепління клімату та нерівномірний розподіл опадів сільськогосподарські культури в Україні все частіше зазнають нестачі вологи у ґрунті. В Україні в зоні Степу нараховується близько 15 мільйонів гектарів богарних орних земель, що зазнають пересушення та нестачі вологи для розвитку культурних рослин, а ще близько 1 мільйона гектарів таких земель знаходяться на зрошенні. В останні десятиліття проблема нестачі води для орних земель стала актуальною і для інших ґрунтово-кліматичних зон країни, зокрема Лісостепу [1, 2].

Найкраще вологу здатні утримувати ґрунтові колоїди та часточки гумусу. Хронічний дефіцит органічного вуглецю в орному шарі ґрунту через відсутніх поповнень запасів органікою, що триває останні десятиліття, є основною причиною втрати цінних агрономічних властивостей цього шару. Це порушує оптимальну структуру, підвищує щільність, змінює водо- і повітропроникність, запас органічних сполук і зменшує здатність утримувати вологу [3, 4].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Встановлено, що гідрометеорологічні процеси мають значний вплив на формування ґрунтів через розкладання рослинних решток, які беруть участь у процесі гуміфікації. При цьому одним із важливих показників, що впливають на хімічний стан ґрунтів, є термічний фактор. Він визначає інтенсивність і масштаби утворення гумусу, рівень випаровування, мінералізацію та переміщення гумусових речовин, адже саме гумус містить переважну більшість поживних елементів [5].

Крім основних елементів живлення таких як азот, фосфор та калій, запаси яких у ґрунтах постійно поповнюються з мінеральними добривами, для отримання високих урожаїв у ґрунті мають бути присутні мікроелементи. Останні результати агрохімічного моніторингу показують, що у понад 60% площі ґрунтів України вміст міді та молібдену дуже низький, в понад 40% площі ґрунтів виявлена нестача цинку, в понад 10% площі ґрунтів недостатньо марганцю, а в понад 70% площі сільськогосподарських угідь не вистачає сірки, понад 40% площі ґрунтів мають низький та дуже низький вміст рухомих сполук бору. В умовах нестійкого зволоження ґрунту доступність таких сполук може ще більше зменшитися, адже більшість з них поступають до рослин в процесі водорозчинення [6, 7].

Дефіцит мікроелементів у живленні рослин може бути обумовлений як погодними факторами (температурою,

опадями), так і особливостями ґрунту. Серед останніх варто відзначити низький загальний вміст мікроелементів, характерний, наприклад, для Полісся, а також зниження розчинності їхніх сполук у залежності від реакції ґрунтового розчину: лужної (для елементів Zn, Cu, Mn, Fe, Co) або кислої (для Mo). До того ж, можливе утворення осадів у вигляді гідроокисів, карбонатів, фосфатів тощо. Вплив погодних умов на засвоєння рослинами елементів живлення є досить мінливим у часі, тоді як ґрунтові фактори відзначаються просторовою неоднорідністю [8, 9].

Разом із зміною доступності мікроелементів у ґрунті для рослин в умовах нестачі вологи, можлива зміна доступності і токсикантів, що наявні у ґрунті: важких металів, радіонуклідів, залишків пестицидів, солей та кислот, ризик забруднення якими суттєво зріс в умовах бойових дій. І якщо, як правило, надходження рухомих форм мікроелементів при дефіциті вологи у ґрунті зменшується, то доступність токсикантів у таких умовах може зростати [10, 11]. Проте питання доступності іонів мікроелементів та токсичних речовин у ґрунтах з нестачею вологості ще не досліджено, що і визначає актуальність теми.

**Мета.** Встановити рухомість іонів мікроелементів, важких металів, радіонуклідів та залишків пестицидів в умовах нестачі ґрунтового зволоження.

**Матеріали та методика досліджень.** Дослідження проводилися на визначених ґрунтах з ознаками недостатньої зволоженості, які відзначалися відсутністю рослинності повністю або частково, легким механічним складом (піщані, супіщані). Було підібрано три типи таких ґрунтів: дерново-підзолисті, сірі опідзолені, чорноземі опідзолені, що вкrapлені в основні типи ґрунтів та утворюють невеликі зони з проявом ознак опустелювання. Встановлені тест-полігони в межах СТОВ «Малі Крушлинці» Вінницького району Вінницької області.

Вирощувана культура – соняшник. Перед посівом було внесено повний комплекс мінеральних добрив у нормі  $N_{100}P_{100}K_{100}$ . У господарстві підтримують високий рівень агротехніки, застосовуючи інтенсивні технології у рослинництві та забезпечуючи високу ступінь окультурення ґрунтів.

Було виділено 6 тест-полігонів розміром 4 м<sup>2</sup> кожен у такій послідовності: дерново-підзолистий піщаний ґрунт; дерново-підзолистий супіщаний ґрунт; сірий опідзолений піщаний ґрунт; сірий опідзолений супіщаний ґрунт; чорнозем опідзолений піщаний ґрунт; чорнозем



опідзолений супіщаний ґрунт. В межах кожного тест-полігону в кінці квітня відібрали проби ґрунту для визначення вологості – лабораторним гравіметричним методом виділення вологи; вмісту обмінного кальцію та рухомого магнію – за МВВ 26487-85; рухомої сірки – за ДСТУ 8347:2015; мікроелементів: міді рухомої – за ДСТУ 4770.6-2007; цинку рухомого – за ДСТУ 4770.2-2007; марганцю рухомого – за ДСТУ 4770.1-2007; заліза рухомого – за ДСТУ 4770.0-2007; важких металів: кадмію рухомого – за ДСТУ 4770.7-2007; свинцю рухомого – за ДСТУ 4770.9-2007; радіонуклідів цезію-137 (Cs-137) – за МЕО-МВ 029-2024 та стронцію-90 (Sr-90) – за МВ 030-2024; залишкових кількостей пестицидів: ДДТ і його метаболітів та ГХЦГ – за МВ 041-2024 (МУ-2142-80); 2,4 Д амінна сіль – за МВ 054-2024 (МУ 1541-76) [12].

Лабораторні дослідження проводилися у сертифікованій та акредитованій лабораторії Південно-Західного міжрегіонального центру Державної установи «Інститут охорони ґрунтів України» у селі Агрономічне Вінницької області.

**Результати досліджень.** Кальцій у ґрунті є важливим елементом його родючості. Він покращує структуру ґрунту, оптимізує кислотність рН. Оптимальний вміст кальцію у поглинальному комплексі ґрунту має становити 60-80%. Відхилення від цього значення блокує акумуляцію інших поживних речовин. На кислих ґрунтах кальцій легко вимивається, а на лужних – стає важкодоступним для рослин.

Нестача вологи у ґрунті посилює проблему нестачі кальцію, оскільки він у ґрунті малорухливий. Результати досліджень показали, що найменший вміст кальцію був виявлений у дерново-підзолистому піщаному ґрунті, де вміст вологи був найнижчий (5,1 %) – 1,27 мг-екв./100 г. Супіщаний дерново-підзолистий ґрунт містив кальцію на 28,7 % більше та мав вологість на 0,5 % вищу. А найбільше кальцію містилося у чорноземі опідзоленому супіщаному – 12,31 мг-екв./100 г, який мав найвищу вологість – 10,3 %. Це було майже у 10 разів більше, ніж містилося кальцію у дерново-підзолистому піщаному ґрунті (табл. 1).

Між вмістом обмінного кальцію та вологістю ґрунтів встановлений сильний прямий позитивний кореляційний зв'язок з коефіцієнтом кореляції  $r = 0,9669$ . Він показує, що із зниженням вологості ґрунту вміст кальцію обмінного також зменшується.

Магній легко вимивається з легких ґрунтів. Його дефіцит посилюється високим вмістом калію та низьким

рівнем органіки. Найкраще він накопичується на нейтральних ґрунтах, але його нестача характерна навіть для чорноземів. Магній разом із кальцієм покращує структуру ґрунту. Низька вологість ґрунту посилює дефіцит магнію, який переходить з доступних у недоступні форми.

Найменший вміст магнію спостерігався у дерново-підзолистих ґрунтах з різним механічним складом, які мали найнижчу вологість – 5,1–5,6 %, а також у сірому опідзоленому піщаному ґрунті з рівнем вологості 5,8, де він становив 0,13 мг-екв./100 г. У сірому опідзоленому супіщаному ґрунті, вологість якого становила 7,5 %, вміст магнію зріс у 2,9 рази і склав 0,38 мг-екв./100 г, а у чорноземах він був у 8,2 рази більшим, де вологість була найвищою і складала 9,6-10,3 %. За фактичним вмістом рухомого магнію, дерново-підзолисті і сірі опідзолені ґрунти належать до дуже низько забезпечених цим елементом (до 1,0 мг-екв./100 г), а чорнозем опідзолений – до низько забезпечених магнієм (1,0–2,5 мг-екв./100 г). Між вмістом магнію та вологістю ґрунтів встановлений сильний прямий кореляційний зв'язок з коефіцієнтом кореляції  $r = 0,9819$ . Це вказує, що із зменшенням вологості ґрунту вміст рухомого магнію також зменшується.

Оптимальне співвідношення кальцію і магнію у ґрунті має становити 4:1, оскільки їх надлишок може блокувати один одного. Результати розрахунків показують, що фактичне співвідношення між цими двома іонами становить (8-14):1, що є вкрай несприятливим та обмежує надходження саме магнію з ґрунту до рослин. Враховуючи функцію магнію протистояти стресу рослинам від посухи та спеки, а також покращення структури ґрунту і поліпшення його вологоємності, незбалансоване співвідношення кальцію і магнію у ґрунтах з дефіцитом вологи ускладнює ріст рослин на них і підсилює процеси опустелювання.

Сірка у ґрунті покращує засвоєння азоту. У ґрунті сірка міститься переважно в органічній формі, стаючи доступною для рослин після мінералізації та перетворення мікроорганізмами на сульфати. Сірка здатна підвищувати стійкість рослин до посухи. Дефіцит сірки характерний на бідних ґрунтах, а також при інтенсивному землеробстві. У пересушених ґрунтах вона стає недоступною для рослин і перетворюється у важкорозчинні форми. На піщаних ґрунтах після сильних опадів вона може вимиватися та зменшувати свій вміст.

Спостереження за вмістом рухомих форм сірки показало, що найменше її містилося у сірому опідзоленому піщаному ґрунті – 2,7 мг/кг, який мав вміст вологи

Таблиця 1

**Вміст іонів кальцію, магнію та сірки у ґрунтах залежно від рівня їх вологи**

Тип ґрунту	Механічний склад ґрунту	Вологість ґрунту, %	Кальцій обмінний, мг-екв./100 г	Магній рухомий, мг-екв./100 г	Сірка рухома, мг/кг
Дерново-підзолистий	піщаний	5,1	1,27	0,13	6,5
	супіщаний	5,6	1,78	0,13	10,7
Сірий опідзолений	піщаний	5,8	1,78	0,13	2,7
	супіщаний	7,5	3,05	0,38	5,2
Чорнозем опідзолений	піщаний	9,6	10,78	1,02	5,2
	супіщаний	10,3	12,31	1,07	5,2

5,8 %. Це було у 1,9 рази менше, ніж містилося сірки у сірому опідзоленому супіщаному ґрунті з вмістом вологи 7,5 % та у чорноземі опідзоленому, вологість якого становила 9,6–10,3%. Найбільше рухомої сірки містив дерново-підзолистий супіщаний ґрунт – 10,7 мг/кг, вологість якого становила 5,6 %. Це було в 1,6 рази більше сірки, ніж її містилося у піщаному дерново-підзолістому ґрунті, вологість якого була на 0,5 % нижчою. Виходячи з отриманих даних, відсутній прямий зв'язок між вологістю ґрунту та вмістом у ньому рухомої сірки.

Мідь у ґрунтах є одночасно мікроелементом та важким металом. Доступними для рослин у ґрунті є рухомі форми міді. Дефіцит вологи у ґрунтах знижує рухомість міді та перетворює її у недоступні сполуки. У піщаних та карбонатних ґрунтах може спостерігатися дефіцит міді, яка підвищує стійкість рослин до посухи. Гранично допустима концентрація рухомих форм міді у ґрунтах становить 3 мг/кг. При перевищенні цього значення мідь у ґрунті переходить з мікроелементу у токсичний важкий метал.

Фактичний вміст рухомих форм міді у досліджуваних ґрунтах становив 0,29–1,62 мг/кг. Найменше міді містив піщаний дерново-підзолистий ґрунт, вологість якого була найнижчою і становила 5,1 %. В той же час його супіщана форма містила міді майже у два рази більше та була вологіша на 0,5 %. Найбільше рухомої міді містив сірий опідзолений супіщаний ґрунт, що було на 11,1 % більше, ніж містилося міді у його піщаній відміні, та який був на 1,7 % більш вологим. Виходячи з отриманих даних, прямої залежності між вмістом вологи і рухомих форм міді у ґрунті не встановлено. Перевищення гранично допустимої концентрації рухомих форм міді (3 мг/кг) у всіх досліджуваних ґрунтах не виявлено (табл. 2).

Цинк також є важливим мікроелементом, який підвищує посухостійкість рослин. Але близько 60 % ґрунтів в Україні мають низький вміст рухомих форм цинку, особливо на кислих та карбонатних ґрунтах. Надлишок рухомого фосфору та кальцію у ґрунті може знижувати доступність цинку. Також на легких піщаних ґрунтах вміст цинку часто є низьким. За дефіциту вологи у ґрунті знижується рухомість цинку, який перетворюється у недоступні для рослин форми.

Результати досліджень показали, що вміст рухомих форм цинку становив від 0,25 мг/кг у дерново-підзолістому піщаному ґрунті, який містив найменше вологи, до 0,55 мг/кг у чорноземі опідзоленому супіщаному, що був найбільш зволеним. Підвищення вологості ґрунту від піщаної до супіщаної відміни у дерново-підзолістому ґрунті на 0,5 % збільшує вміст рухомих

форм цинку майже у 2 рази; у сірому опідзоленому ґрунті – зростання його вологості на 1,7 % збільшує вміст рухомого цинку на 34 %, а у чорноземі опідзоленому – зростання його вологості на 0,7 % збільшує концентрацію цинку на 3,6 %. Між вмістом вологи та рухомих форм цинку у ґрунті встановлений сильний прямий кореляційний зв'язок з коефіцієнтом кореляції  $r = 0,7765$ . Тобто, із збільшенням вологості ґрунту зростає вміст рухомих форм цинку у ньому. При значенні гранично допустимої концентрації рухомих форм цинку у ґрунті 23,0 мг/кг, перевищень жодний ґрунт не мав.

Доступність марганцю у ґрунтах, як мікроелемента, залежить від рівня рН ґрунту: він стає менш доступним на лужних та перезволожених, ущільнених ґрунтах, тоді як на кислих ґрунтах його достатньо. Висока перезволоженість ґрунту провокує дефіцит марганцю. Результати досліджень показали, що найменше марганцю містилося у сірому опідзоленому піщаному ґрунті – 4,5 мг/кг, вологість якого становила 5,8 % та чорноземах – по 7,5 мг/кг, рівень вологості яких склав 9,6–10,3 %. Найбільше марганцю містилося у сірому опідзоленому супіщаному ґрунті – 25,2 мг/кг з їх вологістю 7,5 %, що було у 5,6 рази більше, ніж у піщаному сірому опідзоленому ґрунті, вологість якого була на 1,7 % нижча. Також високий вміст марганцю був встановлений у дерново-підзолистих ґрунтах – 14,6–20,8 мг/кг з рівнем вологості 5,1–5,6%, що було у 2–2,8 рази більше, ніж у чорноземах, вологість яких становила 9,6–10,3 %.

Залізо часто є присутнім у ґрунті, але його доступність для рослин може бути низькою за високого значення рН. Зволоженість ґрунту сильно впливає на вміст і доступність заліза: перезволоження знижує кількість кисню, сприяє накопиченню розчинних сполук заліза, що може бути токсичним; сухість обмежує його розчинення та засвоєння, хоча залізо в ґрунті завжди присутнє, але його доступність рослинам найвища при оптимальній вологості (близько 50–60 % від повної вологоємності) та збалансованому рН, оскільки залізо є важливим елементом живлення, хоч і може створювати проблеми за екстремальних умов.

Результати досліджень показали, що найбільше заліза містилося у дерново-підзолістому супіщаному ґрунті – 56,21 мг/кг при вологості 5,6 %. Це було у 2,8 рази більше, ніж у дерново-підзолістому піщаному ґрунті, вологість якого була на 0,5 % нижча. Дуже низький вміст заліза був встановлений у сірому опідзоленому піщаному ґрунті – 4,34 мг/кг, що було у 4,7 рази менше, ніж у сірому опідзоленому супіщаному ґрунті,

Таблиця 2

**Вміст іонів мікроелементів у ґрунтах залежно від рівня їх вологи**

Тип ґрунту	Механічний склад ґрунту	Вологість ґрунту, %	Мідь рухома, мг/кг	Цинк рухорий, мг/кг	Марганець рухорий, мг/кг	Залізо рухове, мг/кг
Дерново-підзолистий	піщаний	5,1	0,29	0,25	14,6	20,31
	супіщаний	5,6	0,57	0,48	20,8	56,21
Сірий опідзолений	піщаний	5,8	1,44	0,35	4,5	4,34
	супіщаний	7,5	1,62	0,53	25,2	20,25
Чорнозем опідзолений	піщаний	9,6	0,45	0,53	7,5	4,98
	супіщаний	10,3	0,49	0,55	7,5	4,80

вологість якого була на 1,7 % вища, а також у чорноземі опідзоленому незалежно від його механічного складу та рівня зволоженості – 4,80–4,98 мг/кг.

Кадмій у ґрунті є токсичним важким металом, який негативно впливає на рослини, порушуючи ріст, знижуючи біомасу, викликаючи стрес на клітинному рівні та гальмуючи фотосинтез. Вологість ґрунту є важливим фактором, що визначає рухливість та доступність кадмію у ґрунті для рослин. В умовах перезволоження знижується доступність кадмію. При дефіциті кисню кадмій часто утворює важкорозчинні сполуки, що перешкоджають його поглинанню корінням. В умовах вільного доступу кисню у ґрунті кадмій перебуває у більш рухливій формі. Збільшення вологості ґрунту після періоду посухи активує розчинення сполук кадмію, що різко підвищує його концентрацію в ґрунтового розчині.

Результати наших досліджень показали, що концентрація рухомих форм кадмію у ґрунтах становила 0,03–0,08 мг/кг. Найбільше кадмію містилося у дерново-підзолистому піщаному ґрунті, який мав найменший рівень вологості. Це було на 37,5 % більше, ніж містилося рухомого кадмію у дерново-підзолистому супіщаному ґрунті, вологість якого була на 0,5 % вища. Найменше кадмію містилося у сірому опідзоленому піщаному ґрунті, що було на 25 % менше, ніж у сірому опідзоленому супіщаному ґрунті, в той час як різниця у вологості між ними становила 1,7 %. При значенні гранично допустимої концентрації рухомих форм кадмію у ґрунті 0,7 мг/кг, жоден ґрунт не містив критичного рівня цього елемента (табл. 3).

Свинець, являючись важким металом, пригнічує фотосинтез, уповільнює ріст та знижує врожайність сільськогосподарських культур. Він накопичується в рослинах і порушує метаболічні процеси, блокуючи засвоєння інших мікроелементів. Вологість ґрунту впливає на рухливість свинцю та його доступність для рослин. Посуха посилює накопичення у ґрунті рухомих форм свинцю, оскільки зменшення вологи робить свинець більш рухливим та доступним для поглинання рослинами. Вона погіршує біологічні та фізичні властивості ґрунту, що сприяє накопиченню шкідливих речовин, збільшуючи токсичність.

Результати досліджень показали, що найвищий вміст рухомих форм свинцю був встановлений у сірому опідзоленому піщаному ґрунті – 1,57 мг/кг та дерново-підзолистому піщаному ґрунті – 1,45 мг/кг, вологість яких становила, відповідно 5,8 % та 5,1 %. Це було

відповідно на 30,6 % та на 23,4 % більше, ніж містилося рухомих форм свинцю у супіщаних відмінах відповідних ґрунтів і які були на 1,7 % та на 0,5 % більш вологими. Найменше рухомого свинцю містилося у супіщаному чорноземі опідзоленому – 0,85 мг/кг, що було на 14,1 % менше, ніж у чорноземі опідзоленому піщаному, який до того ж містив вологи на 0,7 % менше. При гранично допустимій концентрації рухомих форм свинцю у ґрунті 6,0 мг/кг, жоден ґрунт не мав перевищення.

Нами встановлена сильна негативна кореляційна залежність між вологістю ґрунту та вмістом у ньому рухомих форм свинцю  $r = -0,8209$ . Це вказує на те, що при зниженні вологості ґрунту рухомість свинцю зростає.

Підвищення вологості ґрунту збільшує частку водорозчинних форм радіоактивного цезію і це підсилює поглинання його з ґрунту рослинами. При підсиханні ґрунту концентрація радіоактивного цезію в ґрунтового розчині зростає, проте його загальне надходження до рослини часто знижується через уповільнення дифузії та транспірації. При зменшенні вологості ґрунту загальний вміст радіоактивного цезію у ґрунті не змінюється, але різко збільшується його рухливість та доступність для рослин, оскільки іони цезію менш міцно зв'язуються з ґрунтом, коли ґрунт сухий, а вологість є ключовим фактором для адсорбції та міграції радіонуклідів. Це призводить до підвищеного поглинання радіоактивного цезію рослинами, що посилює забруднення сільськогосподарської продукції.

Таке твердження повністю підтверджено нашими дослідженнями, де встановлено, що найвищий вміст радіоактивного цезію мали піщаний та супіщаний дерново-підзолистий ґрунт – по 0,18 Кі/км<sup>2</sup>, вологість яких була низькою – 5,1–5,6 %. Найменше радіоактивного цезію містилося у супіщаному чорноземі опідзоленому – 0,14 Кі/км<sup>2</sup>, що було на 12,5 % менше, ніж містив цезію чорнозем опідзолений піщаний з різницею їх вологості 0,7 %. Саме чорноземи мали найвищий вміст вологи (9,6–10,3 %). Між вологістю ґрунту та вмістом радіоактивного цезію встановлений сильний негативний кореляційний зв'язок:  $r = -0,8628$ , тобто при зниженні вологості ґрунту ризик радіаційного ефекту цезію зростає. При природному фоні радіоактивного забруднення ґрунту цезієм 1,0 Кі/км<sup>2</sup>, жоден дослідний варіант не досягав критичної межі.

Вологість ґрунту має опосередкований вплив на вміст радіоактивного стронцію, оскільки вода є основним розчинником та транспортом для розчинних

Таблиця 3

**Вміст форм важких металів та радіонуклідів у ґрунтах залежно від рівня їх вологи**

Тип ґрунту	Механічний склад ґрунту	Вологість ґрунту, %	Кадмій рухливий, мг/кг	Свинець рухливий, мг/кг	Цезій радіоактивний, Кі/км <sup>2</sup>	Стронцій радіоактивний, Кі/км <sup>2</sup>
Дерново-підзолистий	піщаний	5,1	0,08	1,45	0,18	0,014
	супіщаний	5,6	0,05	1,11	0,18	0,012
Сірий опідзолений	піщаний	5,8	0,03	1,57	0,17	0,012
	супіщаний	7,5	0,04	1,09	0,15	0,010
Чорнозем опідзолений	піщаний	9,6	0,07	0,99	0,16	0,011
	супіщаний	10,3	0,06	0,85	0,14	0,009

солей, зокрема і для радіоактивного стронцію. Висока вологість сприяє розчиненню радіоактивного стронцію та його переміщенню, тоді як сухий ґрунт може концентрувати його у доступній для рослин формі, але надмірне висушування знижує рухливість стронцію та біодоступність, впливаючи на його хімічні форми та зв'язок із ґрунтовими мінералами. У сухому ґрунті радіоактивний стронцій може сильніше адсорбуватися на частинках глини та органічній речовині (гумусі), стаючи менш доступним для рослин, але його концентрація в сухій масі ґрунту зростає. Зменшення вологи концентрує розчинені мінерали, включно із радіоактивним стронцієм, роблячи його більш доступним для рослин.

Встановлено, що найбільше радіоактивного стронцію містилося у піщаному дерново-підзолистому ґрунті – 0,014 Кі/км<sup>2</sup>, який містив найменше вологи – 5,1 %. Це було на 16,7 % більше, ніж його містилося у супіщаному дерново-підзолистому ґрунті, вологість якого була на 0,5 % вищою. Подібні залежності збереглися і в інших типах ґрунтів з урахуванням їх вологості та механічного складу. Найменше радіоактивного стронцію було у чорноземі опідзоленому супіщаному – 0,009 Кі/км<sup>2</sup>, вологість якого була найвищою – 10,3 %. Це було на 18,2 % менше, ніж містилося радіоактивного стронцію у піщаному чорноземі опідзоленому, що мав вологість на 0,7 % нижчу. При природному фоні радіоактивного забруднення ґрунту стронцієм 0,02 Кі/км<sup>2</sup>, жоден дослідний варіант не досягав критичної межі.

Між вологістю ґрунту та вмістом у ньому радіоактивного стронцію встановлений сильний негативний кореляційний зв'язок  $r = -0,8305$ . Це вказує на те, що при зниженні вологості ґрунту ризик накопичення радіоактивного стронцію зростає.

Вологість ґрунту має прямий вплив на залишки пестицидів. Зокрема висока вологість сприяє їхньому розчиненню та міграції вглиб ґрунту, тоді як сухіші умови можуть уповільнювати їх розклад, але збільшувати ризик перенесення вітром. Загалом вологість ґрунту впливає на швидкість розпаду та переміщення пестицидів по ґрунтовому профілю, що визначає довготривалість та поширення забруднення, а також на біологічну активність мікроорганізмів, що розкладають пестициди (табл. 4).

Проте результати наших досліджень не виявили впливу різної вологості ґрунту, типів ґрунтів та їх механічних складів на зміну концентрації залишків пестицидів. Залишки пестицидів ДДТ та його метаболіти, а також ГХЦГ у всіх ділянках становили по 0,01 мг/кг, а пестициду 2,4 Д амінна сіль – по 0,05 мг/кг. Відсутність

змін можна пояснити дуже низьким вмістом цих залишків у ґрунтах. Допустимий рівень вмісту ДДТ і його метаболітів, а також ГХЦГ у ґрунтах становить по 0,1 мг/кг, а 2,4 Д амінна сіль – 0,25 мг/кг. Отже, перевищень допустимих меж не виявлено.

Нашими дослідженнями доведено, що в умовах зміни вологості ґрунтів, найбільше корисних для рослин іонів кальцію – 12,31 мг-екв./100 г, магнію – 1,07 мг-екв./100 г, рухомого цинку – 0,55 мг/кг накопичується у чорноземі опідзоленому супіщаному з найвищою вологістю ґрунту – 10,3 %. Найбільше шкідливого кадмію – 0,08 мг/кг, свинцю – 1,45 мг/кг, радіоактивних цезію – 0,18 Кі/км<sup>2</sup> та стронцію – 0,014 Кі/км<sup>2</sup> виявлено у дерново-підзолистому піщаному ґрунті, що мав найнижчу вологість – 5,1 %. Найбільше сірки та заліза містилося у дерново-підзолистому супіщаному ґрунті – 10,7 мг/кг та 56,21 мг/кг відповідно, вологість якого становила 5,6 %, а міді (1,62 мг/кг) та марганцю (25,2 мг/кг) – у сірому опідзоленому супіщаному ґрунті, вологість якого склала 7,5 %.

Наукові дослідження виконані за рахунок коштів гранту Президента України молодим вченим та докторам наук «Розробка фітомеліоративних заходів відновлення деградованих ґрунтів внаслідок бойових дій в контексті гарантування продовольчої та енергетичної безпеки України» (грантоотримувач Олександр Ткачук), наданого Національним фондом досліджень України.

**Висновки.** Встановлено, що зміна вологості ґрунту має прямий вплив на вміст у ньому кальцію обмінного, магнію рухомого, цинку рухомого та свинцю рухомого, а також радіоактивних цезію і стронцію. Не виявлено впливу вологості ґрунту на вміст у ньому рухомих форм сірки, міді, марганцю, заліза та важкого металу кадмію. При зменшенні вологості ґрунту у ньому зменшується вміст кальцію (коефіцієнт кореляції  $r = 0,9669$ ), магнію (коефіцієнт кореляції  $r = 0,9819$ ), цинку (коефіцієнт кореляції  $r = 0,7765$ ), проте збільшується вміст рухомих форм важкого металу свинцю (коефіцієнт кореляції  $r = -0,8209$ ), радіоактивних цезію (коефіцієнт кореляції  $r = -0,8628$ ) і стронцію (коефіцієнт кореляції  $r = -0,8305$ ).

Таким чином встановлено, що в умовах пересушених ґрунтів, небезпека яких суттєво зростає в умовах глобального потепління, у них зменшується вміст кальцію, магнію і цинку, що ще більше погіршує умови вегетації сільськогосподарських культур, а також збільшується вміст важкого металу свинцю та радіоактивних цезію і стронцію, що не тільки пригнічує рослини, але й підвищує ризик накопичення цих токсикантів у рослинницькій продукції.

Таблиця 4.

**Вміст залишків пестицидів у ґрунтах залежно від рівня їх вологи**

Тип ґрунту	Механічний склад ґрунту	Вологість ґрунту, %	ДДТ і його метаболіти, мг/кг	ГХЦГ, мг/кг	2,4 Д амінна сіль, мг/кг
Дерново-підзолистий	піщаний	5,1	0,01	0,01	0,05
	супіщаний	5,6	0,01	0,01	0,05
Сірий опідзолений	піщаний	5,8	0,01	0,01	0,05
	супіщаний	7,5	0,01	0,01	0,05
Чорнозем опідзолений	піщаний	9,6	0,01	0,01	0,05
	супіщаний	10,3	0,01	0,01	0,05

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Іващенко О. О., Іващенко О. О. Проблема дефіциту води на орних землях України. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 6 (783). С. 53–60.
2. Тараріко Ю. О., Величко В. А., Личук Г. І. Грунтозахисна ефективність міжгалузевої оптимізації агроєкосистем. *Вісник аграрної науки*. 2017. № 11–17. С. 23–28.
3. Скок С. В. Оцінка якості ґрунтів зони Степу України в умовах глобальних змін клімату. *Таврійський науковий вісник*. 2022. № 124. С. 239–246.
4. Сайко В. Ф. Землеробство в контексті змін клімату. *Наукові праці Національного наукового центру Інститут землеробства УААН*. Київ. 2009. Спец. випуск. С. 4–12.
5. Польовий А. М. Вплив антропогенних змін клімату на сільське господарство. Одеса, 2013. 107 с.
6. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіз. Доповідь. [С. П. Іванюта, О. О. Коломієць, О. А. Малиновська, Л. М. Якушенко]; за ред. С. П. Іванюти. Київ: НІСД, 2020. 110 с.
7. Дєдов О. В., Пасічник В. І., Нагрибецький М. І. Ґрунти в умовах кліматичних змін: адаптація, реадптація, преадаптація? *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. 2017. Вип. 47. С. 100–105.
8. Періодична доповідь про стан ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення України, за результатами X туру (2011–2015 рр.) агрохімічного обстеження земель. За ред. Яцука І. П. Київ, 2020. 208 с.
9. Чорний С. Г. Оцінка якості ґрунтів: навчальний посібник. Миколаїв: МНАУ, 2018. 233.
10. Мірошніченко М. М., Коваленко С. С. Просторово-часова нерівномірність забезпечення ґрунтів рухомими мікроелементами. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 4 (841) С. 5–14.
11. Мірошніченко М. М., Круподеря Ю. О., Куц О. А. Сезонна динаміка показників якості та родючості ґрунту. Теорія і практика ґрунтоохоронного моніторингу. Харків: ФОРМ Бровін О. В., 2016. С. 77–121.
12. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення: керівний нормативний документ; за ред. І. П. Яцука, С. А. Балука. Київ, 2019. 108 с.
5. Polovyi, A. M. (2013). Vplyv antropohennykh zmin klimatu na silske hospodarstvo [The impact of anthropogenic climate change on agriculture]. Odesa, 107. [in Ukrainian].
6. Zmina klimatu: naslidky ta zakhody adaptatsii: analit. Dopovid [Climate change: consequences and adaptation measures: analytical report]. Ivaniuta, S. P., Kolomiets, O. O., Malynovska, O. A., & Yakushenko, L. M.; za red. Ivaniuty, S. P. Kyiv: NISD, 2020. 110. [in Ukrainian].
7. Diedov, O. V., Pasichniak, V. I., & Nahrybetskyi, M. I. (2017). Grunty v umovakh klimatichnykh zmin: adaptatsiia, readaptatsiia, preadaptatsiia? [Soils under climate change: adaptation, readaptation, preadaptation?]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina*. 47. 100–105. [in Ukrainian].
8. Periodychna dopovid pro stan gruntiv na zemliakh silskohospodarskoho pryznachennia Ukrainy, za rezultatamy X turu (2011–2015 rr.) ahrokhimichnoho obstezhennia zemel [Periodic report on the state of soils on agricultural lands of Ukraine, based on the results of the 10th round (2011–2015) of agrochemical land survey]. Za red. Yatsuka, I. P. Kyiv, 2020. 208. [in Ukrainian].
9. Chornyi, S. H. (2018). Otsinka yakosti gruntiv: navchalnyi posibnyk [Soil quality assessment: a textbook]. Mykolaiv: MNAU, 233. [in Ukrainian].
10. Miroshnychenko, M. M., & Kovalenko, S. S. (2023). Prostorovo-chasova nerivnomirnist zabezpechennia gruntiv rukhomymy mikroelementamy [Spatial-temporal unevenness of soil supply with mobile microelements]. *Visnyk ahramoi nauky*. 4 (841). 5–14. [in Ukrainian].
11. Miroshnychenko, M. M., Krupoderia, Yu. O., & Kuts, O. A. (2016). Sezonna dynamika pokaznykiv yakosti ta rodichosti gruntu. Teoriia i praktyka gruntookhoronnoho monitorynhu [Seasonal dynamics of soil quality and fertility indicators. Theory and practice of soil protection monitoring]. Kharkiv: FOP Brovin, O. V. 77–121. [in Ukrainian].
12. Metodyka provedennia ahrokhimichnoi pasportyzatsii zemel silskohospodarskoho pryznachennia: kerivnyi normatyvnyi dokument [Methodology for conducting agrochemical certification of agricultural lands: a guiding regulatory document]; za red. Yatsuk, I. P., & Baliuk, S. A. Kyiv, 2019. 108. [in Ukrainian].

## REFERENCES:

1. Ivashchenko, O. O., & Ivashchenko, O. O. (2018). Problema defitsytu vody na ornnykh zemliakh Ukrainy [The problem of water shortage on arable lands of Ukraine]. *Visnyk ahramoi nauky*. 6 (783). 53–60. [in Ukrainian].
2. Tarariko, Yu. O., Velychko, V. A., & Lychuk, H. I. (2017). Hruntozakhsna efektyvnist mizhhaluzevoi optymizatsii ahroekosystem [Soil protection efficiency of inter-sectoral optimization of agroecosystems]. *Visnyk ahramoi nauky*. 11–17. 23–28. [in Ukrainian].
3. Skok, S. V. (2022). Otsinka yakosti gruntiv zony Stepu Ukrainy v umovakh hlobalnykh zmin klimatu [Assessment of soil quality in the Steppe zone of Ukraine under conditions of global climate change]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk*. 124. 239–246. [in Ukrainian].
4. Saiko, V. F. (2009). Zemlerobstvo v konteksti zmin klimatu [Agriculture in the context of climate change]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho naukovoho tsentru Instytut zemlerobstva UAAN*. 4–12. [in Ukrainian].
5. Ткачук О.П., Куземський В.М. Вплив дефіциту вологи на вміст мікроелементів та токсичних речовин у ґрунтах  
 Мета. Встановити рухомість іонів мікроелементів, важких металів, радіонуклідів та залишків пестицидів в умовах нестачі ґрунтового зволоження.  
 Методи. Було виділено 6 тест-полігонів розміром 4 м<sup>2</sup> кожен у такій послідовності: дерново-підзолистий піщаний ґрунт; дерново-підзолистий супіщаний ґрунт; сірий опідзолений піщаний ґрунт; сірий опідзолений супіщаний ґрунт; чорнозем опідзолений піщаний ґрунт; чорнозем опідзолений супіщаний ґрунт. В межах кожного тест-полігону в кінці квітня відібрали проби ґрунту для визначення вологості та вмісту іонів мікроелементів, важких металів, радіонуклідів та залишків пестицидів.  
 Результати. Нашими дослідженнями доведено, що в умовах зміни вологості ґрунтів, найбільше корисних для рослин іонів кальцію – 12,31 мг-екв./100 г, магнію – 1,07 мг-екв./100 г, рухомого цинку – 0,55 мг/кг накопичується у чорноземі опідзоленому супіщаному

з найвищою вологістю ґрунту – 10,3 %. Найбільше шкідливого кадмію – 0,08 мг/кг, свинцю – 1,45 мг/кг, радіоактивних цезію – 0,18 Кі/км<sup>2</sup> та стронцію – 0,014 Кі/км<sup>2</sup> виявлено у дерново-підзолистому піщаному ґрунті, що мав найнижчу вологість – 5,1 %. Найбільше сірки та заліза містилося у дерново-підзолистому супіщаному ґрунті – 10,7 мг/кг та 56,21 мг/кг відповідно, вологість якого становила 5,6 %, а міді (1,62 мг/кг) та марганцю (25,2 мг/кг) – у сірому опідзоленому супіщаному ґрунті, вологість якого склала 7,5 %.

**Висновки.** Встановлено, що зміна вологості ґрунту має прямий вплив на вміст у ньому кальцію обмінного, магнію рухомого, цинку рухомого та свинцю рухомого, а також радіоактивних цезію і стронцію. Не виявлено впливу вологості ґрунту на вміст у ньому рухомих форм сірки, міді, марганцю, заліза та важкого металу кадмію. При зменшенні вологості ґрунту у ньому зменшується вміст кальцію (коефіцієнт кореляції  $r = 0,9669$ ), магнію (коефіцієнт кореляції  $r = 0,9819$ ), цинку (коефіцієнт кореляції  $r = 0,7765$ ), проте збільшується вміст рухомих форм важкого металу свинцю (коефіцієнт кореляції  $r = -0,8209$ ), радіоактивних цезію (коефіцієнт кореляції  $r = -0,8628$ ) і стронцію (коефіцієнт кореляції  $r = -0,8305$ ).

**Ключові слова:** вологість ґрунту, кальцій, магній, іони, важкі метали, радіонукліди, залишки пестицидів.

#### **Tkachuk O.P., Kuzemsky V.M. The influence of moisture deficiency on the content of trace elements and toxic substances in soils**

**Objective:** To determine the mobility of ions of trace elements, heavy metals, radionuclides, and pesticide residues under conditions of lack of soil moisture.

**Methods.** 6 test plots of 4 m<sup>2</sup> each were selected in the following sequence: sod-podzolic sandy soil; sod-podzolic

sandy soil; gray podzolic sandy soil; gray podzolic sandy soil; chernozem podzolic sandy soil; chernozem podzolic sandy soil. Within each test plot, soil samples were taken at the end of April to determine the moisture content and the content of trace element ions, heavy metals, radionuclides, and pesticide residues.

**Results.** Our studies have proven that under conditions of soil moisture change, the most useful for plants calcium ions – 12.31 mg-eq./100 g, magnesium – 1.07 mg-eq./100 g, mobile zinc – 0.55 mg/kg accumulate in podzolized sandy chernozem with the highest soil moisture – 10.3%. The most harmful cadmium – 0.08 mg/kg, lead – 1.45 mg/kg, radioactive cesium – 0.18 Ci/km<sup>2</sup> and strontium – 0.014 Ci/km<sup>2</sup> were found in sod-podzolic sandy soil, which had the lowest moisture content – 5.1%. The highest levels of sulfur and iron were found in sod-podzolic sandy loam soil – 10.7 mg/kg and 56.21 mg/kg, respectively, with a moisture content of 5.6%, and copper (1.62 mg/kg) and manganese (25.2 mg/kg) – in gray podzolic sandy loam soil with a moisture content of 7.5%.

**Conclusions.** It was found that changes in soil moisture have a direct effect on the content of exchangeable calcium, mobile magnesium, mobile zinc and mobile lead, as well as radioactive cesium and strontium. No effect of soil moisture on the content of mobile forms of sulfur, copper, manganese, iron and the heavy metal cadmium was found. As soil moisture decreases, the content of calcium (correlation coefficient  $r = 0.9669$ ), magnesium (correlation coefficient  $r = 0.9819$ ), zinc (correlation coefficient  $r = 0.7765$ ) decreases, but the content of mobile forms of the heavy metal lead (correlation coefficient  $r = -0.8209$ ), radioactive cesium (correlation coefficient  $r = -0.8628$ ) and strontium (correlation coefficient  $r = -0.8305$ ) increases.

**Key words:** soil moisture, calcium, magnesium, ions, heavy metals, radionuclides, pesticide residues.

Дата першого надходження статті до видання: 27.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 06.05.2026