

ТЕРМІЧНІ РЕЖИМИ ОПІДЗОЛЕНИХ ҐРУНТІВ СХИЛОВИХ ТА РІВНИННИХ МІСЦЕПОЛОЖЕНЬ

Соловей Вадим Борисовичкандидат сільськогосподарських наук
Національний науковий центр «Інститут Ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського», м. Харків, Україна
ORCID: 0000-0001-9820-1780
gruntpokrov@ukr.net**Троценко Олена Олександрівна**аспірантка
Національний науковий центр «Інститут Ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського», м. Харків, Україна
ORCID: 0009-0007-0317-2907
tra140981@gmail.com

В статті висвітлені дослідження гідротермічних умов, проведених в різних аграрних регіонах, які були спрямовані на оцінку впливу цих показників на врожайність та якість сільськогосподарської продукції. Результати дослідження наголошують на важливості обліку агрокліматичних параметрів у сучасному агровиробництві для адаптації до змінних умов.

Вказується, що наукове дослідження, проводилось у лісостеповій зоні Харківської області. Було проведено моніторинг температурного режиму темно-сірого та лучного опідзоленого ґрунту на чотирьох різних ділянках. Ділянки включають рівну плакорну територію, два типи експозиції схилів – пологий прямий схил північно-західної експозиції та опуклий схил південно-східної експозиції, а також дно балки. Основна мета дослідження полягала в аналізі річної динаміки температури ґрунту для визначення особливостей формування термічного режиму цих ґрунтів у сучасних умовах клімату.

Методи дослідження включали використання термосенсорів, що дозволило здійснювати вимірювання температури ґрунту на глибинах від поверхні ґрунту до 120 см з кроком 10 см і з інтервалом 30 хвилин протягом усього року. Інформація передавалася через мережу GSM, а дані зберігалися на спеціалізованому веб-сервері в режимі реального часу. Наголошується, що дослідження дозволило оцінити зміни температурних режимів на зазначених локаціях.

У роботі показаний аналіз температурних коливань теплового та холодного періодів поверхневого і глибинних шарів ґрунту у різних рельєфних умовах впродовж року. Були висвітлені спостереження за короткостроковими заморозками та тривалістю періодів з негативними температурами на різних типах місцевості. Особливу увагу приділено порівнянню мінімальних температур та тривалості заморозків на північно-західному та південно-східному схилах, плакорі та дні балки.

Встановлено, що найменші та найбільші температури та їх коливання фіксуються на поверхні ґрунту. Максимальна глибина промерзання ґрунту до 30 см на схилі північно-західної експозиції, морозний період триває 104 дні. Найменша мінімальна температура поверхні ґрунту не завжди збігається з найменшою температурою повітря.

Ключові слова: термічні режими, темно-сірі опідзолені ґрунти, схили, моніторинг ґрунтів, термосенсор, експозиція.

DOI <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.2.8>

Вступ. Дослідження температури ґрунту, його коливань у часі та просторі, є одним із фундаментальних напрямів у ґрунтознавстві, біології, екології, важливих для розуміння процесів ґрунтоутворення, формування генетичних горизонтів та морфології ґрунтів. Різноглибинна (її зміни) температура ґрунту впливає на швидкість фізичних та хімічних процесів, таких як переміщення мінеральних частинок, мінералізація органічної речовини, що відіграє певну роль у процесах, які визначають вертикальну диференціацію ґрунтового профілю. Температура ґрунту впливає на швидкість розкладання органічного матеріалу, що призводить до утворення відмінних за властивостями та складу ґрунтових горизонтів. Термопроцеси у ґрунті мають пряме відношення до агрокліматичних умов і, як наслідок, до сільського господарства.

Зростання інтересу світової спільноти вчених і практиків до створення ефективних методів управління ресурсами, заснованих на даних температури ґрунту, вологості ґрунту, повітря та інших показників, свідчить про прагнення до збереження та раціонального використання ресурсів та їх економії, до сталого розвитку сільського господарства.

Сучасні дослідження ступеня та швидкості змін агрокліматичних умов у різних аграрних регіонах підкреслюють значиму роль урахування та накопичення статистично достовірних агрокліматичних параметрів територій для створення стратегій адаптації сільськогосподарських технологій до кліматичних коливань (Li et al., 2020). Дослідження в бавовняному полі на півдні Сінцзяну (Wang et al., 2022), показали, що регу-

лювання температури ґрунту ефективно знижує тепловий стрес рослин і покращує умови їх росту. Аналогічні результати отримано у дослідженнях з насінневою кукурудзою (Zhao et al., 2020), з проростками кукурудзи (Xia et al., 2021), де було вивчено вплив температур на кореневу зону. Дослідження мікроклімату та витрат ґрунтової вологи на кавових плантаціях (Fiorini de Carvalho et al., 2020) продемонструвало, що затінення оптимізує гідротермічні умови та сприяє кращому росту кавових рослин. Використання мульчування показало свою ефективність у стабілізації температури ґрунту, що було продемонстровано в дослідженнях (Li et al., 2021). Випробування різних систем мульчування (Liu et al., 2020; Jiabin Wang et al., 2020), показали свою найбільшу ефективність при обмеженій вологості і низьких температурах, що стало основою для оптимізації сільськогосподарського виробництва в посушливих, напівпосушливих та інших районах. Дослідження в Бад-Лаухштедті, Німеччині (Jarrah et al., 2022), вказують на важливість врахування методів обробітку ґрунту та сівозміни для регулювання температурних умов, оскільки глибина оранки та застосовані добрива впливають на тимчасову мінливість ґрунту. Внесення добрив сприяє зростанню рослин (Zhang et al., 2020), чим вище зелена маса культури, тим більше водопоглинення рослиною. Було встановлено, що деградація лучної рослинності на пасовищному екотоні в Північно-Західному Китаї (Yang et al., 2019) спричинила прискорення опустелювання, також було виявлено, що температурні зміни більш виражені на луках з низьким рівнем рослинного покриву, а збільшення середньорічної температури ґрунту на 8,5 °C скорочує період замерзання ґрунту на 10 днів.

Розуміння динаміки температури ґрунту у просторі, в умовах кліматичних змін/коливань, є корисним для прийняття рішень щодо управління природними ресурсами, охорони природи та для фундаментальних досліджень. Дослідження (Chen et al., 2020) показало, що температурні коливання ґрунту на материковому Китаї залежать від таких факторів як клімат, географія та топографія місцевості, рослинний покрив та властивостей самого ґрунту. Вплив абіотичних факторів, включно з ґрунтовим диханням та типом екосистеми, значно змінює температурний режим ґрунту. Було наголошено, що вологоутримуюча здатність глинистих ґрунтів вища, ніж у піщаних, і глибоким шарам ґрунту потрібно більше часу для насичення вологою, навіть при збільшенні опадів. Вивчення взаємозв'язку між вмістом вологи, температурою ґрунту та викидами CO₂ на водно-болотних угіддях в Луїзіані (Chappell & Johnson, 2021), підкреслило вплив температури та вологи ґрунту на мікробну активність та газообмін у ньому. Дослідження впливу температури, вологості та органічного вуглецю на викиди ґрунтового CO₂ з лісів, пасовищ та сільськогосподарських екосистем на природоохоронній території Непалу (Buanjanekar et al., 2020), вказали на різницю у диханні ґрунту між зазначеними екосистемами; найвище на сільськогосподарських угіддях, потім на пасовищах і лісах і залежить від органічного вуглецю,

температури та вологості, в порядку їх відносної важливості. Дослідження (G. Simpson et al., 2022) показало, що рослинні угруповання реагують на температурні коливання, які різні в залежності від рельєфу місцевості. Динаміка температури ґрунту за різних умов випадіння опадів і різних форм рельєфу, розглянута (Nanda et al., 2020) на двох схилах у Гімалаях показала, що температура ґрунту на південному схилі під трав'яною рослинністю була на 2–5 °C вище, ніж на північному схилі. Зниження температури на 2 °C відбувалося при тривалості опадів більш ніж 7,5 годин або якщо їх середня інтенсивність перевищувала 7,5 мм за годину. Інтенсивні, але не тривалі опади не призводили до зниження температури ґрунту більш ніж на 1,0 °C. Дослідження (Wu et al., 2022) в широколистяних лісах південного Китаю показали, як сонячна енергія впливає на нагрівання поверхні ґрунту. Було зазначено, що зміна температури ґрунту зменшується з глибиною, а на глибині 40 см коливання практично відсутні. Взаємозв'язок між рослинністю тундри, накопиченням снігу, температурою ґрунту та вічною мерзлотою (Grünberg et al., 2020) показали, що тип рослинності пояснює близько половини мінливості зимової та весняної температури ґрунту, а висота снігового покриву та його структурні особливості мають великий вплив на середню температуру верхнього шару ґрунту та мінливість температур у зимові та весняні місяці. Дослідження (Veremeenko et al. 2021) були зосереджені на змінах в гідротермічному режимі темно-сірого опідзоленого ґрунту у Рівненській області, показуючи, як кліматичні зміни впливають на розподіл тепла і вологи в ґрунті.

Отже, просторове дослідження температури ґрунту має декілька аргументів, які обґрунтовують його необхідність, через варіабельність кліматичних показників, особливостей рельєфу (схил, яр, плакор) та рослинного покриву (сільськогосподарські культури, трав'яна рослинність, під пологом дерев) (Lembrechts & Johan van den Hoogen, 2021). Сучасні методи вимірювання температури ґрунту є потужним інструментом для дослідження різних аспектів ґрунтознавства, біології, екології (Levintal et al., 2022; Dafflon et al., 2022; Lu et al., 2021) та кліматології і, як свідчать дослідження, така ж необхідність є і для потреб сільського господарства (Gałęzowski et al., 2021; Bulgakov et al., 2022). Мета дослідження полягає в аналізі термічних режимів темно-сірих опідзолених ґрунтів схилових і плакорних місцеположень на різних глибинах.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження проводились на чотирьох ділянках поблизу с. Коротич, у Харківському районі Харківської області. Територія, яка нами аналізується, охоплює два типи експозиції схилів, рівнинну ділянку (плакор) та дно балки. Перша локація характеризується як пологий, прямий схил (2,5° – 2,0°) північно-західної експозиції, з темно-сірими опідзоленими підвищено зволженими важкосуглинковими ґрунтами на лесі. Друга ділянка – це опуклий схил (5,0° – 4,0°) південно-східної експозиції, з темно-сірими опідзоленими сильнозмитими, сильнопосушливими (сильноксероморфними, відповідно до визначника еко-

лого-генетичного статусу та родючості ґрунтів України, Polupan et al., 2005) важкосуглинковими ґрунтами на лесі. Третя ділянка – рівнинна (плакорна) територія (1,0° – 0°) з темно-сірими опідзоленими важкосуглинковими ґрунтами на лесі. Четверта ділянка – дно балки з лучним опідзоленим намитим важкосуглинковим ґрунтом. На кожній ділянці встановлені прилади для моніторингу температури ґрунту та ґрунтового покриву.

Застосований метод дослідження – моніторинг температури ґрунту та ґрунтового покриву із застосуванням сучасних технологій одержання, обробки та використання отриманої інформації ґрунтується на використанні термосенсорів, реалізованих на базі контролера Arduino. Як корпус використана поліпропіленова труба діаметром 3,2 см довжиною 70–200 см і пластикового корпусу, де розміщені мікроконтролер, літій-іонні акумулятори, флеш-карта, GSM модем та інші компоненти. Вимірювання температури ґрунту здійснюється цифровими датчиками DS18B20 (Zaszewski & Gruszczynski, 2022) з точністю +/- 0,5 °C, в інтервалі від -55 до +125 °C, які розміщені вертикально на інструменті через кожні 10 см і підключені за технологією 1-Wire. Кожен інструмент обладнаний 12 термодатчиками, що вимірюють температуру ґрунту на глибинах від 10 до 120 см та один датчик температури на гнучкому дроті для вимірювання температури поверхні ґрунту. Інтервал вимірювань кожні 30 хвилин, впродовж року. Дані передаються через мережу GSM місцевого оператора цифрового мобільного зв'язку. Для збереження даних розроблена система, яка включає веб-сайт і базу даних на спеціалізованому веб-сервері, що приймають та зберігають дані в режимі реального часу (Solovei & Trotsenko, 2023). При установці приладу відбувається мінімальне порушення цілісності ґрунту – 0,0011 м³, при свердловині глибиною 120 см та діаметрі 3,5 см, що не порушує його щільності і складання.

Результати. Формування температурного поля ґрунтів – це теплообмін між поверхнею ґрунту і ґрунтовою товщею. Поверхнею ґрунту, вона же дієва або активна, нами розуміється та, на якій відбувається перетворення частини сонячної енергії в інші її форми. Радіаційний баланс поверхні ґрунту залежить від різних факторів і має мінливий характер впродовж доби. Застосований нами метод вимірювання температури ґрунту та ґрунтового покриву, дозволяє отримувати термодинамічні показники активної поверхні, як відображення поточного стану її теплового балансу. Дослідження температури ґрунту на основі добових та сезонних змін, розкриває комплексну динаміку теплового режиму в ґрунті і є результатом складних фізичних процесів у його межах.

Добовий хід температури ґрунтового покриву зображений на рисунку 1 (дані за 30.06.2023 року) наочно демонструє відмінності в тепловому режимі на всіх об'єктах дослідження з різними максимальними і мінімальними значеннями.

Графік на рисунку 1 відображає динаміку температури протягом доби, з максимальними значеннями вдень і мінімальними вночі. Значення температури підіймаються протягом дня, досягаючи піків у різний час на різних формах рельєфу, тоді як вночі спадають до мінімуму і мають невеликі різниці за різних форм рельєфу.

Аналізуючи графік, можна помітити значні різниці між температурою повітря і температурою дієвої поверхні, яка значно вище в денний час.

З врахуванням даних, наведених у таблиці 1, можна зробити висновок, про вплив поточних погодних умов на мінливість температурних показників дієвої поверхні. У таблиці 1 наведені дані літнього (05.07.2023 та 07.07.2023 року) та зимового (09.01.2024 та 10.01.2024 року) періоду, за даними добових максимумів/мінімумів.

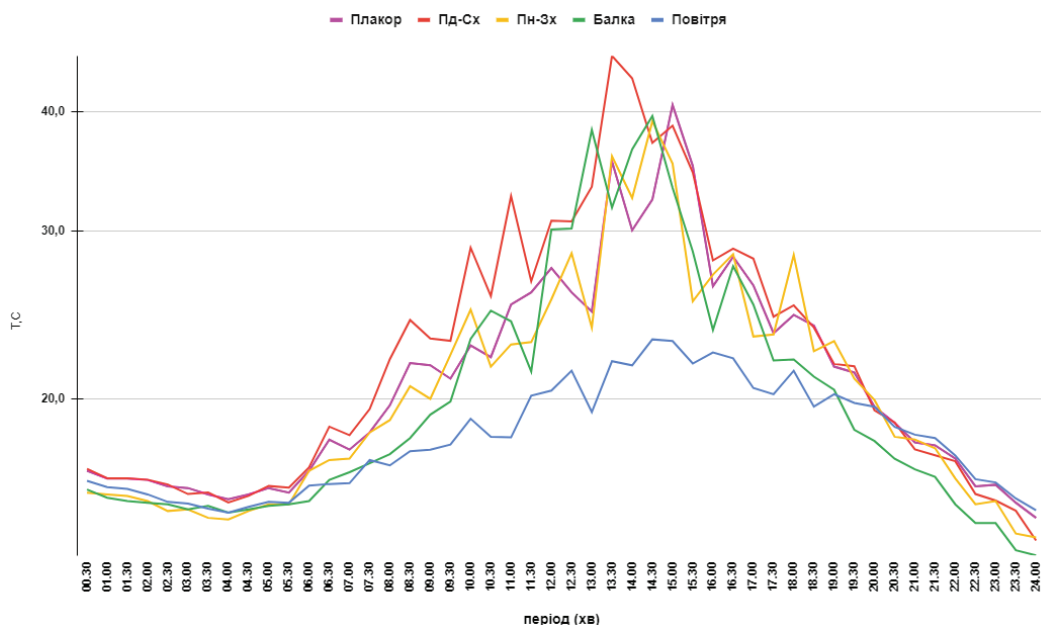


Рис. 1. Добовий хід температури ґрунту (°C) за різних форм рельєфу

З даних, наведених у таблиці 1, ми бачимо коливання температури на поверхні ґрунту на яку впливає тривалість сонячного сяйва, характер і стан дієвої поверхні (рослинність, сніговий покрив), хмарність, вітер, температура повітря.

Дослідження добового ходу температур протягом 2023 року на майданчиках спостережень, показав наступний розподіл сонячної енергії (табл. 2) між схилами північно-західної та південно-східної експозиції.

Аналізуючи дані таблиці 2 відзначимо, що різниця в температурі дієвої поверхні між схилами не перевищувала 4,5 °С, у той час як добові максимуми могли мати різницю в межах 5,0–10,0 °С і 17,7 °С (максимальна температура поверхні ґрунту 05.07, яка була зафіксована впродовж 2023 року).

Якщо порівняти суму активних температур вище 10 °С за глибинами: 10 см – шар закладання більшості посівного матеріалу, 10–30 см – шар кореневої та коренеплідної системи рослин, 10–50 см та 10–120 см – основний шар кореневої системи рослин, маємо певну різницю в значеннях (табл. 3, табл. 4).

На основі аналізу таблиць 3 та 4 важливо відзначити декілька ключових аспектів – це варіювання отриманої сонячної енергії та її вплив на тепловий режим ґрунту по глибинах та по розглянутим сезонам. Поверхня (0 см) схилу північно-західної експозиції за літній період (VI, VII, VIII) отримує на 10,2% менше сонячної енергії в порівнянні зі схилом південно-східної експозиції. Це пояснюється тим, що схили Пн-Зх експозиції отримують сонячної енергії більше у другий половині доби і на заході

Таблиця 1

Зміни термічного режиму активної поверхні темно-сірих та лучних опідзолених ґрунтів за різних форм рельєфу

дата	Пн-Зх		Пд-Сх		Плакор		Дно балки	
	05.07.2023	07.07.2023	05.07.2023	07.07.2023	05.07.2023	07.07.2023	05.07.2023	07.07.2023
Погодні умови	штиль	12 м/с	штиль	12 м/с	штиль	12 м/с	штиль	12 м/с
Т повітря /ґрунту (°С)	33,2	33,5	33,2	33,5	33,2	33,5	33,2	33,5
0 см	48,2	47,8	65,9	60,6	58,4	54,7	54,6	52,6
дата	09.01.2024	10.01.2024	09.01.2024	10.01.2024	09.01.2024	10.01.2024	09.01.2024	10.01.2024
Висота снігового покриву (см)	6	8	7	7	7	8	8	9
Т повітря /ґрунту (°С)	-20,4	-11,2	-20,4	-11,2	-20,4	-11,2	-20,4	-11,2
0 см	-9,1	-5,9	-4,6	-3,0	-3,7	-2,6	-6,3	-3,6

Таблиця 2

Середньодобові температури поверхні ґрунту (0 см) за період VI-XI місяців 2023 року

VI		VII		VIII		IX		X		XI	
Пд-Сх	Пн-Зх	Пд-Сх	Пн-Зх	Пд-Сх	Пн-Зх	Пд-Сх	Пн-Зх	Пд-Сх	Пн-Зх	Пд-Сх	Пн-Зх
Середньодобові температури (°С)											
23,7	22,6	27,0	22,7	26,2	23,8	20,1	17,1	10,8	9,2	4,8	3,8
Δ 1,1		Δ 4,3		Δ 2,4		Δ 3,0		Δ 1,6		Δ 1,0	
Добові максимуми поверхні ґрунту (°С)											
63,9	55,6	65,9	48,2	59,0	50,1	51,8	45,6	48,8	36,7	29,6 (01.11)	24,8 (01.11)

Таблиця 3

Сума активних температур вище 10 °С за глибинами в період VI-XI місяців 2023 року

Глибини/місяці	Пн-Зх		Пд-Сх	
	VI, VII, VIII	IX, X, XI	VI, VII, VIII	IX, X, XI
0 см	2119	664	2361	836
10 см	1942	619	1958	729
10-30 см	1922	624	1913	770
10-50 см	1887	666	1867	849
10-120 см	1737	899	1708	1009

Різниця між схилами північно-західної та південно-східної експозиції по глибинах за період VI-XI місяців 2023 року

Глибини/період	VI, VII, VIII	IX, X, XI
0 см	-10,2 %	-20,6 %
10 см	-0,8 %	-21,8 %
10-30 см	0,4 %	-19,0 %
10-50 см	1,1 %	-21,6 %
10-120 см	1,7 %	-10,9 %

сонця, вони більш холодніші і менш освітлені вранці. На глибині 10 см різниця в отриманій енергії знижується до 0,8%, що вказує на те, що вплив експозиції схилу на температуру ґрунту зменшується зі збільшенням глибини. На глибинах 10-30/50/120 см, спостерігається поступове збільшення позитивних значень, що свідчить на можливість схилів Пн-Зх експозиції акумулювати тепло ефективніше з глибиною.

Аналізуючи дані за осінній період (IX, X, XI) ми бачимо на поверхні ґрунту (0 см), різницю в отриманій енергії, яка зростає до -20%. Це пояснюється коротшою тривалістю дня в осінні місяці. На глибинах 10-30/50/120 см різниця залишається негативною, досягаючи -21,8% (10 см) і поступово зменшуючись до -10,9% (120 см). Це свідчить про те, що сезонні зміни в інсоляції відіграють значну роль у теплових властивостях ґрунту, особливо на менших глибинах. Проте на великих глибинах різниця між експозиціями зменшується, що свідчить про більш складні процеси теплообміну в ґрунті.

Оскільки температурні зміни в ґрунті з глибиною мають більш повільний характер, порівняно зі змінами на поверхні, аналіз глибинних шарів є більш надійним показником акумуляції теплової енергії. В таблиці 5 наведено відсоткове співвідношення отриманої теплової енергії на досліджуваних схилах і дні балки, порівняно з рівнинною територією (плакор).

Проаналізувавши дані за різні періоди часу, можна відмітити наступні особливості. На північно-західному схилі бачимо позитивну динаміку у червні та липні, що може бути обумовлено інтенсивним сонячним випромінюванням в цей період, більшою акумуляцією вологи та меншою випаровуваністю. Однак у серпні, вересні, жовтні та листопаді спостерігається зворотна тенденція, що пов'язано з меншою сонячною активністю та періодом світового дня. На південно-східному схилі позитивне

накопичення теплової енергії у весь період досліджень. Для дна балки характерні негативні значення щодо рівнинної території в усіх місяцях. Це пов'язано зі «стіканням» холодного повітря та менш інтенсивним сонячним випромінюванням через особливість рельєфу.

Спостереження за різноглибинною температурою ґрунту в період від'ємних значень (X, XI, XII 2023 року та I, II місяці 2024 року) кажуть про часті коливання температури на дієвій поверхні, сприяючи процесам замерзання та відтаювання у ґрунтовому шарі. Треба зауважити, що перші від'ємні температури на поверхні ґрунту спостерігались вже у жовтні, вночі, на всіх об'єктах дослідження, але денні температури залишались ще на «осінньому» рівні (31.10.2023 на плакорі, на поверхні ґрунту, було зафіксовано +18,4 °C). Температурні умови холодного періоду наведені у таблиці 6.

Аналізуючи температурні коливання на майданчиках спостережень, можна відзначити, що поверхневі шари ґрунту найбільш схильні до температурних коливань. Схил північно-західної експозиції демонструє найнижчі мінімальні температури (-9,6 °C, висота снігового покриву – 6 см) у січні та найбільшу кількість днів з від'ємними температурами (загальна кількість за 5 місяців – 104 доби). Схил південно-східної експозиції демонструє варіабельність температури поверхні із максимальними зниженнями в листопаді (-7,0 °C, висота снігового покриву – 7 см) та у грудні (-6,4 °C, висота снігового покриву – 0 см), 84 доби – кількість днів з від'ємними температурами. На плакорі, мінімальна температура поверхні зафіксована у листопаді (-7,8 °C, висота снігового покриву – 8 см), кількість днів з від'ємними температурами – 65. Дно балки демонструє мінімальне зниження у листопаді (-7,5 °C, висота снігового покриву – 9 см), та 91 добу з від'ємними температурами. Слід зазначити, що мінімальна температура повітря, в період фіксування

Таблиця 5

Акумуляція теплової енергії на різних формах рельєфу відносно плакору (%) у шарі 10–120 см за даними середньодобових температур

Місяць	Пн-Зх	Пд-Сх	Дно балки
	10–120 см		
VI	7,4	3,9	-10,9
VII	5,1	4,2	-8,7
VIII	-0,2	1,7	-11,3
IX	-1,8	2,2	-15,2
X	-2,6	4,2	-15,6
XI	-2,7	3,0	-9,4

Тривалість заморозків та від'ємних температур ґрунту за різних форм рельєфу

Період	Плакор	Пд-Сх	Пн-Зх	Дно балки
0 см – дієва поверхня				
Жовтень 2023	1 доба (мін -1,7 °С)	4 доби (мін -4,5 °С)	9 діб (мін -7,1 °С)	5 діб (мін -3,3 °С)
Листопад 2023	8 діб (мін -7,8 °С)	11 діб (мін -7,0 °С)	17 діб (мін -7,1 °С)	9 діб (мін -7,5 °С)
Грудень 2023	17 діб (мін -5,1 °С)	25 діб (мін -6,4 °С)	26 діб (мін -7,1 °С)	27 діб (мін -6,5 °С)
Січень 2024	27 діб (мін -4,7 °С)	27 діб (мін -5,6 °С)	31 добу (мін -9,6 °С)	31 добу (мін -6,3 °С)
Лютий 2024	12 діб (мін -1,6 °С)	17 діб (мін -2,8 °С)	21 добу (мін -4,1 °С)	19 діб (мін -4,7 °С)
Глибина 10 см				
Грудень 2023	9 діб (мін -0,3 °С)		6 діб (мін -0,3 °С)	
Січень 2024	25 діб (мін -2,4 °С)	9 діб (мін -0,4 °С)	25 діб (мін -1,9 °С)	24 доби (мін -0,9 °С)
Лютий 2024	16 діб (мін -0,6 °С)		15 діб (мін -0,1 °С)	7 діб (мін -0,1 °С)
Глибина 20 см				
Січень 2024	13 діб (мін -0,3 °С)		31 добу (мін -0,5 °С)	19 діб (мін -0,4 °С)
Лютий 2024			11 діб (мін -0,1 °С)	12 діб (мін -0,2 °С)
Глибина 30 см				
Січень 2024			19 діб (мін -0,4 °С)	
Лютий 2024			22 доби (мін -0,1 °С)	

найбільших від'ємних температур на поверхні ґрунту у трьох зазначених локаціях (схил Пд-Сх, плакор, дно балки) складала -12,4 °С (22.11.2023).

Аналіз показує, що січень 2024 року став найхолоднішим місяцем, з мінімальною температурою повітря -21,2 °С (13.01.2024), і тривалим морозним періодом (27-31 доба), при цьому висота снігового покриву, в середньому по об'єктах дослідження, досягала 8 см.

Довгострокове промерзання ґрунту до 30 см починається вже з грудня на Пн-Зх схилі і зберігає від'ємні температури до кінця лютого; до середини березня на глибині 30 см зберігається нульова температура. Найбільш «тепла» локація – схил Пд-Сх експозиції, промерзає до глибини 10 см у січні. Плакор і дно балки зберігають від'ємні температури на глибині 20 см до січня і лютого відповідно. Всі чотири локації зберігають позитивні температури ґрунту на глибині 120 см впродовж року.

Глибинне нагрівання ґрунту починається вже наприкінці березня на плакорі і схилі Пд-Сх експозиції. Температури ґрунту на глибині 120 см прогріваються, в середньому, до 5,0 °С не зважаючи на періодичні, короткотривалі від'ємні температури на активній поверхні. Схил Пн-Зх експозиції та дно балки з глибини 20 - 120 см, наприкінці березня мають температури нижче 5,0 °С.

Весняний період (III, IV, V) характеризується значними коливаннями погодних умов, які впливають на температури поверхні та профілю ґрунту. Для порівняння і наочності, наведені дані за 11 квітня 2023 та 2024 років у таблиці 7, та рисунку 2.

Порівнюючи дані температур у таблиці за різні періоди часу на одній і тій же локації, можна помітити значні відмінності між двома роками, особливо на дієвій поверхні. У 2024 році температура на поверхні значно вища, ніж у 2023 році, з температурним максимумом 47,4 °С, що є не типовим для квітня. Також видно, що зі збільшенням глибини температура менш схильна до коливань і більш стабільна в обох роках. Це вказує на те, що ґрунт зберігає тепло в глибоких шарах на довгий період часу, що робить їх менш чутливими до короткострокових коливань зовнішніх умов.

Графічне зображення наочно ілюструє зменшення температурних коливань з глибиною, яке складає менш ніж 1,0 °С, починаючи з 50 см.

Спираючись на дані моніторингових спостережень за температурою ґрунту на локаціях, що досліджувались, весняний період демонструє помітні поверхневі коливання на зазначених об'єктах, які залежать від положення і експозиції схилів та фізичних (теплоємність, теплопровідність, щільність, вологоємність) характеристик ґрунту. Доцільно проілюструвати на прикладі локацій плакору та схилу Пн-Зх експозиції (табл. 8).

Рівнинна та відкрита (плакор/схил Пн-Зх) територія показує вищі максимальні (47,5 °С/28,6 °С) і іноді нижчі мінімальні (1,2 °С/3,3 °С) температури, та значні температурні амплітуди, порівняно зі схилом, що прискорює швидкість протікання ґрунтових процесів та впливає на біологічні ритми рослин. Схил північно-західної експозиції, який отримує більше сонячного тепла у другій поло-

Добові температури ґрунту на рівнинній території (плакор), середньодобові показники (°С)

Глибина	Плакор					
	11.04.2023			11.04.2024		
	середньодобові	Мін	Макс	середньодобові	Мін	Макс
0 см	9,3	5,0	13,5	20,0	4,9	47,4
10 см	10,4	6,1	14,5	13,2	11,4	15,1
20 см	9,8	8,4	10,9	11,9	11,3	12,8
30 см	9,6	9,0	10,4	11,0	10,8	11,5
40 см	9,3	9,0	9,6	10,3	10,0	10,6
50 см	8,9	8,8	9,0	9,6	9,3	9,8
60 см	8,0	7,9	8,1	8,9	8,7	9,1
70 см	7,7	7,6	7,7	8,4	8,2	8,6
80 см	7,1	6,9	7,1	8,0	7,8	8,1
90 см	6,7	6,6	6,7	7,6	7,4	7,8
100 см	6,5	6,4	6,6	7,3	7,1	7,4
110 см	6,3	6,3	6,5	7,0	6,9	7,1
120 см	6,0	5,8	6,1	6,7	6,6	6,8

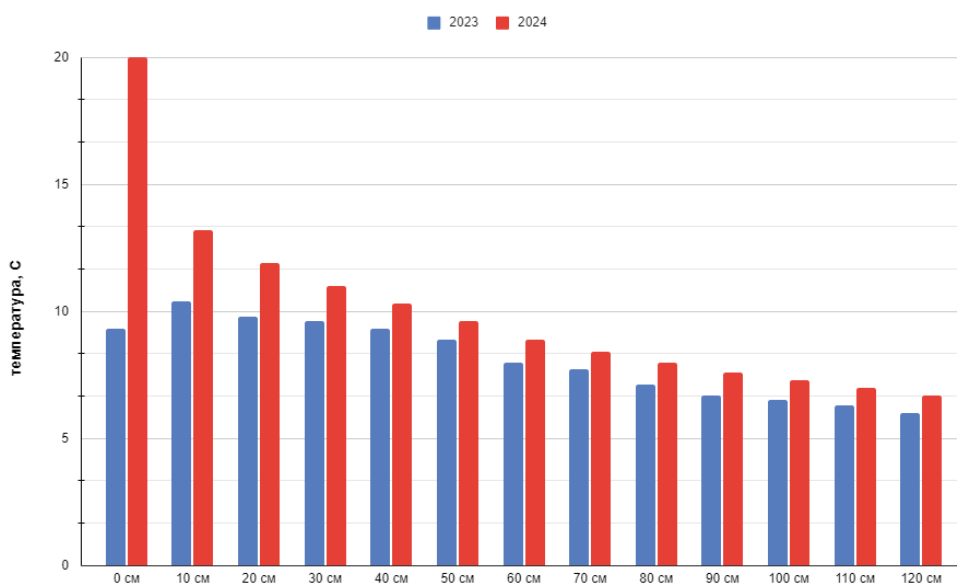


Рис. 2. Середньодобова температура ґрунту (°С) 11.04.2023/2024 року

Середньодобові, максимальні та мінімальні температури (°С) поверхні ґрунту на плакорі та схилі північно-західної експозиції

дата	Мін	Макс	Середньодобова	Мін	Макс	Середньодобова
	Плакор			Пн-Зх		
01.04.2024	7,3	33,4	17,5	6,4	24,1	13,8
02.04.2024	3,7	33,5	18,0	6,5	26,3	14,5
03.04.2024	7,9	33,6	15,0	6,3	27,1	13,0
08.04.2024	1,2	42,6	16,0	3,3	24,9	12,2
09.04.2024	2,7	44,6	16,6	4,4	25,6	12,9
10.04.2024	1,9	47,5	18,6	4,3	28,6	14,4
19.04.2024	2,6	23,1	11,1	4,0	15,3	10,0
20.04.2024	1,5	33,9	12,6	2,8	19,3	9,6
21.04.2024	8,4	26,4	14,9	9,0	22,2	13,2

вині доби, демонструє менші добові амплітуди, та більш стабільно помірні температурні умови.

Темно-сірі та лучні опідзолені ґрунти, за різних форм рельєфу мають різні характеристики теплового режиму, як в теплий, так і в холодний періоди, що впливає на фізико-хімічні процеси, які відбуваються у ґрунті: сезонне розкладання органічної речовини, стан біорізноманіття та динаміку ґрунтової вологи, що у свою чергу впливає на формування ґрунтового профілю і структурні особливості горизонтів. Ці відмінності мають бути враховані при плануванні сільськогосподарських стратегій адаптації до мінливості погодних умов.

Обговорення. Як було наголошено (Li et al., 2020), є необхідність проведення прямих вимірювань температури ґрунту безпосередньо на локаціях, які цікавлять, для отримання найбільш достовірних даних. Прогнозування температури ґрунту, засноване лише по температурних сітках метеорологічних станцій, не враховує локальні особливості рельєфу та ґрунтового складу, що, у свою чергу, призводить до значних похибок. Це наголошує на важливості прямих вимірювань (Volodymyr Bulgakov et al., 2022; Lech Gałęzewski et al., 2021; Jesse E. Bell et al., 2013) для покращення прогнозів/стратегій температури ґрунту. Такий підхід не тільки сприяє отриманню коректних та достовірних даних, але й забезпечує надійну основу для аналізу та прийняття рішень в агрономії, біології, екології та плануванні використання земельних ресурсів та накопиченні даних для фундаментальних задач ґрунтознавства.

Радіаційний баланс поверхні ґрунту змінюється впродовж доби, залежить від багатьох факторів (Grünberg et al., 2020; Simpson et al., 2022; Draganov, 2015) і є розрахунковим. Температурні умови ґрунту можуть значно відрізнятися залежно від експозиції схилів, та форм рельєфу (Chappell & Chappell, 2021; Nanda et al., 2020; Chen et al., 2020). Як було продемонстровано в нашому аналізі, температура ґрунту на південно-східних експозиціях виявляється систематично теплішою порівняно з плакором, що пов'язано з великою кількістю сонячного випромінювання та вищою інсоляцією протягом дня. Ці умови визначають не тільки більш високі середньодобові температури ґрунту в теплий період, а й прискореному його відтаюванню у весняний період, та частими відлигами в холодні періоди.

Закономірності зміни морфолого-генетичних особливостей ґрунтів та рослинного покриву на схилах різних експозицій, пояснюється відмінностями зволоження щодо плато (Polupan et al., 2015). Північні та північно-східні схили більш «вогі», а південні та південно-східні «сухіші», що впливає на параметри профілю ґрунтів та накопичення у них гумусу. Зрозуміло, що схили різних експозицій частково втрачають вологу атмосферних опадів з поверхневим стоком, проте відмінності у вологозабезпеченні схилових місцеположень обумовлюються, переважно, різним надходженням тепла при «холодних» та «теплих» експозиціях, залежно від їх крутизни та форми. На останніх спостерігаються значні коливання добових температур, тому накопичення снігу менше, сніготанення раніше (Marunych, 1982), у теплий

період року зростають витрати вологи на евапотранспірацію.

Існує певна неоднозначність у визначенні того, наскільки кожна форма рельєфу може отримувати більше або менше теплової енергії порівняно з рівнинними ділянками. Наукові дані вказують, що північні схили можуть отримувати на 5-20% тепла менше, а південні - на стільки ж більше, ніж рівнинні території (Polupan et al., 2011, p. 23). Однак попередні результати дослідження північно-західних та південно-східних схилів призвели до дещо інших висновків, щодо акумуляції тепла, порівняно з рівнинними ділянками. На відміну від південно-східних схилів, ґрунти на північно-західних експозиціях демонструють складнішу динаміку температур. Протягом року спостерігаються як періоди, коли температура цих ґрунтів перевищує показники плакору, так і періоди, коли вони значно холодніші. Це обумовлено: а) локалізацією спостережень у нижній частині схилу, куди «стікає» холодне повітря; б) більшою акумуляцією вологи і менш інтенсивним випаровуванням в теплі періоди року; в) меншою сонячною активністю та тривалим збереженням холоду на глибинах до 30 см і більш тривалим морозним періодом.

Важливим фактором, визначаючим температурний режим ґрунту в зимовий період, є наявність та товщина снігового покриву (Grünberg et al., 2020; Veremeenko et al., 2021) який відіграє вирішальну роль в ізоляції ґрунту, в період від'ємних температур повітря. Аналіз температурних режимів темно-сірого і лучного опідзоленого ґрунту дозволив виявити зміну характеристик промерзання ґрунту, що має пряме відношення до скорочення товщини та стійкості снігового покриву. Глибина промерзання ґрунту істотно зменшилася, складаючи глибину до 30 см залежно від конкретної локації. Крім того, зафіксоване зменшення періодів зі стабільним сніговим покривом, що призводить до збільшення варіабельності умов промерзання та відтаювання ґрунту. Ці зміни у характері снігового покриву та глибини промерзання ґрунту можуть призвести до зміни водного режиму та погіршення умов для відтворення родючості, стану озимої рослинності тощо.

Висновки. Метод прямого вимірювання температури поверхні ґрунту забезпечує неперервний у часі збір даних, виключаючи необхідність проведення розрахунків сумарної радіації дієвої поверхні, що спрощує аналіз термічного режиму ґрунту та підвищує його достовірність.

Найвищі і найнижчі температури та їх коливання, фіксуються на дієвій поверхні (0 см) за всіма формами рельєфу, впродовж I – XII місяців.

Схил південно-східної експозиції характеризується вищими температурами ґрунту порівняно з північно-західним та плакором, найбільш сильно різниця проявляється у поверхневих шарах 0–10 см, з глибиною відбувається певне нівелювання відмінностей.

Різниця у термічному режимі різних схилових місцеположень більш виражена у холодний період року. Нестабільний температурний режим взимку ґрунтів «теплої» експозиції може впливати на формування вологозапасу ґрунтів, як чинника їх відносної короткопрофільності, порівняно з плакором та «холодною» експозицією.

Бібліографічні посилання:

1. Bell, J. E., Palecki, M. A., Baker, C. B., Collins, W. G., Lawrimore, J. H., Leeper, R. D., Hall, M. E., Kochendorfer, J., Meyers, T. P., Wilson, T., & Diamond, H. J. (2013). U.S. Climate reference network soil moisture and temperature observations. *Journal of Hydrometeorology*, 14(3), 977–988. doi: 10.1175/JHM-D-12-0146.1
2. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Adamchuk, V., Gadzalo, J., Nadykto, V., Olt, J., Nowak, J. & Kaminskiy, V. (2022). Dynamics of temperature variation in soil under fallow tillage at different depths. 12(4). doi: 10.3390/agriculture12040450
3. Byanjankar, S., Dhamala, M. K., Maharjan, S. R., & Kayastha, S. P. (2020). Soil respiration and its temperature sensitivity to different ecosystems in Annapurna Conservation Area, Nepal. *Nepal Journal of Environmental Science*, 8 (1), 69–81. doi: 10.3126/njes.v8i1.34471
4. Chappell, C., & Johnson, A. (2021). Comparison of soil moisture, soil temperature, and micro-gradient change influence on CO₂ efflux in three land types within the Blackwater Conservation Area. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 10(2), 1–8. doi: 10.15640/jaes.v10n2a1
5. Chen, X., Li, Y., Chau, H. W., Zhao, H., Li, M., Lei, T., & Zou, Y. (2020). The spatiotemporal variations of soil water content and soil temperature and the influences of precipitation and air temperature at the daily, monthly, and annual timescales in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 429–451.
6. Dafflon, B., Wielandt, S., Lamb, J., McClure, P., Shirley, I., Uhlemann, S., Wang, C., Fiolleau, S., Brunetti, C., Akins, F. H., Fitzpatrick, J., Pullman, S., Busey, R., Ulrich, C., Peterson, J., & Hubbard, S. S. (2022). A distributed temperature profiling system for vertically and laterally dense acquisition of soil and snow temperature. *The Cryosphere*, 16(2), 719–736. doi: org/10.5194/tc-16-719-2022
7. Draganov, B.H. (2015). Pole sonyachnoyi radiatsiyi v roslynnomu pokrovi. [The field of solar radiation in the vegetation cover]. *Promyslova teplotekhnika*, 37 (5), 84–86.
8. Fiorini de Carvalho, A., Fernandes-Filho, E. I., Daher, M., Gomes, L. de C., Cardoso, I. M., Fernandes, R. B. A., & Schaefer, C. E. G. R. (2020). Microclimate and soil and water loss in shaded and unshaded agroforestry coffee systems. *Agroforestry Systems*, 95, 119-134.
9. Gałęzewski, L., Jaskulska, I., Jaskulski, D., Lewandowski, A., Szyplowska, A., Wilczek, A., & Szczepańczyk, M. (2021). Analysis of the need for soil moisture, salinity and temperature sensing in agriculture: a case study in Poland. *Scientific Reports*, 11. doi: 10.1038/s41598-021-96182-1
10. Grünberg, I., Wilcox, E.J., Zwieback, S., Marsh, P., & Boike, J. (2020). Linking tundra vegetation, snow, soil temperature, and permafrost. *Biogeosciences*, 17(16), 4261–4279. doi: 10.5194/bg-17-4261-2020
11. Jarrah, M., Mayel, S., Franko, U., & Kuka, K. (2022). Effects of agricultural management practices on the temporal variability of soil temperature under different crop rotations in Bad Lauchstaedt-Germany. *Agronomy*, 12(5). doi: 10.3390/agronomy12051199
12. Lembrechts, J. J., & Van den Hoogen Jonas, J. (2021). Global maps of soil temperature. *Global Change Biology*, 28(9), 3110–3144. doi: 10.1111/gcb.16060
13. Levintal, E., Ganot, Y., Taylor, G., Freer-Smith, P., Suvocarev, K., & Dahlke, H.E. (2022). An underground, wireless, open-source, low-cost system for monitoring oxygen, temperature, and soil moisture. *Soil*, 8(1), 85–97. doi: 10.5194/soil-8-85-2022
14. Li, M., Wu, P., & Ma, Z. (2020). A comprehensive evaluation of soil moisture and soil temperature from third-generation atmospheric and land reanalysis data sets. *International Journal of Climatology*, 40 (13), 5744-5766. doi: org/10.1002/joc.6549
15. Li, R., Ma, J., Sun, X., Guo, X., & Zheng, L. (2021). Simulation of soil water and heat flow under plastic mulching and different ridge patterns. *Agriculture*, 11 (11). doi: 10.3390/agriculture11111099
16. Liu, P., Wang, H., Li, L., Liu, X., Qian, R., Wang, J., Yan, X., Cai, T., Zhang, P., Jia, Z., Ren, X. & Chen, X. (2020). Ridge-furrow mulching system regulates hydrothermal conditions to promote maize yield and efficient water use in rainfed farming area. *Agricultural Water Management*, 232. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106041
17. Lu, Y., Peng, W., Ren, T., & Horton, R. (2021). Applications of Thermo-TDR sensors for soil physical measurements. *Soil Science - Emerging Technologies, Global Perspectives and Applications*. doi: 10.5772/intechopen.100285
18. Marynych, O. M., Lanko, A. I., Shcherban, M. I., & Shyshchenko, P. H. (1982). *Fizychna heohrafiya Ukrainskoi RSR. [Physical geography of the Ukrainian SSR]. Vyshcha shk., Kyiv, 208.*
19. Nanda, A., Sen, S., Sharma, A. N., & Sudheer, K. P. (2020). Soil temperature dynamics at hillslope scale—field observation and machine learning-based approach. *Water*, 12(3). doi: 10.3390/w12030713
20. Polupan, M.I., Solovei, V.B., Kysil, V.I., & Velychko, V.A. (2005). Vyznachnyk ekolohehenychnoho statusu ta rodiuchosti hruntiv Ukrainy. [Determinant of ecological and genetic status and soil fertility of Ukraine]. *Koloobih*, Kyiv, 304 (in Ukrainian)
21. Polupan, M.I., Baliuk, S.A., Solovei, V.B., Velychko, V.A., & Volkov, P.O. (2011). Pryrodnyi mekhanizm zakhystu skhylovykh hruntiv vid vodnoi erozii / Za red. M.I.Polupana. [Natural mechanism of protection of power soils from water erosion: monograph / edited by Polupana, M.I.]. *Feniks*, Kyiv, 144 (in Ukrainian)
22. Polupan, M.I., Velychko, V.A., & Solovei, V.B. (2015). Rozvytok ukraïnskoho ahronomichnogo hruntoznavstva : henetychni ta vyrobnychi aspekty / za red. doktora s.h.nauk M.I.Polupana. [Development of Ukrainian agronomic soil science: genetic and production aspects / under the editorship of M.I. Polupan, Doctor of Agricultural Sciences]. *Ahrar.nauka*, Kyiv, 400 (in Ukrainian)
23. Simpson, E. G., Fraser, I., Woolf, H., & Pearse, W. D. (2022). Variation in near-surface soil temperature drives plant assemblage insurance potential. *bioRxiv*. The preprint server for biology. doi: 10.1101/2022.11.21.517364

24. Solovei V.B., Trotsenko O.O. (2023). Riznohlybynne doslidzhennia temperaturnoho rezhymu gruntiv tsyfrovymy datchykamy. [Multilevel investigation of soil temperature regime using digital sensor]. *Tavriyskiy naukoviy visnyk. Silskohospodarski nauky*, 131, 211–219 (in Ukrainian). doi: 10.32782/2226-0099.2023.131.27
25. Veremeenko, S., Furmanets, O., Semenko, L., Bykina, N., & Bobkov, V. (2021). Influence of climate changes on hydrothermal regime of dark gray podzolized soil of Western Forest Steppe. *Scientific horizons*, 24(12), 46–54. doi: 10.48077/scihor.24(12).2021.46-54
26. Wang, H., Cao, H., Jiang, F., Wang, X., & Gao, Y. (2022). Analysis of soil moisture, temperature, and salinity in cotton field under non-mulched drip irrigation in South Xinjiang. *Agriculture*, 12(10). doi: 10.3390/agriculture12101589
27. Wang, J., Gao, X., Zhou, Y., Wu, P., & Zhao, X. (2020). Impact of conservation practices on soil hydrothermal properties and crop water use efficiency in a dry agricultural region of the Tibetan plateau. *Soil and Tillage Research*, 200. doi: 10.1016/j.still.2020.104619
28. Wu, S., Wei, Z., Li, X., Wang, H., & Guo, S. (2022). Variation characteristics of soil temperature, moisture, and heat flux in the understorey of evergreen broadleaf forest in South China. *Theoretical and Applied Climatology*, 150, 929–940. doi: 10.1007/s00704-022-04206-1
29. Xia, Z., Zhang, G., Zhang, S., Wang, Q., Fu, Y., & Lu, H. (2021). Efficacy of root zone temperature increase in root and shoot development and hormone changes in different maize genotypes. *Agriculture*, 11 (6). doi: 10.3390/agriculture11060477
30. Yang, W., Wang, Y., He, C., Tan, X., & Han, Z. (2019). Soil water content and temperature dynamics under grassland degradation: a multi-depth continuous measurement from the agricultural pastoral ecotone in Northwest China. *Sustainability*, 11 (15). doi: 10.3390/su11154188
31. Zaszewski, D., & Gruszczyński, T. (2022). Low-cost automatic system for long-term observations of soil temperature. *Geomatics and environmental engineering*, 17(1). doi: 10.7494/geom.2023.17.1.7575
32. Zhang, Z., Pan, Z., Pan, F., Zhang, J., Han, G., Huang, N., Wang, J., Pan, Y., Wang, Z., & Peng, R. (2020). The change characteristics and interactions of soil moisture and temperature in the farmland in Wuchuan county, Inner Mongolia, China. *Atmosphere*, 11(5). doi: 10.3390/atmos11050503
33. Zhao, Y., Mao, X., Shukla, M. K., & Li, S. (2020). Modeling soil water–heat dynamic changes in seed-maize fields under film mulching and deficit irrigation conditions. *Water*, 12 (5). doi: org/10.3390/w12051330

Solovei V. B., PhD (Agricultural Sciences) Agricultural Sciences, Senior Researcher, National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky", Kharkiv, Ukraine

Trotsenko E. A., PhD student, National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky", Kharkiv, Ukraine

Thermal regimes of podzolic soils on sloping and plain locations

The article reflects research on the hydrothermal conditions conducted in various agricultural regions aimed at assessing the influence of these parameters on crop yield and the quality of agricultural products. The research results emphasize the importance of accounting for agroclimatic parameters in modern agriculture to adapt to changing conditions.

It is indicated that the scientific research was conducted in the forest-steppe zone of the Kharkiv region. Monitoring of the temperature regime of dark gray and meadow podzolic soils was carried out at four different sites. The sites include two types of slope exposure: a gentle straight slope with a northwest exposure and a convex slope with a southeast exposure, as well as flat plakor territory and ravine bottom. The main goal of the research was to analyze the annual temperature dynamics of the soil to determine the features of the formation of the thermal regime of these soils under modern climate conditions.

Research methods included the use of thermosensor technology implemented on the Arduino controller, which allowed measuring soil temperature at depths from the soil surface to 120 cm with a step of 10 cm and a 30-minute interval throughout the year. Information was transmitted via the GSM network, and data were stored on a specialized web server in real-time mode. It is noted that the research allowed evaluating changes in temperature regimes at the specified locations.

The paper presents an analysis of temperature fluctuations during warm and cold periods of surface and deep soil layers in different relief conditions throughout the year. Observations were made on short-term freezes and the duration of periods with negative temperatures in different types of terrain. Special attention is paid to comparing minimum temperatures and the duration of freezes on northwest and southeast slopes, plakor, and ravine bottom.

It is established that the lowest and highest temperatures and their fluctuations are recorded on the soil surface. The maximum depth of soil freezing is up to 30 cm on the northwest slope, and the frost period lasts 104 days. The minimum surface soil temperature does not always coincide with the lowest air temperature.

Key words: thermal regimes, dark gray podzolic soils, slopes, soil monitoring, thermosensor, exposure.