УДК 581.1:528.8:004.9
DOI https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.151.57

ОЦІНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО СТРЕСОВОГО СТАНУ ДЕРЕВ ЗА ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ОБРОБКИ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ ЗНІМКІВ У ПРОГРАМІ QGIS

Цицюра Я.Г. *– к.с.-г.н.,*
доцент кафедри землеробства, грунтознавства та агрохімії,
Вінницький національний аграрний університет
orcid.org/0000-0002-9167-833X

Послідовний розвиток фотограмметричних підходів до індикації фізіологічного стану рослин різної тривалості життя та ареалу поширення сформував перспективи застосуання просторових геолокаційних програм фотограмметричного та телеметричного характеру з кінцевою метою їх ефективної адаптації для визначення адаптивності та загального стресового стану рослин в однорічних та багаторічних агро- та біоценозах. Одним із таких підходів є тепловізійні методи аналізу термографічних цифрових зображень рослин направлені на оцінку таких важливих фізіолгічних функцій як транспірація, стан вологозабезпечення, інтенсивність дихання та теплова дія певного діапазону температур. Застосуання таких підходів дозволяє оцінити оптимальність агротехнологічних параметрів створеного агрофітоценозу або ж природнього ценозу багаторічного храктеру з позиції густоти стояння, освітленості, ярусності розміщення, правильності формування крони та багато інших показників.

У статті наведено результати досліджень можливості оцінки тесператрного стресу рослин яблуні на основі обробки тепловізійних цифрових знімків крони дерев у різних місцях шпалерного ряду саду за фронтально-рядного відображення площини крони за пікового значення денних температур повітря у критичний період яблуні – період активного плодоношення з формуванням плодів середнього ярусу крони.

Для досліджень було використано фрейм програми QGIS з адаптованою системою обробки растрових термографічних зображень крони дерева отриманих за рахунок використання тепловізора на базі безпілотного літального апарата DJI Mavic 3 Thermal з тепловізійним сенсором 640 × 512 пікселів.

Встановлено, що тепловізійна температура є непрямим індикатором фізіологічного стану, оскільки на неї одночасно впливають транспірація, водний статус, сонячна радіація, вітер, вологість повітря та архітектура крони. Застосування програми QGIS дозволило визначити усереднений індекс температурного стресу (ITS) для кожної окремої крони дерева на знімках а також оцінити загальну неоднорідність тесператрного стресового поля крон дерева яблуні у різних місцях локації фітоценозу плодового саду. За рахунок поєднання термографічного грід аналізу зображення тепловізора оцінено розподіл стресовго температурного поля та зроблено повну деталізації частки температурних полів з наростаючим інтервалом температур у межах крони та ідентифіковано стресові проблемні поля дерева з позиції нормальності або ж анормальності протікання базових продуктивноформуючих фізіологічних процесів. Такий підхід дозволив чітко ідентифікувати фізіологічний температурний стан кожного окремого дерева, що у перспективі дозволить застосовувати індивідуальні коректуючі агротехнологічні заходи для оптимізації означеного стану рослин за рахунок зокрема додаткової обрізки, поливу та інших мірроприємств.

Ключові слова: *програма QGIS, тепловізор, термографія цифрових зображень, фотограмметрія, дистанційний моніторинг, температурний стрес.*

© Цицюра Я.Г., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Tsytsiura Ya.G. Assessment of the temperature stress status of trees using a thermal-imaging photogrammetric image processing method in QGIS

The progressive development of photogrammetric approaches for assessing the physiological status of plants with different life spans and distribution ranges has opened up new prospects for the application of spatial geolocation software based on photogrammetric and telemetry technologies, with the ultimate goal of effectively adapting these tools to assess plant adaptability and overall stress status in annual and perennial agro- and biocenoses. One such approach involves thermal imaging methods for analysing digital thermographic images of plants, aimed at assessing important physiological functions such as transpiration, water status, respiration intensity, and the thermal effects of specific temperature ranges. The application of these approaches makes it possible to evaluate the suitability of agronomic parameters of established agro-phytocenoses or natural perennial plant communities in terms of plant density, light availability, vertical stratification, crown architecture, and numerous other indicators.

The article presents the results of a study assessing the feasibility of determining temperature stress in apple trees based on the processing of thermal digital images of tree crowns obtained at different locations within a trellised orchard row. The study used frontal row-oriented imaging of the crown plane during peak daytime air temperatures in a critical period of apple development-active fruiting, when fruits were developing in the middle crown layer.

The research was conducted using the QGIS software framework with an adapted system for processing raster thermographic images of tree crowns obtained using a thermal imaging camera mounted on a DJI Mavic 3 Thermal unmanned aerial vehicle, equipped with a 640 × 512 pixel thermal sensor.

It was established that thermal imaging temperature is an indirect indicator of physiological status, as it is simultaneously affected by transpiration, plant water status, solar radiation, wind, air humidity, and crown architecture. The application of QGIS made it possible to determine the averaged Temperature Stress Index (TSI) for each individual tree crown in the images and to assess the overall spatial heterogeneity of the temperature-stress field of apple tree crowns at different locations within the fruit orchard phytocenosis. By combining thermographic grid-based image analysis with QGIS spatial processing, the distribution of temperature-stress patterns was assessed, while the proportions of temperature fields across progressively increasing temperature intervals within the crown were fully quantified. Stress-prone areas of the tree crown were identified in terms of normal or abnormal functioning of the basic physiological processes responsible for productivity formation. This approach enabled the clear identification of the physiological thermal status of each individual tree and, in the future, may facilitate the implementation of site-specific corrective agronomic measures to optimise plant physiological status, including additional pruning, irrigation, and other management practices.

Key words: *QGIS software, thermal imaging camera, digital image thermography, photogrammetry, remote monitoring, temperature stress.*

Постановка проблеми. Сучасні зміни клімату, збільшення частоти температурних екстремумів, нерівномірність атмосферних опадів та посилення посушливих періодів зумовлюють необхідність удосконалення методів оцінювання фізіологічного стану деревних рослин. Особливого значення це набуває для плодових насаджень, лісових екосистем, міських зелених насаджень та інтродукційних колекцій, де своєчасне виявлення початкових проявів стресу дає змогу перейти від реактивного до превентивного управління станом рослин.

Традиційні методи оцінювання стресу дерев – визначення водного потенціалу листків, стоматичної провідності, вологості ґрунту, інтенсивності фотосинтезу, вмісту пігментів, візуальної оцінки дефоліації та пошкоджень – забезпечують важливу фізіологічну інформацію, проте переважно характеризуються точковістю, значними витратами праці та обмеженою можливістю одночасного обстеження великої кількості дерев. Теплова інфрачервона зйомка, навпаки, дає змогу отримувати просторово розподілену інформацію про температуру листкової поверхні та крони без безпосереднього контакту з рослиною [1, с. 107–163; 2, с. 4671–4672].

Фізіологічною основою використання температури поверхні рослин як індикатора стресу є взаємозв’язок між транспірацією, роботою продихів і тепловим

балансом листка. За достатнього водозабезпечення активна транспірація сприяє відведенню прихованої теплоти й охолодженню листкової поверхні. За дефіциту води відбувається часткове або повне закриття продихів, інтенсивність транспірації знижується, а температура листків і крони може підвищуватися відносно температури повітря [2, с. 4673; 3, с. 1–3; 4, с. 57–58; 5, с. 209–219]. Саме ця закономірність лежить в основі широкого застосування інфрачервоної термографії для виявлення водного стресу.

Перші фундаментальні підходи до оцінювання водного стресу за температурою рослин були сформовані на основі концепції температури крони та її різниці з температурою повітря. Jackson et al. запропонували використовувати температуру крони в системі розрахунку Crop Water Stress Index (CWSI), пов'язуючи її з фактичним та потенційним випаровуванням [6, с. 1133–1135; 7, с. 467–468]. Подальший розвиток цього підходу продемонстрував можливість застосування тепловізійної інформації не лише для загальної характеристики водного режиму, а й для кількісної оцінки просторової неоднорідності фізіологічного стану рослин.

Температурний сигнал пов'язаний не тільки з водним забезпеченням. Він відображає сукупний вплив сонячної радіації, температури та вологості повітря, швидкості вітру, структури крони, кута опромінення, положення листків, їхньої орієнтації, емісивності поверхні та властивостей фону [2, с. 4673; 8, с. 2250–2251; 9, с. 723–724]. Тому сучасна термографія рослин дедалі більше орієнтується не на просте визначення максимальної температури, а на просторовий аналіз температурного поля крони та його нормування щодо метеорологічних умов і фізіологічних контрольних показників.

Особливо перспективним є використання безпілотних літальних апаратів, обладнаних тепловізійними камерами. Висока просторова роздільна здатність таких даних дає можливість переходити від аналізу середньої температури масиву до індивідуального дерева, окремої крони або навіть її внутрішніх структурних зон. У дослідженнях плодових культур було показано, що дерева за обмеженого водозабезпечення можуть характеризуватися статистично вищою температурою крони, причому величина відмінностей пов'язана зі ступенем водного дефіциту [10, с. 5430–5431; 11, с. 160–161].

Сучасні роботи також демонструють можливість поєднання теплових даних з RGB-, мультиспектральними та LiDAR-даними. Така інтеграція дає змогу відокремлювати власне рослинну поверхню від ґрунту, тіней та інших об'єктів і тим самим підвищувати достовірність температурних характеристик окремих дерев [12, с. 50; 13, с. 5–6; 14, с. 2].

Отже, тепловізійна інформація може розглядатися як своєрідний просторовий фізіологічний індикатор, що дозволяє перейти від традиційного описового оцінювання стану дерев до картографування неоднорідності їхнього стресового навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попри значний прогрес у застосуванні інфрачервоної термографії, проблема об'єктивної оцінки стресового стану дерев за тепловими знімками залишається методично складною. Основна причина полягає у тому, що підвищення температури крони не є специфічною ознакою виключно водного стресу. Подібна температурна реакція може бути пов'язана із закриттям продихів під дією високої температури та атмосферної посухи, ураженням патогенами, пошкодженням кореневої системи, дефоліацією, змінами структури крони або іншими біотичними й абіотичними чинниками [4, с. 57; 15, с. 3–4; 16, с. 2].

Особливо важливо враховувати, що температура крони формується під одночасним впливом рослини та навколишнього середовища. Maes і Steppe показали, що температура поверхні рослин підвищується за збільшення температури повітря та надходження радіації, а також за зниження швидкості вітру і відносної вологості повітря [2, с. 4673–4674]. Водночас на рівні крони суттєве значення мають її висота, щільність і архітектоніка, а на рівні окремого листка – його просторове положення та орієнтація [5, с. 211; 17, с. 3–5].

Іншою проблемою є змішування температурних сигналів рослини та фону. При недостатній просторовій роздільній здатності один піксель може одночасно містити листкову поверхню, гілки, ґрунт, трав'янисту рослинність або тінь. Така ситуація істотно ускладнює інтерпретацію температури крони [10, с. 5431; 18, с. 2000–2001]. Тому одним із ключових етапів обробки тепловізійних даних повинно бути виділення саме рослинної частини зображення.

Для БПЛА-зйомки додатковою проблемою є стабільність температурних вимірювань. Недорогі неохолоджувані тепловізійні сенсори можуть характеризуватися температурним дрейфом, віньєтуванням та залежністю показників від умов польоту. Kelly et al. встановили, що без належної радіометричної корекції похибка температурних оцінок у польових умовах може істотно зростати; ефективним засобом є використання наземних температурних контрольних об'єктів та емпіричної лінійної калібровки [15, с. 4–5; 19, с. 118–119]. Аналогічно Gerchow et al. показали, що температурна калібровка та врахування дрейфу сенсора є критичними для отримання достовірного теплового ортомозаїчного шару [14, с. 2–3].

Окрему проблему становить фотограмметричне узгодження теплових зображень. Теплові кадри часто мають меншу просторову роздільну здатність і нижчий локальний контраст порівняно з RGB-знімками, що зменшує кількість надійних спільних точок для побудови ортомозаїки. Тому перспективним є використання геометричної інформації, отриманої з високороздільних RGB-знімків, для просторового прив'язування теплового каналу [14, с. 4].

У цьому контексті важливим є використання геоінформаційних систем, зокрема QGIS, як середовища, в якому теплова інформація може бути переведена з окремих знімків у просторово структуровані показники для кожного дерева. QGIS дозволяє виконувати растрові розрахунки, маскування, перепроєктування, класифікацію та статистичний аналіз растрових значень у межах полігонів окремих крон. Зокрема, інструмент *Zonal statistics* розраховує середнє, медіану, стандартне відхилення, мінімальне, максимальне значення та інші статистики растра в межах кожного полігона [20, с. 2–5].

Таким чином, актуальним завданням є розроблення відтворюваного GIS-підходу, який би об'єднував тепловізійну зйомку, фотограмметричне формування геоприв'язаного теплового шару, виділення індивідуальних крон, статистичну обробку температурних значень та подальше картографування рівнів стресового навантаження.

Метою дослідження було наукове обґрунтування та методичне опрацювання підходу до оцінювання просторової неоднорідності стресового стану дерев за результатами тепловізійної фотограмметричної зйомки з використанням геоінформаційних можливостей програми QGIS.

Матеріали та методи дослідження. Тепловізійні знімки дерев формували у серпні 2026 року за використання безпілотного літального апарата DJI Mavic 3 Thermal з тепловізійним сенсором 640 × 512 пікселів.

Місце проведення зйомки – фруктовий плодоносний сад на шпалері Вінницького аграрного університету (координати (49°12'35.0"N; 28°24'36.0"E).

Зйомку проводили у боковій фронтальній проекції відносно досліджуваної поверхні крони дерев у період активної вегетації (фаза плодоношення) за відносно стабільних метеорологічних умов. Відстань від країв крони дерев до траєкторії переміщення тепловізійної камери дотримувалась однотиповою відповідно до наземного маркера. Інтервал між фіксацією знімків для мормування масиву цифрових зображень вкладається у 90 секунд.

Теплові зображення отримували у радіометричному форматі R-JPEG, що забезпечував подальше вилучення температурних значень для окремих пікселів.

Для кожного дерева формували індивідуальний полігон крони на основі RGB-зображень із подальшим його просторовим суміщенням із тепловим растром. Такий підхід дозволив мінімізувати вплив змішаних пікселів, що містили інформацію про температуру рослинної поверхні, ґрунту та інших компонентів фону, відповідно до принципів поєднаної обробки RGB- та теплових даних [18, с. 795–797].

Просторову обробку та аналіз тепловізійної інформації проводили у середовищі QGIS. Після геометричного узгодження теплових і RGB-даних для кожної крони визначали середню, медіанну, мінімальну та максимальну температуру, стандартне відхилення і діапазон температурних значень за використання інструменту Zonal statistics [20, с. 7–8].

Для нормування температурного сигналу відносно атмосферних умов розраховували різницю між середньою температурою крони та температурою повітря (рівняння 1):

$$\Delta T = T_{\text{к}} - T_{\text{п}} \quad (1)$$

де: $T_{\text{к}}$ – середня температура крони рослини, °C;
$T_{\text{п}}$ – середня температура повітря, °C.

Для аналізу було застосовано також інтегральний індекс температурного стресу (ITS) за рівнянням 2:

$$ITS = \frac{T_{mean} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \times 100 \quad (2)$$

де: T_{mean} – середня температура дерева; T_{min} – нижня межа температурного діапазону; T_{max} – верхня межа.

Отримані показники використовували для індивідуального оцінювання та картографування рівня температурного стресу кожного дерева. На заключному етапі формували тематичний GIS-шар із просторовим відображенням рівнів стресового стану дерев. Повна деталізація методика представлена на інфографічній панелі (рис. 1).

На підставі отриманих тепловізійних термографічних знімків було сформовано тестове поле з 6 знімків крони різних дерев по фронтальному ряду шпалерного ряду саду з метою формування масиву цифрового зображення для подальшого аналізу у фреймі QGIS та оцінки можливості цього програмного інструменту для оцінки стресостійкості дерев на прикладі яблуні. Результати такого масиву представлено на рис. 2.

Статистичну обробку результатів проводили у середовищі програми Statistica 10 із використанням методів варіаційної статистики.

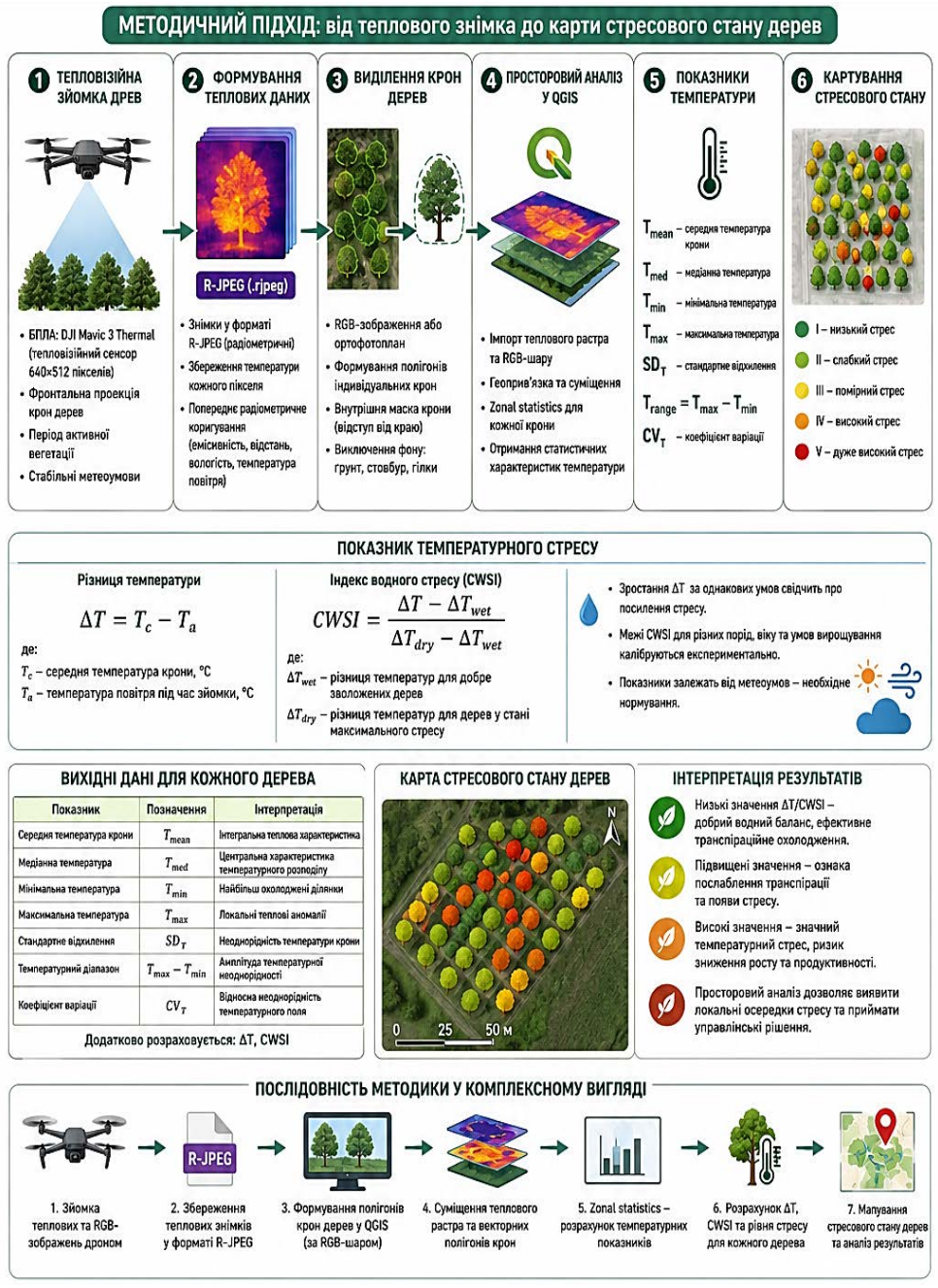


Рис. 1. Оцінка стресового стану дерев за використання методу обробки тепловізійних фотограмметричних знімків у фреймі програми QGIS (сформовано автором у середовищі програм Piktochart та Visme)

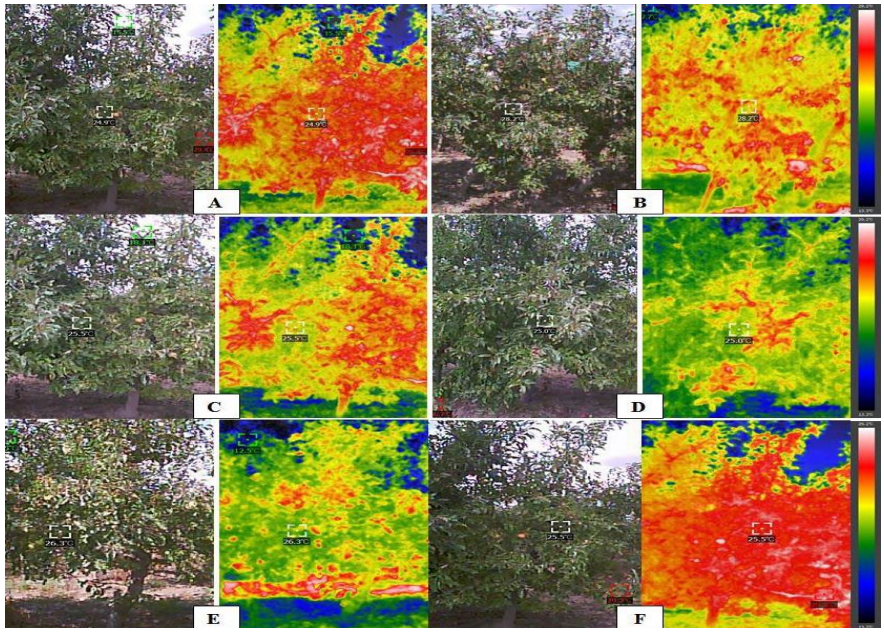


Рис. 2. Тепловізійний масив даних цифрових зображень яблуневих дерев у попарному співставленні: звичайне цифрове фонове фото-термографічне тепловізійне фото, 2026 рік (граничні межі температури на фоновій шкалі: темно-синій 13,3°С а рожевий розкалений – 29,2°С)

Виклад основного матеріалу дослідження. За результатами нанесення грід сітки на сформовані варіанти тепловізійних цифрових зображень дерев яблуні та обробки зображень на основі шкали температур у межах кожної грід комірки масштабом 1 х 1 см було отримано первинний шар аналізу зображень у фреймі програми QGIS (рис. 3).

Тепловізійні карти A–F демонструють виражену просторову неоднорідність температурного поля досліджуваних дерев. У межах кожної ділянки спостерігається чергування зон із низькими, помірними та високими температурними значеннями, що проявляється переходом кольорової гами від темно-синього та зеленого до жовтого, помаранчевого, червоного та рожевого кольорів. Загальний діапазон візуалізованої температурної шкали становить 13,9–29,2°С.

Такий характер температурного поля свідчить про те, що температура поверхні рослинного покриву не є однорідною навіть у межах однієї облікової ділянки. На неї одночасно впливають інтенсивність сонячного опромінення, просторове положення листків, густота та структура крони, водозабезпечення, інтенсивність транспірації, швидкість вітру, затінення, орієнтація листкової поверхні та характеристики субстрату [9].

Це принципово важливо для інтерпретації тепловізійних даних. Температурне зображення не слід розглядати лише як карту абсолютної температури. Воно є просторовим відображенням теплового балансу рослинного організму та його взаємодії з навколишнім середовищем [3, 8].

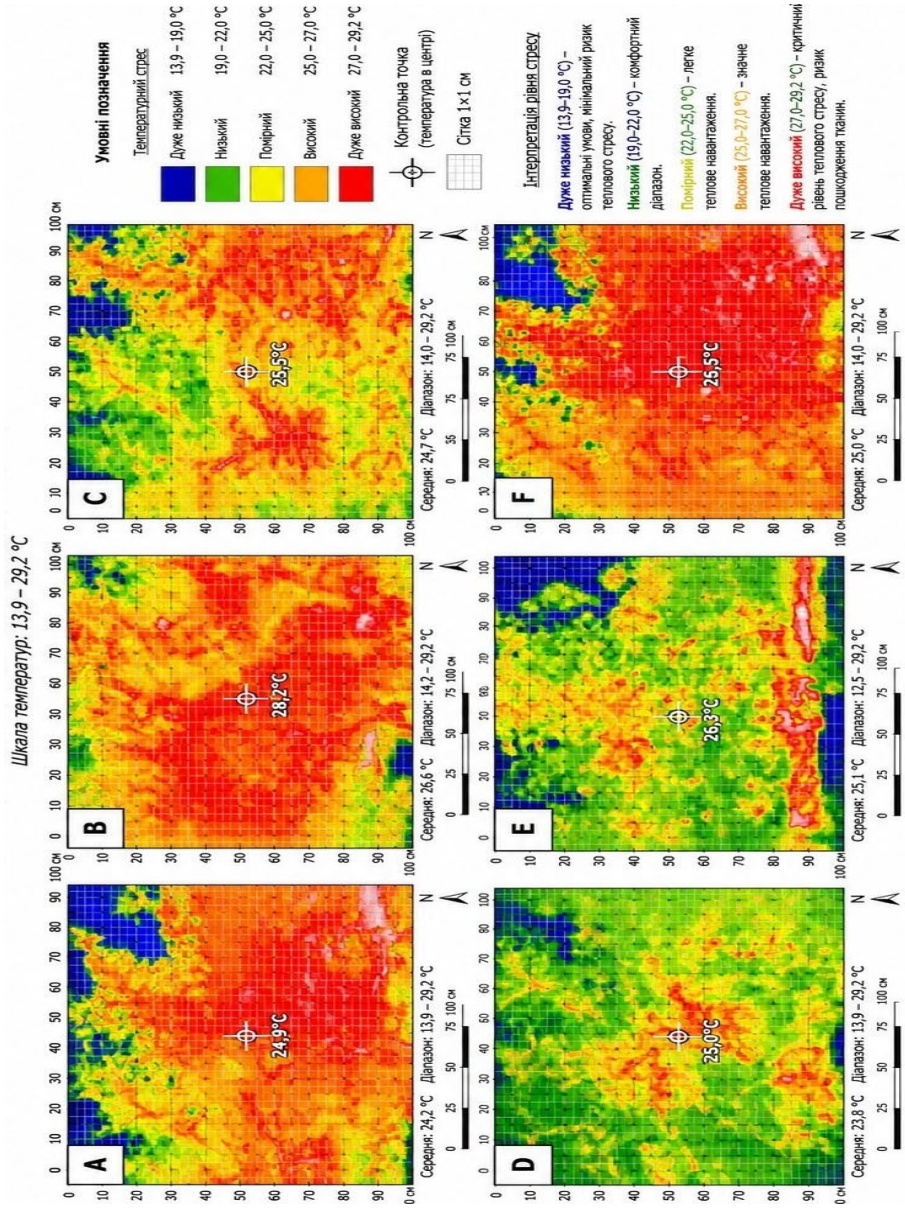


Рис. 3. Карта грідової обробки температурного шару цифрового тепловізійного зображення у фреймі програми QGIS, 2026 рік (уніфіковане площа грід аналізу 10000 см²)

Інфрачервона термографія використовується саме з цієї причини: температура листкової поверхні пов'язана з випаровуванням води та роботою продихів. За достатнього водопостачання транспіраційне охолодження сприяє зниженню температури листків, тоді як зменшення транспірації може супроводжуватися їх нагріванням [5, 11].

Отже, зони підвищеної температури на картах A–F можуть розглядатися як індикатори потенційно несприятливого теплового або водного стану.

На рисунку A спостерігається значна частка жовто-помаранчевих і червоних зон у центральній та нижній частинах досліджуваної площі. Це свідчить про формування відносно теплого мікрокліматичного поля. Контрольна точка в центральній частині ділянки характеризується температурою 24,9°C. На периферійних ділянках одночасно присутні значно холодніші зони, представлені зеленими та синіми кольорами. Таким чином, різниця між окремими просторовими елементами крони є суттєвою.

Особливо важливим є те, що червоні області утворюють не окремі ізольовані пікселі, а відносно великі просторові масиви. Це може свідчити про систематичний характер температурної неоднорідності, а не лише про випадковий шум теплового зображення. Це може бути пов'язано з неоднаковим освітленням різних частин крони. Водночас необхідно враховувати, що різниця температур між листками може формуватися не лише через водний дефіцит, але й через відмінності у поглинанні сонячної радіації.

Саме тому наголошується [7, 10], що температура листка може істотно змінюватися залежно від освітленості та положення листка в кроні; у польових умовах необхідна нормалізація температурних даних.

Рисунок B є найбільш вираженим щодо формування високотемпературної області. Центральна контрольна точка має температуру 28,2°C, що наближається до верхньої межі представленої шкали 29,2°C. У центральній та нижній частинах карти спостерігається значна кількість червоних та помаранчевих зон. На відміну від A, тут високотемпературні області мають більшу просторову протяжність. Це робить дане зображення особливо цікавим з точки зору діагностики потенційного теплового стресу – можна припустити, що рослина B характеризується нижчою здатністю підтримувати ефективне транспіраційне охолодження або перебуває в умовах більшого теплового навантаження. Висока температура рослинного покриву може бути пов'язана зі зниженням продихової провідності. При водному дефіциті рослини закривають продихи, внаслідок чого зменшується транспірація і відповідно знижується ефективність випаровувального охолодження. Тому B можна розглядати як потенційно найбільш стресову ділянку серед шести досліджуваних.

На рисунку C контрольна точка характеризується температурою 25,5°C. Карта має мозаїчну структуру з чергуванням зелених, жовтих, помаранчевих та червоних зон. Порівняно з B, високотемпературні області на C мають більш фрагментований характер. Це означає, що теплова неоднорідність формується не суцільною високотемпературною зоною, а великою кількістю локальних осередків. Такий тип просторової структури може бути пов'язаний із неоднаковою експозицією окремих частин крони [5]. Наприклад, добре освітлені листки можуть мати вищу температуру, тоді як затінені листки характеризуються нижчою температурою [11]. З фізіологічної точки зору це також може свідчити про різну інтенсивність транспірації в різних частинах крони [7]. Термічне картування дозволяє перейти від середнього значення температури дерева до аналізу просторової мінливості температури, що є однією з основних переваг дистанційної термографії [12].

Рисунок D істотно відрізняється від B та F. У його структурі значно більша частка зелених зон, тоді як червоні області є локальними та менш просторово домінуючими. Контрольна температура становить 25,0°C. Загальна картина може характеризуватися як більш рівномірний температурний режим із локальними ділянками підвищеного нагрівання. У функціональному аспекті така структура

може свідчити про більш рівномірний розподіл водного забезпечення або більш збалансоване співвідношення між надходженням енергії та транспіраційним охолодженням [5, 17]. Разом із тим для дерев температура поверхні значною мірою визначається архітектурою крони. Щільні ділянки можуть мати інший тепловий режим, ніж відкриті частини крони. Огляд методів теплового дистанційного зондування дерев показує, що саме розмежування впливу фізіологічного стресу та структурних факторів є одним із ключових методичних завдань. Отже, D можна попередньо віднести до помірного рівня теплового навантаження, причому потенційно стресові осередки мають локальний характер.

На рисунку E центральна температура становить 26,3°C. Карта характеризується значною кількістю зелених та жовтих областей, однак у нижній частині просторового поля присутня виражена високотемпературна смуга. Ця особливість є важливою з точки зору просторового аналізу. На відміну від B, де теплі зони займають значну центральну площу, у E потенційне теплове навантаження має більш зональний характер. Така структура може бути результатом локальних факторів [2, 5, 9]: різної експозиції листків; неоднакового затінення; особливостей форми крони; локального дефіциту води; близькості нагрітої поверхні ґрунту; змін швидкості повітряного потоку.

У тепловізійних дослідженнях дерев саме поєднання просторової температури із даними про середовище дозволяє відокремити фізіологічний сигнал від впливу мікроклімату [4]. Тому для E особливо доцільно використовувати не лише середню температуру, а аналіз температурних кластерів. Якщо нижня теплова зона зберігається в різні моменти часу, вона може бути важливою діагностичною ознакою.

Рисунок F характеризується однією з найбільш виражених високотемпературних областей. Центральна температура становить 25,5°C, однак візуальна структура карти показує значну площу червоно-помаранчевих зон. Таким чином, середня або центральна температура не повністю відображає тепловий стан F. Це є важливим методичним висновком: одна точкова температура може недооцінювати ступінь просторового теплового навантаження дерева. Наприклад, два дерева можуть мати однакову центральну температуру 25,5°C, але одне з них може мати переважно рівномірну температуру, тоді як друге – велику площу з температурою 27–29°C. Фізіологічне значення цих ситуацій потенційно різне. Саме тому тепловізійні методи розглядаються [7, 18] як інструмент просторового фенотипування рослин: вони дозволяють аналізувати не тільки середню температуру, а й розподіл температури в межах всієї рослини або крони.

У результуючому підсумку: крона дерева на рисунку B має одночасно високу центральну температуру та значні високотемпературні площі; на рисунку F має помірно високу центральну температуру, але значну площу червоних зон; на рисунку E характеризується локалізованим високотемпературним осередком; на рисунку D має переважання зелених зон і менш виражене теплове навантаження; на рисунку A характеризується значною температурною неоднорідністю, хоча центральна температура відносно невисока.

На рисунках A–F червоні та рожеві області потенційно можуть відповідати ділянкам із (відповідно до [3]): підвищеним сонячним навантаженням; зниженою транспірацією; недостатнім водозабезпеченням; підвищеним дефіцитом тиску водяної пари; локальним перегріванням; несприятливою архітектурою крони.

Зроблени вище аналіз підтверджується статистичними зведеними даними просторової температурної неоднорідності аналізованої області крони (табл. 1–2).

Таблиця 1

Характеристика варіювання тепловізійної неоднорідності температурного поля крони яблуні на знімках, 2026 рік

Ділянка (дерево)	Середнє, °C	Медіана, °C	Мінімум, °C	Максимум, °C	Стандартневідхилення, °C	Діапазон, °C
A	24,2	24,4	13,9	29,2	3,21	15,3
B	26,6	27,0	14,2	29,2	3,34	15,0
C	24,7	25,0	14,0	29,2	3,12	15,2
D	23,8	24,1	13,9	29,2	3,05	15,3
E	25,1	25,6	12,5	29,2	3,40	16,7
F	25,0	25,4	14,0	29,2	3,28	15,2

Таблиця 2

Розподіл частки теплових зон у загальній термографії цифрових тепловізійних зображень крон яблуні A-F за використання інструментарію програми QGIS

Частка площі за рівнями стресу, %					Рівень стресу (інтегральна оцінка)
Дуже Низький*	Низький	Помірний	Високий	Дуже високий	
6,4	19,7	34,5	27,2	12,2	Помірний
3,2	9,1	18,7	32,4	36,6	Дуже високий
5,1	16,2	30,6	30,8	17,3	Високий
7,8	23,2	36,2	22,4	10,4	Помірний
4,3	13,6	23,6	28,7	29,8	Високий
4,0	12,1	24,8	30,0	29,1	Високий

Примітка: * – градації згідно шкали представленої на рис. 3 даної статті.

Загальні висновки на підставі табл. 2: найбільше теплове навантаження зафіксовано на ділянці B – критичний рівень стресу. Високий рівень стресу також спостерігається на ділянках E, C та F. Ділянки A та D мають помірний рівень теплового стресу та відносно кращий температурний режим. Рекомендується проведення зрошення, мульчування та покращення вентиляції крони для дерев з високим та дуже високим рівнем температурного стресу.

Слід зауважити, що застосування програми QGIS дозволило визначити усереднений індекс температурного стресу (ITS) для кожної окремої крони дерева на знімках A–F, що підтвердело зроблен висновки щодо температурного градієнту стресовості кожного дерева у масиві аналізованих цифрових зображень (табл. 3).

Таблиця 3

Індекс температурного навантаження крон дерев яблуні на цифрових тепловізійних знімках A–F, 2026 рік

Цифрове зображення	Температура, °C	ITS, %	Інтерпретація
A	24,9	71,9	підвищене теплове навантаження
B	28,2	93,5	дуже високе теплове навантаження
C	25,5	75,8	підвищене теплове навантаження
D	25,0	72,5	підвищене теплове навантаження
E	26,3	81,0	високе теплове навантаження
F	25,5	75,8	підвищене теплове навантаження

Висновки і перспективи подальших досліджень. Тепловізійні карти A–F демонструють значну просторову неоднорідність температури поверхні дерев у межах температурного діапазону 13,9–29,2°C. За контрольними точками максимальне локальне значення температури встановлено для B – 28,2°C, далі E – 26,3°C, C і F – 25,5°C, D – 25,0°C та A – 24,9°C. Найбільш виражене потенційне теплове навантаження спостерігається на B, де поєднуються висока контрольна температура та значна площа червоно-помаранчевих зон. F демонструє важливість просторового аналізу, оскільки навіть при температурі контрольної точки 25,5°C карта містить значні площі високотемпературних зон. E характеризується локальним концентраційним типом теплового навантаження, тоді як D має відносно більш рівномірний і прохолодний температурний режим. Порівняння C і F показує, що одна точкова температура не може повністю характеризувати тепловий стан дерева. Тепловізійна температура є непрямим індикатором фізіологічного стану, оскільки на неї одночасно впливають транспірація, водний статус, сонячна радіація, вітер, вологість повітря та архітектура крони. Тому для остаточного встановлення фізіологічного теплового стресу необхідно поєднати термографію з температурою повітря, вологістю ґрунту, відносною вологістю, радіацією та, бажано, фізіологічними показниками.

Перспектива подальших досліджень є дослідження ефективних умов та інструментарію для переходу від якісної термограми до кількісного GIS-аналізу температурного фенотипу кожного дерева.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Jones H. G. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research*. 2004. Vol. 41. P. 107–163. DOI: 10.1016/S0065-2296(04)41003-9.

2. Maes W. H., Steppe K. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*. 2012. Vol. 63, № 13. P. 4671–4712. DOI: 10.1093/jxb/ers165.

3. Neinavaz E., Schlerf M., Darvishzadeh R., Gerhards M., Skidmore A. K. Thermal infrared remote sensing of vegetation: current status and perspectives. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. Vol. 102. Art. 102415. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102415.

4. Smigaj M., Agarwal A., Bartholomeus H., Decuyper M., Elsherif A., de Jonge A., Kooistra L. Thermal infrared remote sensing of stress responses in forest environments: a review of developments, challenges, and opportunities. *Current Forestry Reports*. 2024. Vol. 10. P. 56–76. DOI: 10.1007/s40725-023-00207-z.

5. Prashar A., Jones H. G. Assessing drought responses using thermal infrared imaging. *Methods in Molecular Biology*. 2016. Vol. 1398. P. 209–219. DOI: 10.1007/978-1-4939-3356-3_17.

6. Jackson R. D., Idso S. B., Reginato R. J., Pinter P. J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*. 1981. Vol. 17, № 4. P. 1133–1138. DOI: 10.1029/WR017i004p01133.

7. Gardner B. R., Nielsen D. C., Shock C. C. Infrared thermometry and the Crop Water Stress Index. II. Sampling procedures and interpretation. *Journal of Production Agriculture*. 1992. Vol. 5, № 4. P. 466–475. DOI: 10.2134/jpa1992.0466.

8. Jones H. G., Stoll M., Santos T., de Sousa C., Chaves M. M., Grant O. M. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*. 2002. Vol. 53, № 378. P. 2249–2260. DOI: 10.1093/jxb/erf083.

9. Berni J. A. J., Zarco-Tejada P. J., Suárez L., Fereres E. Thermal and narrow-band multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009. Vol. 47, № 3. P. 722–738. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2010457.

10. Virlet N., Lebourgeois V., Martinez S., Costes E., Labbé S., Regnard J.-L. Stress indicators based on airborne thermal imagery for field phenotyping a heterogeneous tree population for response to water constraints. *Journal of Experimental Botany*. 2014. Vol. 65, №. 18. P. 5429–5442. DOI: 10.1093/jxb/eru309.

11. Gómez-Candón D., Torres-Sánchez J., Labbé S., Jolivot A., Martinez S., Regnard J.-L. Water stress assessment at tree scale: high-resolution thermal UAV imagery acquisition and processing. *Acta Horticulturae*. 2017. Vol. 1150. P. 159–166. DOI: 10.17660/ActaHortic.2017.1150.23.

12. Santesteban L. G., Di Gennaro S. F., Herrero-Langreo A., Miranda C., Royo J. B., Matese A. High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. *Agricultural Water Management*. 2017. Vol. 183. P. 49–59. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.08.026.

13. Stutsel B., Johansen K., Malbéteau Y. M., McCabe M. F. Detecting plant stress using thermal and optical imagery from an unoccupied aerial vehicle. *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. Art. 734944. DOI: 10.3389/fpls.2021.734944.

14. Gerchow M., Kühnhammer K., Iraheta A., Marshall J. D., Beyer M. Enhanced flight planning and calibration for UAV based thermal imaging: implications for canopy temperature and transpiration analysis. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2025. Vol. 8. Art. 1457762. DOI: 10.3389/ffgc.2025.1457762.

15. Kelly J., Kljun N., Olsson P.-O., Mihai L., Liljeblad B., Weslien P., Klemedtsson L., Eklundh L. Challenges and best practices for deriving temperature data from an uncalibrated UAV thermal infrared camera. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, № 5. Art. 567. DOI: 10.3390/rs11050567.

16. Vidal D., Pitarma R. Infrared thermography applied to tree health assessment: a review. *Agriculture*. 2019. Vol. 9, № 7. Art. 156. DOI: 10.3390/agriculture9070156.

17. Wang J., Lin Q., Meng S., Huang H., Liu Y. Individual tree-level monitoring of pest infestation combining airborne thermal imagery and light detection and ranging. *Forests*. 2024. Vol. 15, № 1. Art. 112. DOI: 10.3390/f15010112.

18. Farella M. M., Fisher J. B., Jiao W., Key K. B., Barnes M. L. Thermal remote sensing for plant ecology from leaf to globe. *Journal of Ecology*. 2022. Vol. 110, № 9. P. 1996–2014. DOI: 10.1111/1365-2745.13957.

19. Jolivot A., Gomez-Candon D., Labbé S., Virlet N., Regnard J.-L. Acquisition d'images thermiques par drone : corrections radiométriques à partir de données terrain. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*. 2017. № 213–214. P. 117–123.

20. QGIS Documentation. Raster analysis. QGIS Documentation. 2026. URL: https://docs.qgis.org/3.44/en/docs/user_manual/working_with_raster/raster_analysis.html (date of aplication 05.09.2026)

Дата першого надходження статті до видання: 08.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.10.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.11.2026