

УДК 631.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.131.27>

РІЗНОГЛИБИННЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ГРУНТІВ ЦИФРОВИМИ ДАТЧИКАМИ

Соловей В.Б. – к.с.-г.н., с.н.с.,

завідувач відділу,

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

Троценко О.О. – аспірант,

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

У статті обговорюється актуальність вимірювання температури ґрунту на різних глибинах для розуміння кліматичних змін, ґрунтової екології та сільського господарства, оскільки температура ґрунту впливає на багато ґрунтових процесів: зростання рослин, активність мікроорганізмів, сольовий баланс та розподіл вологи.

Були оцінені переваги і недоліки існуючих приладів вимірювання температури ґрунту, які використовуються у сучасній міжнародній науковій діяльності.

Вказується необхідність використання доступного та якісного приладу/системи для вимірювання температури ґрунту по вертикалі. У дослідженні були виділені основні вимоги та характеристики такого приладу, включаючи точність вимірювань ($\pm 0,5$ °C), низьке енергоспоживання, швидкість вимірювань, стійкість до зовнішніх факторів, простоту встановлення та доступну вартість. Уточнюється, що на даний час в Україні доступний цифровий термодатчик DS18B20, який відповідає заявленим вимогам та характеристикам.

Пропонується алгоритм калібрування – перевірки роботи DS18B20 з можливістю внесення коригувань для компенсації відхилень у роботі цифрового термодатчика.

Автори планують створити прилад/систему для різноглибинного вимірювання температури ґрунту та ґрунтового покриву на сучасному рівні. Прилад складатиметься з поліпропіленової труби діаметром 3,2 см, довжиною 150 і 200 см, пластикового корпусу для мікроконтролера та цифрових датчиків температури DS18B20, розміщених по вертикалі кожні 10 см та датчика, на гнучкому дроті, для вимірювання температури на поверхні ґрунту. Мікроконтролер Arduino буде використовуватися для керування датчиками, а дані зберігатимуться на веб-сервер у вигляді бази даних.

Планується проведення польового тестування на 4 закладених ділянках з різною експозицією, які відрізняються за термічним режимом ґрунтів, для аналізу часових рядів температур, на різній глибині ґрунту за різних умов рельєфу.

Вказується, що інструмент є сучасним методом для різноглибинних, польових досліджень теплових режимів ґрунтів та ґрунтового покриву, з мінімальним його порушенням при встановленні та експлуатації приладу.

Ключові слова: клімат, моніторинг ґрунту, вимірювання температури ґрунту, температурний датчик DS18B20, автоматизація сільського господарства.

Solovei V.B., Trotsenko E.A. Multilevel investigation of soil temperature regime using digital sensor

The article discusses the relevance of measuring soil temperature at different depths for understanding climate change, soil ecology, and agriculture, as soil temperature influences many soil processes: plant growth, microbial activity, salt balance, and moisture distribution.

The advantages and disadvantages of existing soil temperature measuring devices, used in modern international scientific activity, were evaluated.

The need for a reliable and affordable device/system for measuring soil temperature vertically is emphasized. The study outlined the main requirements and characteristics of such a device, including measurement accuracy (± 0.5 °C), low power consumption, measurement speed, resistance to external factors, ease of installation, and affordable cost. It is clarified that currently in Ukraine, the digital temperature sensor DS18B20, meeting the stated requirements and characteristics, is available.

A calibration algorithm is suggested – a check of the DS18B20 operation with the possibility of making adjustments to compensate for deviations in the digital temperature sensor's operation.

The authors plan to create a device/system for depth-variable measurement of soil temperature and soil cover at a modern level. The device consists of a polypropylene pipe with a diameter of 3.2 cm, a length of 150 and 200 cm, a plastic case for the microcontroller, and DS18B20 digital temperature sensors placed vertically every 10 cm, and a sensor on a flexible wire to measure surface soil temperature. An Arduino microcontroller will be used to control the sensors, and the data will be stored on a web-server in the form of a database.

Field testing is planned on 4 established sites with different exposure, differing in soil thermal regime, for the analysis of temperature time series, at different soil depths under different topographic conditions.

It is indicated that the tool is a modern method for depth-variable field studies of soil and soil cover thermal regimes, with minimal disturbance during the installation and operation of the device.

Key words: *climate, soil monitoring, soil temperature measurement, DS18B20 temperature sensor, agriculture automation.*

Постановка проблеми. Вимірювання температури ґрунту (*ВТГ*) на різних глибинах є цінним інструментом для розуміння багатьох аспектів кліматичних змін, насамперед глобального потепління, ґрунтової екології та сільського господарства. Температура ґрунту впливає на ряд процесів, таких як зростання рослинної маси, активність ґрунтових мікроорганізмів, сольовий баланс, розподіл вологи в ґрунті. Крім того, *ВТГ* дає один із ключів до розуміння механізмів міграції карбонатів кальцію у ґрунті – одного з важливих елементів, що впливає на родючість та структуру ґрунту. Пульсаційно-міграційний характер «життя» карбонатів кальцію у ґрунті, певною мірою, може підвищувати родючість верхніх шарів ґрунту, що, у свою чергу, може впливати на врожайність сільськогосподарських культур.

Локалізовані вимірювання температури ґрунту необхідні для кількісної оцінки перенесення тепла, що є необхідною опцією, для кращого розуміння властивостей та процесів, які відбуваються у ґрунті.

Один із методів вирішення розглянутої проблеми – безпосередній вимір температури ґрунту на місцях, у реальному часі, для подальшого накопичення статистично вірних даних, що є одним із завдань спостереження за навколишнім середовищем, яке зайшло відображення в нормативних документах [1]. Реалізація цього напряму дозволить накопичувати дані температур для моніторингу ґрунтів, як одного з елементів систематичних спостережень, що дозволяє отримати найбільш повну схему ґрунтових процесів та їх змін у часі. Дане розуміння дозволить отримати більш точне уявлення про вплив мінливого клімату на процеси, що відбуваються в ґрунті, і розробити дієві стратегії щодо збереження екосистем ґрунтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх публікацій, що описують дослідження в галузі, яка розглядається, дозволив зробити висновок про розуміння даної проблеми і роботи в напрямку реалізації методів вимірювань і накопичення даних температурних режимів ґрунтів, для подальшої систематизації та аналізу.

Роботи, що проводяться в цьому напрямі, мають як наукове, так і прикладне значення і часто напрямки доповнюють один одного.

До таких сучасних робіт можна віднести роботи з вимірювання та аналізу температури ґрунту в різнофакторних конфігураціях. До цікавих напрямків: динаміка температури ґрунту за певних умов вологості та рослинного покриву [2, 3]. В цих дослідженнях використовувались зондова система Decagon Devices 5TE, яка вимірює вологість та температуру ґрунту, електропровідність та ґрунтовий датчик Stevens Hydra Probe II (вимірює температуру та вологість ґрунту,

електропровідність). Динаміку температури ґрунту за різних умов випадання опадів (інтенсивність і тривалість опадів) та за різними формами рельєфу [4]; використовували зондову систему Decagon Devices 5TM (вимірює тільки температуру та вологість ґрунту).

Тестування зондових систем групи Decagon Devices, в період польових досліджень, показало їх відповідність заявленим технічним характеристикам (похибка даних оцінювалася в межах 3%), що дозволило їх використовувати відповідно до поставлених завдань, було вказано їх застосування на глибині до 60 см, та тільки на досліджуваних ділянках. До переваг можна віднести їх багатофункціональність (вимірювання двох та трьох параметрів ґрунту), високу точність вимірювань. На нашу думку, є ряд суттєвих обмежень, до яких можна віднести складності у використанні (вимагають певного рівня технічних знань для використання та інтерпретації даних), необхідності в регулярному обслуговуванні. Самим великим недоліком зондових систем Decagon Devices є ціна за одиницю, особливо коли необхідна велика кількість датчиків для великомасштабних досліджень/проектів.

Ґрунтовий датчик Stevens Hydra Probe II, з технічної точки зору, нарікань не мав, та показав можливість свого використання в сільськогосподарських та кліматологічних дослідженнях. До переваг відноситься одночасне вимірювання трьох параметрів, висока точність вимірювань, стійкість до корозії. До недоліків відноситься складність інтерпретації даних з Hydra Probe II (необхідно мати певні знання та досвід), регулярне обслуговування, при дуже сухих середовищах, можливі обмеження у вимірах. Широке його застосування, особливо в країнах, що розвиваються, ускладнюється вартістю датчика Hydra Probe II, яка занадто недемократична.

Порівняння роботи двох датчиків: датчика TDR-315L (вимірює температуру ґрунту, об'ємний вміст води, діелектричну проникність, електропровідність ґрунту) та ґрунтового датчика Stevens Hydra Probe II для оцінки їх продуктивності, у різних ґрунтових умовах, проводились для мережі довгострокового моніторингу USCRN [5], оскільки були зафіксовані збої в роботі датчиків Stevens Hydra Probe II (у період з 2014 по 2017 роках, близько 30%). Результати досліджень Bell J. E. та інших, показали, що температури ґрунту обох датчиків були коректними при різних типах ґрунту. По частоті виходу з ладу: датчики TDR-315L виходили з ладу частіше, але, в цілому, була дана позитивна рекомендація до їх використання, оскільки показання, що знімалися, були однакові (у порівнянні з існуючими датчиками Stevens HydraProbe II) або з допустимою похибкою. В цілому, в системі кліматичної довідкової мережі, використані пристрої, показали можливість свого застосування для систематичних спостережень на національному рівні. Просторове розміщення датчиків, по всій території США, говорить про можливе розміщення приладів за різною топографією місцевості та на різних типах ґрунту. Основним недоліком даних датчиків, на нашу думку, є їх висока вартість, яка недоступна для більшості представників середнього та малого бізнесу, а також пересічному користувачу та науковцю.

До авторських проектів належить ряд цікавих розробок. Система LoRa-WUSN, була розроблена для вимірювання вологості, температури та рівня кисню в ґрунті [6]. Вологість та температуру ґрунту вимірювали зондовою системою Decagon Devices 5TM. Загалом, група розробників, на чолі з Levintal E. вважали, що змогли надати споживачеві кінцевий працюючий, недорогий продукт, який може використовуватися для точного землеробства на невеликих площах (садах) та інших комерційних напрямках (гольфіві поля, міські парки).

На нашу думку, до недоліків даної розробки відноситься недостатня дальність між підземними боксами (де розміщуються датчики) і приймаючим центром (50–200 м), зі збільшенням відстані якого зростає кількість недоставлених пакетів даних. Трудомістке встановлення кожного підземного боксу та його обслуговування. Використання розробленої системи в сільському господарстві на орних полях недоцільно, оскільки є ймовірність пошкодження системи важкою сільсько-господарською технікою.

Система DTP, яка дозволяє вертикальне вимірювання температурних режимів ґрунту, потужність мерзлого/талого шару, визначення теплових параметрів і потоків снігового покриву [7], складається з цифрових датчиків температури – TMP117 та іншого технічного навантаження. Dafflon B. та інші вчені проводили апробацію в різних умовах та середовищах, у тому числі в гірському середовищі, на крутих схилах пагорбів, на різних ґрунтах та у місцях з підвищеним ризиком. Загалом система DTP задовольняє потреби в точності даних, мінімальному енергоспоживанні, забезпечуючи прогрес у багаторівневому розумінні гідробіогеохімічних процесів у ґрунті. Система DTP має один великий недолік – це його висока вартість за одиницю.

Термо-TDR (Time Domain Reflectometry) – це сучасна технологія, яка використовується для вимірювання температури та вологості ґрунту. Заснована на принципі вимірювання часу, необхідного для відображення електромагнітного сигналу, що проходить через ґрунт, що і дозволяє визначити рівень вологості. Разом з тим, температура вимірюється за допомогою вбудованих термісторів.

До переваг цієї технології можна віднести високу точність та стабільність вимірювань, можливість одночасного визначення вологості та температури ґрунту, а також можливість використання у широкому діапазоні умов ґрунту. Але, на нашу думку, є багато недоліків, до яких відносяться складність встановлення та калібрування датчиків. Також, не було згадок, щодо вимірювань в дуже сухих, або дуже вологих середовищах. Крім того, вартість датчиків термо-TDR дуже суттєва, що і обмежує їхнє широке застосування. Подальше удосконалення цієї технології [8], призвело до збільшення вимірювальних показників. Lu Y. та інші, пропонують наступні можливості: змінні стани ґрунту (температуру, вміст льоду та води), теплові та електричні властивості (теплоємність, температуропровідність, теплопровідність та об'ємну електропровідність), структурні параметри (насіпна щільність та пористість, заповнена повітрям) та потоки (тепло, вода та пара) одночасно. Незважаючи на успішність реалізації проекту, розробка має ряд недоліків: складність виготовлення самих датчиків та спроба в одному пристрої реалізувати великий комплекс вимірів, адже чим складніше пристрій і більше вимірюваних параметрів, тим вище ймовірність помилок, при вимірюванні тих чи інших параметрів і нижче надійність пристрою. У роботі не було уточнень, як «поводиться» пристрій, при виході з ладу одного з компонентів. Удосконалені датчики термо-TDR не завжди доступні у продажу, та, в цілому, скоріше виготовлюються «на замовлення».

Платиновий датчик температури PT1000 використовувався для вимірювання температури ґрунту в рамках дослідження впливу різних методів аграрного управління на тимчасову мінливість температури ґрунту у межах різних схем сівозміни [9]. Jagrah M. та іншими було зазначено, що використаний датчик забезпечує точність даних у широкому діапазоні температур (похибка складає менше 5%, що вважається задовільним показником). До недоліків можна віднести деяку інерцію

у відгуку на зміни температури, особливо при швидкій зміні, що може бути недо-ліком у деяких додатках, де потрібний миттєвий відгук.

Всі наведені приклади широко використовуються в науково-дослідних роботах на міжнародному рівні, проте для вітчизняного простору вартість даних приладів є надто недемократичною, що й викликає деякі труднощі в реалізації моніторин-гових спостережень за температурою ґрунтів.

На вітчизняному ринку є деяка кількість вимірювальних, самореструючих, точкових вимірювачів температури ґрунту. Ця група інструментів, для побуто-вого використання, характеризується не високою точністю вимірювань, низькою якістю виготовлення і, загалом, неможливістю, з їх допомогою, здійснювати спо-стереження цілорічно та системно.

Тому дослідження у напрямку сучасних методів/методик вимірювання/накопи-чення/аналізу даних температури ґрунтів є актуальним питанням для наукового та агропромислового сектору України.

Постановка завдання. Систематизувати вихідні дані щодо вимог до приладу з вивчення термічних режимів ґрунтів й ґрунтового покриву та визначити пер-спективність використання сучасних цифрових датчиків.

Виклад основного матеріалу дослідження. Моніторинг споживчого ринку та комерційної пропозиції, дозволив зробити висновок про необхідність викори-стання доступного (за ціною та якістю) вимірювального приладу/системи. При-лад, що вимірює температуру ґрунту по вертикалі, повинен відповідати наступ-ним вимогам та характеристикам:

1. Точність вимірювань ($\pm 0,5$ °C).
2. Невисоке енергоспоживання (до 0,5 Вт/добу, при 48 вимірах на добу).
3. Швидкість вимірів (від 0,5 секунд/вимір).
4. Достатня кількість робочих циклів вимірювань на одному заряді акумуля-тора, якого буде достатньо на вегетаційний сезон.
5. Бюджетна вартість електронного датчика температури (до 100 гр. за одиницю).
6. Стійкість до впливу зовнішніх факторів довкілля (інструмент з всім наван-таженням має бути всесезонним).
7. Ремонтопридатність (вартість ремонту не більше ніж 1/6 від загальної вартості).
8. Легка транспортабельність та мобільність приладу (вага до 3 кг).
9. Простота в установці (мінімальна кількість простих допоміжних приладів для установки, наприклад – ґрунтовий бур).
10. Кінцева вартість приладу до 30 тисяч гривень.

В результаті проведеної роботи встановлено, що в даний момент в Україні, доступний температурний датчик – DS18B20, який відповідає вимогам та харак-теристикам відповідним до пункту 1–6.

DS18B20 – це цифровий термодатчик, який надає точні дані (точність вимірю-вань датчика DS18B20 становить $\pm 0,5$ °C для температур у діапазоні від -55°C до +125°C) про температуру з мінімальними спотвореннями. В основі датчика зна-ходиться напівпровідниковий діод. Використання діода як датчика температури, можливе через його принцип роботи – залежності зворотного струму від темпе-ратури (струм у навантаженні залежить від температури), що дозволяє проводити температурні вимірювання ґрунту в реальному часі.

Термодатчик DS18B20 калібрується на заводі, де використовуються спеціалізо-вані еталонні термостати та обладнання для перевірки та налаштування кожного

датчика, тому, зазвичай, немає необхідності в додатковому калібруванні. Цей процес не може бути повторений в побутових умовах або у звичайній лабораторії без спеціалізованого обладнання.

Проте, для уточнення даних, ми можемо перевірити його роботу, порівнявши з іншим відомим та надійним джерелом вимірювання температури, наприклад, електронним термодатчиком DS18B20, що пройшов калібрування у метрологічному центрі ДП «Харківстандартметрологія», або традиційним ґрунтовим термометром Савінова.

Під час «калібрування» термодатчика DS18B20 у не заводських (або метрологічному центрі) умовах, пропонуємо порівнювати його з іншим датчиком і вносити коригування, таким чином, компенсуючи можливе відхилення від початкового калібрування. Це допомагає покращити точність нашого пристрою, але це не рівнозначно формальному калібруванню пристрою.

«Калібрування» зазвичай відноситься до процесу порівняння показань вимірювального приладу з еталонним стандартом. Цей процес забезпечує точність та відтворюваність вимірювань. Після «калібрування» пристрій може справно працювати в межах заданого діапазону та із заданою точністю.

Ось загальний процес перевірки роботи DS18B20 який ми пропонуємо:

1. Підключення датчика DS18B20 до мікроконтролера Arduino згідно зі схемою підключення (від виробника).
2. Завантаження в мікроконтролер коду для початку роботи з накопичення та візуалізації даних з датчика.
3. Підключення еталонного термодатчика до того ж мікроконтролера Arduino.
4. Порівняння показань двох датчиків за різних температур в побутових умовах. При виявленні стабільного відхилення між двома датчиками, пропонується вносити коригування програмного забезпечення, щоб компенсувати це відхилення, адже це компенсація помилки, а не справжнє калібрування у класичному розумінні цього терміна.

Якщо термодатчик DS18B20 дає показання зі значним відхиленням або його показання скачуть, вважаємо його пошкодженим та не використовуємо у роботі.

Щоб перевірити отримані дані на аномалії, пропонуємо використовувати статистичний метод Зет-оцінки. Зет-оцінка (стандартизована оцінка) визначає, наскільки конкретне спостереження відхиляється від середнього значення в одиницях стандартного відхилення. Для кожного виміру ми обчислюємо Зет-оцінку, використовуючи формулу:

$$\text{Зет} = (X - \mu) / \sigma,$$

де: X – це вимір,

μ – середнє значення всіх вимірів,

σ – стандартне відхилення всіх вимірів.

Вимірювання з Зет-оцінкою більше 0,5 або менше -0,5 будемо вважати аномальними (+/- 0,5 – це точність вимірювань згідно з технічними характеристиками термодатчика DS18B20).

Стандартне відхилення – це міра, яка показує, наскільки сильно значення набору даних відхиляються від середнього значення.

Обчислення стандартного відхилення для вибірки пропонуємо робити за такою схемою:

1. Обчислюємо середнє значення (μ) даних. Для цього складаємо всі виміри та ділимо на кількість вимірів.

2. Віднімаємо середнє значення з кожного вимірювання та зведемо результат у квадрат. Це дає «квадрат відхилення» для кожного виміру.

3. Знаходимо середнє значення цих квадратів відхилення (дисперсію).

4. Знаходимо квадратний корінь з дисперсії для отримання стандартного відхилення. У формулі:

$$\sigma = \sqrt{[(\Sigma(x_i - \mu)^2) / N]},$$

де: x_i – кожен вимір у наборі даних,

μ – середнє значення набору даних,

Σ – знак суми, що означає складання всіх значень,

N – кількість вимірювань у наборі даних,

Це буде стандартне відхилення для вибірки.

Стандартне відхилення вимірів дає уявлення про коливання вимірів навколо середнього значення. За такою схемою вимірювань пропонуємо коригувати роботу всіх термодатчиків DS18B20, які можуть використовуватись в подальшому.

Автори мають намір провести роботу зі створення приладу/системи для вимірювання температури ґрунту та ґрунтового покриву на сучасному рівні.

Прилад, для вимірювання температури ґрунту, плануємо скласти з поліпропіленової труби діаметром 3,2 см, довжиною 150 та 200 см (два варіанта довжини приладу) та пластикового корпусу для мікроконтролера, батарей та іншого навантаження. Вимірювання температури ґрунту, плануємо проводити за допомогою цифрових датчиків температури DS18B20, розміщених по вертикалі інструменту кожні 10 см, з'єднані за принципом 1-Wire технології. Вибір розміщення датчиків температури кожні 10 см спирається на засади по відборі ґрунту для визначення польової вологості ґрунту згідно (ДСТУ ISO 11465-2001) [10], оскільки в науковій роботі досліджується температура і вологість ґрунту. Кожен інструмент планується оснастити 13 датчиками температур, які будуть вимірювати температуру ґрунту на глибинах 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 см та один датчик температур на гнучкому дроті на поверхні ґрунту (0 см). Кожен датчик DS18B20 буде підключений до Arduino контролера за допомогою системи дротів. Джерело живлення постійного струму – літій-іонний акумулятор.

Планується використання мікроконтролера Arduino, як платформи для розробки програмного забезпечення, що забезпечить додаткову автоматизацію процесу управління та збору вимірюваних даних температури ґрунту. У приладі/системі мікроконтролер Arduino буде використовуватись для управління термодатчиками DS18B20. Використання мікроконтролерів серії Arduino дозволить встановити необхідну періодичність вимірювань температур, які можуть змінюватись від 1 хвилини до декількох годин.

Для організації сховища даних, планується створення сайту та бази даних, на налаштованому веб-сервері, який буде приймати дані у реальному часі та зберігати їх у вигляді бази даних. Така форма передачі даних, організованих у вигляді сайту та бази даних, дозволить забезпечити довгострокове зберігання даних, отриманих з пристроїв, які розміщені на досліджуваних територіях.

Польове тестування приладів здійснюється на двох схилах: північно-західній та південно-східній експозиції, відносно плоскій ділянці (плакор) та на днищі балки. Вибір ділянок з різною експозицією не випадковий, оскільки відомо, що південні схили отримують від 5–20% більше тепла (залежно від їхньої форми та крутості), а північні, настільки ж менше [11, с. 13]. Усі випробувальні ділянки

мало віддалені, відкриті, під різнотравною рослинністю. Ґрунти: на плакорі – темно-сірій опідзоленій важкосуглинковій на лесі, на схилах – темно-сірій опідзоленій слабозмитій (слабоксероморфній) важкосуглинковій на лесі, у днищі балки – лучний глибокслабосолонцюватий важкосуглинковий на делювіальних відкладах. Досліджувані темно-сірі опідзолені ґрунти плакорного і схилового місцеположень характеризуються різною глибиною лінії закипання карбонатів кальцію від 10% HCl, що відображає їх відмінність у гідротермічному режимі.

На кожній ділянці встановлено перспективні прилади для вимірювання температури ґрунту, які будуть реєструвати варіювання температур у 30-хвилинних інтервалах, для подальшого аналізування часових рядів безперервних температур на різній глибині ґрунту, за різних умов рельєфу.

Висновки і пропозиції. Розроблений прилад, для вимірювання температури ґрунту, буде мати низку переваг перед іншими методами (термометр Савінова), що використовуються:

1. Встановлено можливості існуючих приладів для вимірювання температури ґрунту, які використовуються у сучасній міжнародній практиці.

2. Визначено вимоги до сучасного приладу вимірювання температури ґрунту, які характеризують вимоги до цифрового датчика, загальних технічних характеристик приладу, його вартості і особливостей використання та встановлення.

3. Визначено доступний цифровий датчик DS18B20, який буде у складі приладу, забезпечуючи точність в межах $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, що є точнішим, ніж аналогові термометри.

4. Для перевірки отриманих даних запропоновано метод Зет-оцінки, розроблено алгоритм її здійснення.

5. Закладено 4 тестові майданчики на плакорі, схилах «холодної» і «теплої» експозиції та днище балки, ці місцеположення відрізняються за термічним режимом ґрунтів, що знаходять відображення у різноглибинному заляганні карбонатів кальцію у профілі.

6. Прилад/система надає цифрові дані (в температурному діапазоні від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$), які накопичуються за допомогою комп'ютера, з можливістю подальшого запису та аналізу даних у відповідній базі даних (створена в СКБД – системі керування базами даних, MS SQL Express).

7. Використання розробленого приладу, дозволяє проводити польові дослідження теплових режимів ґрунтів (від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$) з мінімальним порушенням ґрунту (при свердловині, діаметром 3,2–3,5 см та глибиною 120 см – $0,0011 \text{ м}^3$ ґрунту) при встановленні та експлуатації, з виключення помилок при вимірюванні, пов'язаних з людським фактором (в приладі 100% вимірювань зберігаються на мікроSD карті).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 23 березня 2021 року «Про виклики і загрози національній безпеці України в екологічній сфері та першочергові заходи щодо їх нейтралізації»: Указ Президента України від 23.03.2021 р. № 111/2021. *Урядовий кур'єр*. 2021. 25 бер. (№ 57).

2. Wenjing Yang [et al]. Soil water content and temperature dynamics under grassland degradation: a multi-depth continuous measurement from the agricultural pastoral ecotone in northwest China. *Sustainability*. 2019. Vol.11(15). URL: <https://doi.org/10.3390/su11154188> (дата звернення 04.10.2022 р.).

3. Zhang Z. [et al]. The change characteristics and interactions of soil moisture and temperature in the farmland in wuchuan county, Inner Mongolia, China. *Atmosphere*.

2020, Vol.11(5). URL: <https://doi.org/10.3390/atmos11050503> (дата звернення 07.10.2022 р.).

4. Nanda A. [et al]. Soil temperature dynamics at hillslope scale–field observation and machine learning-based approach. *Water*. 2020. Vol.12(3). URL: <https://doi.org/10.3390/w12030713> (дата звернення 17.10.2022 р.).

5. Bell J. E. [et al]. U.S. Climate reference network soil moisture and temperature observations. *Journal of Hydrometeorology*. 2013. Vol. 14(3). P. 977-988. URL: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0146.1> (дата звернення 14.10.2022 р.).

6. Levintal E. [et al]. An underground, wireless, open-source, low-cost system for monitoring oxygen, temperature, and soil moisture. *SOIL*. 2022. Vol. 8(1). P. 85–97. URL: <https://doi.org/10.5194/soil-8-85-2022> (дата звернення 06.10.2022 р.).

7. Dafflon B. [et al]. A distributed temperature profiling system for vertically and laterally dense acquisition of soil and snow temperature. *The Cryosphere*. 2022. Vol. 16(2). P. 719–736. URL: <https://doi.org/10.5194/tc-16-719-2022> (дата звернення 09.10.2022 р.).

8. Lu Y. [et al]. Applications of Thermo-TDR sensors for soil physical measurements. *Soil Science – Emerging Technologies, Global Perspectives and Applications*. 2021. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/78936> (дата звернення 08.10.2022 р.).

9. Jarrah M. [et al]. Effects of agricultural management practices on the temporal variability of soil temperature under different crop rotations in bad Lauchstaedt-Germany. *Agronomy*. 2022. V.12(5). URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy12051199> (дата звернення 05.10.2022 р.).

10. ДСТУ ISO 11465-2001. Якість ґрунту. Визначення сухої речовини та вологості за масою. Гравіметричний метод (ISO 11465:1993, ІДТ). [Чинний від 2001-12-28]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 7 с.

11. Полупан М.І., Балюк С.А., Соловей В.Б., Величко В.А., Волков П.О. Природний механізм захисту силових ґрунтів від водної ерозії : монографія / за ред. М.І. Полупана. – К.: Фенікс, 2011. 144 с.