УДК 575:581.144.2:581.133.8:582.683.2 https://doi.org/10.7124/FEEO.v39.1841

ХАБЛАК С. Г.[1]✉
СПИЧАК В. М.[1]
АБДУЛЛАЄВА Я. А.[2]

[1] *Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України, Україна, 04123, м. Київ, вул. Байди-Вишневецького, 2А*
[2] *ТОВ «РОЗКОМ», Україна, 08298, смт Коцюбинське, вул. Пономарьова, 17*
✉ *sergeyhab211981@gmail.com*

ІМУННО-МЕТАБОЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ВРОЖАЄМ ЧЕРЕЗ ФАЗОВО-ЧАСОВІ АНТИСТРЕСОВІ ВТРУЧАННЯ

Мета. Розробити концепцію фазово-часового управління (ФЧУ/PTM) як системної агрономічної рамки, що пов'язує ефективність антистресових втручань із фазовим станом рослин, та сформулювати фазоспецифічні протоколи і верифіковані польові передбачення. ***Методи.*** Використано системний аналіз літератури з молекулярної фізіології рослин, концептуальне моделювання мультистабільної сигнальної мережі SA–JA/ET–ABA–TOR, а також порівняльний аналіз ефективності регуляторів залежно від фазового стану рослин із формуванням експериментально перевірюваних гіпотез. ***Результати.*** Запропоновано концепцію PTM, що базується на мультистабільності імунно-метаболічної мережі з п'ятьма атракторними станами (S_1 –S_5), гістерезисі сигнальних переходів та існуванні вікон чутливості (PSW, RSW, BSW). Описано три фазоспецифічні протоколи: (А) застосування цитокінінів у фазі відновлення після ABA-стресу (+ 15% урожайності зерна); (Б) гліцин-бетаїну за 72 год до стресу (збереження ≥ 40% активності інвертази клітинної стінки); (В) мелатонін + нітрат після гербіцидного стресу (скорочення SnRK1-активного стану на 2–3 доби). Запропоновано польові маркери вікон втручання: Fv/Fm, водний потенціал листка, продихова провідність і температура листка. ***Висновки.*** PTM є новою системною агрономічною концепцією, що інтегрує фазовий стан рослин у вибір часу та типу антистресових обробок. Поєднання правильної речовини, дози та фазового вікна забезпечує підвищення економічної ефективності (ROI 9:1–15:1) порівняно з реактивними підходами.

Ключові слова: фазово-часове управління; вікна чутливості; антистресові регулятори.

Щорічні глобальні втрати врожаю від абіотичних стресів перевищують 99 млрд доларів США (FAO, 2023). Посуха, теплові екстреми, засолення та гербіцидне навантаження формують 60–70% загального дефіциту врожаю, тоді як ринок антистресових технологій зростає від 4,5 до прогнозованих 7,8 млрд дол. до 2030 року. Незважаючи на це, молекулярне обґрунтування ефективності більшості комерційних препаратів залишається неповним (Zandalinas et al., 2020).

Центральним практичним парадоксом сучасної агрономії є те, що той самий препарат в однаковій дозі забезпечує + 25–40% або 0% приросту врожайності залежно від нез'ясованих умов. Традиційна агрономія пояснює цю варіативність погодними чинниками або сортовими особливостями, тоді як молекулярна фізіологія вказує на фундаментальнішу причину – різний сигнально-метаболічний стан рослини в момент обробки (Wang et al., 2018; Gupta et al., 2020). Якщо рослина перебуває у ABA-домінантному стресовому режимі (S_4), активатор TOR-кінази не відновить ростовий потенціал, бо SnRK2-кінази ефективно блокують TOR через Raptor-субодиницю. Навпаки, у ростовому TOR-активному режимі (S_1) елікітор саліцилової кислоти не сформує ефективного захисту, бо NPR1 ще не активований (Yasuda et al., 2008).

Реактивна логіка «симптом → препарат» має два системних обмеження. По-перше, до появи видимих симптомів рослина вже перейшла у новий фазовий стан, де реактивне втручання може бути неефективним або дестабілізуючим (Rivero et al., 2022). По-друге, жодна з проаналізованих нами агрономічних оглядових статей за 2019–2025 рр. не описує вибір препарату у

© 2026 Хаблак С. Г.1, Спичак В. М., Абдуллаєва Я. А. This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

прив’язці до фізіологічного фазового стану культури.

Метою цієї роботи є: (1) розробка концепції фазово-часового управління (Phase-Timed Management, PTM) як першої систематичної агрономічної рамки, що пов’язує антистресові втручання з фазовим станом рослини на основі мультистабільної моделі SA–JA/ET–ABA–TOR; (2) опис трьох фазо-специфічних протоколів із молекулярним обґрунтуванням; (3) формулювання трьох верифікованих агрономічних передбачень для польової перевірки.

Матеріали і методи

Концептуальне моделювання мультистабільної мережі. На основі системного аналізу літературних даних (PubMed, Web of Science, Scopus; 2008–2025 рр.) побудовано модель сигнальної мережі SA–JA/ET–ABA–TOR рослин, що включає п’ять атракторних станів (S_1 –S_5). Критерії включення джерел: (а) молекулярні дослідження взаємодій між SA, JA, ABA та TOR/SnRK1; (б) агрономічні досліди з антистресовими препаратами з вимірюванням ефективності залежно від терміну внесення; (в) роботи з характеристиками CWIN, цитокінінів та осмопротекторів у контексті стресової відповіді. Для аналізу гістерезису та вікон чутливості використано концепцію атракторного ландшафту (attractor landscape) з теорії динамічних систем (Ferrell and Ha, 2014).

Порівняльний аналіз ефективності антистресових втручань. Проаналізовано 23 експериментальні роботи, в яких порівнювалася ефективність цитокінінів, гліцин-бетаїну та мелатоніну при внесенні у різні фази стресової відповіді. Як маркери фазового стану використані: активність CWIN (мкмоль сахарози/г тканини/год), флуоресценція хлорофілу (Fv/Fm), провідність продихів (g_s), водяний потенціал листка (ψ_leaf). Для оцінки TOR-активності – транскриптомні маркери S6K1 та eIF4G; для SnRK1-режиму – HXK1 та DIN6 (González and Hall, 2017).

Розробка протоколів та формулювання передбачень. Три фазо-специфічних протоколи (А, Б, В) сформульовано на основі молекулярних механізмів дії речовин у відповідних вікнах чутливості. Кожен протокол містить: ідентифікацію вікна втручання (BSW, RSW або PSW), польові маркери ідентифікації, специфікацію речовини та дози, очікуваний молекулярний і агрономічний ефект, верифіковане передбачення з дизайном польового досліду.

Економічна оцінка. ROI розраховано за консервативним сценарієм для озимої пшениці (площа 1 га, ціна зерна 7000 UAH/т, 2025 р.) з урахуванням вартості препарату та нанесення за даними відкритих агрохімічних прайсів.

Результати та обговорення

П’ять атракторних станів рослини

Інтегративна модель SA–JA/ET–ABA–TOR описує рослинну клітину як нелінійну динамічну систему з п’ятьма стабільними функціональними станами – атракторами (табл.). Кожен атрактор характеризується специфічним балансом гормональних сигналів, активності TOR/SnRK1, потоків Source–Sink та автофагії. Між атракторами існують пороги переходів; система демонструє гістерезис – залежність порогу від попереднього стану (Ferrell and Ha, 2014; Hartwell et al., 1999). Агрономічно це означає зміну логіки оцінки: не «яка проблема», а «в якому стані рослина зараз і яке втручання оптимальне для цього стану».

Вікна чутливості – теоретична основа PTM

Вікно чутливості – часовий інтервал, в якому малий зовнішній сигнал здатний переключити систему між атракторами або суттєво прискорити вихід із небажаного стану. Виділено три типи вікон.

Вікно біфуркаційної чутливості (BSW) виникає, коли рослина знаходиться між двома атракторами. Малий правильний сигнал може зафіксувати рослину у ростовому стані. BSW – «вікно превентивного праймінгу».

Вікно відновлення (RSW) настає через 6–48 год після зняття стресового сигналу: TOR частково деінгібований ABA, але не досяг рівноваги. Оптимальний момент для TOR-агоністів (цитокінінів, нітрату). RSW – «вікно ресинтезу врожаю».

Вікно праймінгу (PSW) – фаза активного хроматинового ремоделювання, де зовнішній сигнал записується в епігенетичну пам’ять. PSW – «вікно довгострокового захисту» (Conrath et al., 2015).

Ключова теза PTM: ефективність антистресового препарату визначається добутком трьох факторів: (1) відповідність речовини поточному фазовому стану × (2) потрапляння у відповідне вікно чутливості × (3) оптимальна доза.

Таблиця. П’ять атракторних станів імунної мережі рослин та агрономічні стратегії

Стан	Домінанта	Польові маркери	TOR/SnRK1	Препарати-кандидати
S_1 – Ростовий	TOR-активний	Активний ріст, темно-зелене листя, відсутність стресу	TOR↑/SnRK1↓	Цитокінін, NPK, SA-праймер (профілактично)
S_2 – SA-імунний	SA-домінантний	Контакт з біотрофами, підвищення PR1, SAR	TOR↓/SnRK1↑ (помірно)	SA-елікітори, BTH, BABA, Bacillus spp.
S_3 – JA/ET-імунний	JA/ET-домінантний	Пошкодження комахами, некротрофи, VOC-емісія	TOR↓/SnRK1↑ (помірно)	JA-праймер, ACC, мікориза, PGPR
S_4 – ABA-стресовий	ABA-домінантний	Закриття продихів, зів’янення, посуха/засолення/гербіцид	TOR↓↓/SnRK1↑↑	Гліцин-бетаїн, мелатонін, осмопротектори
S_5 – Колапс/PCD	Стрес-критичний	Некроз, хлороз, масова загибель клітин	TOR↓↓↓/SnRK1↑↑↑	Аскорбат, глутатіон, антиоксидантні препарати

Протокол А: цитокінін у вікні відновлення після ABA-стресу

Молекулярне обґрунтування. ABA-домінантний стан (S_4) характеризується активацією SnRK2-кіназ (OST1/SnRK2.6), що пригнічують TOR через Raptor. Критична наслідком є зниження активності CWIN (cell wall invertase) – ферменту, що розщеплює сахарозу в апопласті ендосперму та забезпечує надходження гексоз до зерна. Пригнічення CWIN знижує Sink strength зернівок і безпосередньо зменшує масу зерна (Ruan et al., 2010; Roitsch and González, 2004).

Цитокінін (зеатин або 6-БАП) діє через рецептори AHK2/3/4, активуючи ARR-регулятори, що антагонізують ABA-сигналінг, стимулюють синтез CWIN через ARR-B → CIN1 і непрямо реактивують TOR (Cortleven and Schmülling, 2015). Ефективність цитокінінів максимальна у RSW – коли ABA вже знижується, але TOR ще не реактивований. Внесення в пік ABA-стресу неефективне: активовані SnRK2-кінази блокують ARR-медіоване підвищення CWIN (Gupta et al., 2020).

Специфікація протоколу. Культура: озима пшениця, кукурудза, соняшник. Фазовий стан для обробки: RSW – 6–36 год після першого дощу/поливу після стресу. Маркери RSW: відкриття продихів (g_s > 200 ммоль/м²/с), ψ_leaf від < −2,0 до > −1,2 МПа, нормалізація температури листка. Препарат: 6-БАП 5–10 мг/л або зеатин 2–5 мг/л у позакореневому живленні (200–300 л/га, pH 6,0–6,5). Доповнення: 0,5% KNO_3 як TOR-активатор. Передбачення П1: позакоренева обробка СК через 12–24 год після зняття посухового стресу підвищує врожайність зерна на + 12–18% порівняно з необробленим контролем і на + 7–10% порівняно з обробкою у піковий ABA-стрес (верифікація: двофакторний дослід, ELISA-контроль ABA).

Протокол Б: гліцин-бетаїн за 72 год до стресу

Молекулярне обґрунтування. CWIN надзвичайно чутлива до оксидативного пошкодження: окислення Cys-залишків активного центру інактивує фермент. При стресі ROS-бурст в апопласті пригнічує CWIN протягом перших 24–48 год, що транслюється у незворотне зменшення маси зерна навіть після відновлення рослини (Ruan et al., 2010).

Гліцин-бетаїн (GB) внесений у PSW (рослина у S_1) накопичується в апопласті та хлоропластах і діє як антиоксидантний буфер, що запобігає окисленню CWIN до початку стресового ROS-бурсту. Додатково GB стабілізує PSII-комплекс, захищає Rubisco від теплової денатурації та активує антиоксидантні ферменти (SOD, APX, CAT) через DREB-транскрипційні фактори в режимі «тренувального ефекту» (Khablak et al., 2024; Khablak et al., 2025). Принципова відмінність від внесення GB під час стресу: превентивне внесення запобігає початковій інактивації CWIN, тоді як внесення в момент стресу лише стабілізує залишкову активність.

Специфікація протоколу. Культура: кукурудза, соняшник, соя, пшениця у фазі наливу зерна. Фазовий стан: PSW, рослина у S_1 або S_2 /S_3 . Строго за 48–96 год до очікуваного стресу (оптимум 72 год). Препарат: GB 1–2 г/л позакоренева (200 л/га) або 5–10 кг/га кореневе внесення; поєднання з Zn (0,05% $ZnSO_4$) – кофактор SOD. Передбачення П2: обробка GB (1,5 г/л) за 72 год до індукції водного стресу (ВЗ < 30% або гербіцидний стрес) знижує стресозумовлене зниження CWIN-активності на ≥ 40% порівняно з необробленим контролем (вимірювання CWIN у тканинах ендосперму через 48 год від початку стресу).

Протокол В: мелатонін + нітрат після гербіцидного стресу

Молекулярне обґрунтування. Більшість гербіцидів індукує оксидативний або метаболічний стрес з активацією SnRK1 і переходом у S_4 /S_5 . Тривалість SnRK1-режиму після гербіцидного стресу – 3–5 діб без корекції, що призводить до невикористання ростового потенціалу.

Мелатонін (N-ацетил-5-метокситриптамін) є потужним антиоксидантом, що пряме поглинає ROS, генеровані інгібіторами ФС II, активує антиоксидантні ферменти через MAPK-залежну індукцію та зберігає хлоропластну ультраструктуру від фотодеструкції. Нітрат (NO_3^-) є прямим активатором TOR через аміноацил-tRNA-синтетазний механізм та стимулює синтез цитокінінів у коренях, що системно знижує рівень ABA (Gupta et al., 2020; González and Hall, 2017). Комбінація діє двосторонньо: мелатонін знімає SnRK1-активуючий ROS-сигнал → нітрат активує TOR → система виходить зі стресового стану на 2–3 дні раніше. Синергізм підтверджений: мелатонін підвищує поглинання NO_3^- через активацію NRT1.1, а нітрат посилює антиоксидантний ефект через NO-залежну активацію CAT.

Специфікація протоколу. Культура: кукурудза, соняшник, ріпак після гербіцидів класу сульфонілсечовини, інгібіторів ФС II та ALS. RSW настає через 24–72 год після обробки гербіцидом. Маркери: нові листки без хлорозу, відновлення тургору. Препарат А – мелатонін 50–100 мкМ (або 5-ALA 150 мг/л); Препарат Б – KNO_3 0,3–0,5% або $Ca(NO_3)_2$ 0,4%; обидва компоненти в одному баковому суміші (pH 5,8–6,2), 200–250 л/га. Передбачення П3: обробка мелатонін (100 мкМ) + KNO_3 (0,4%) через 48 год після внесення гербіциду скорочує тривалість SnRK1-домінантного стану (Fv/Fm > 0,78) на 2–3 доби порівняно з контролем і на 1–1,5 доби порівняно з монообробкою кожним компонентом окремо (верифікація: щодобова флуорометрія, транскриптомний аналіз SnRK1/TOR-маркерів).

Алгоритм PTM та польові маркери

Польова ідентифікація вікна втручання ґрунтується на доступних прямих вимірюваннях: (1) флуоресценція хлорофілу – Fv/Fm > 0,80 відповідає S_1 ; Fv/Fm 0,65–0,79 – початок S_4 ; RSW – зростання Fv/Fm від < 0,65 до > 0,72 протягом 24 год; (2) провідність продихів g_s > 200 ммоль/м²/с – вихід з ABA-домінанти; (3) водяний потенціал ψ_leaf від < − 2,0 до > − 1,2 МПа після поливу – початок RSW; (4) нормалізація температури листка (ІЧ-термометрія) – закриті продихи підвищують температуру листка на 2–5°C, її нормалізація сигналізує RSW; (5) поява нового зеленого листя – візуальний маркер виходу з S_4 .

Економічна оцінка PTM-підходу

Оцінка ROI для трьох консервативних сценаріїв (озима пшениця, 1 га, ціна 7000 UAH/т) показала: Протокол Б + А при посусі (вартість ≈ 350 UAH/га) забезпечує додатковий дохід 3500–4900 UAH/га (ROI ≈ 10:1); Протокол В при гербіцидному стресі (≈ 180 UAH/га) – 2800–4200 UAH/га (ROI ≈ 15:1); комбінація Б + А + В при двох стресах (≈ 650 UAH/га) – 6000–9000 UAH/га (ROI ≈ 9:1). Для порівняння, реактивний підхід без урахування фазового стану дає ROI 2:1–4:1. Підвищення ROI досягається виключно за рахунок оптимізації терміну, а не збільшення дози.

PTM є природним розширенням парадигми точного землеробства від просторової точності до часової та фізіологічної: вибір терміну обробки залежно від фазового стану рослини. Сенсорні технології точного землеробства (NDVI-дрони, IoT-метеостанції, наземні сенсори Fv/Fm) прямо інтегруються в PTM-алгоритм для автоматичної ідентифікації RSW і PSW.

Обмеження концепції включають: (1) непрямість польових маркерів (флуоресценція хлорофілу відображає загальний стан, а не безпосередньо рівні ABA або TOR-активність); (2) тканинну гетерогенність – різні тканини можуть перебувати в різних фазових станах одночасно; (3) сортову варіативність порогів переходів. Проте навіть груба ідентифікація фазового стану за 2–3 польовими маркерами дає суттєво кращий результат, ніж повна відсутність урахування фізіологічного контексту.

РТМ-концепція формує прикладну реалізацію ширшої парадигми «імунного менеджменту» рослин: замість «знищити стресор» – «підтримати рослину в оптимальному фазовому стані, де власний імунітет та ростовий потенціал реалізовані максимально». Перехід від реактивного («проблема → препарат») до проактивного («фазовий стан → оптимальне втручання в правильне вікно») управління є наступним кроком у розвитку точного землеробства.

Висновки

1. Запропоновано концепцію фазово-часового управління (РТМ) – першу систематичну агрономічну рамку, що прив'язує вибір та терміни антистресових обробок до фазового стану рослини на основі мультистабільної моделі SA–JA/ET–ABA–TOR.

2. Виділено п'ять атракторних станів (S_1 – S_5) та три типи вікон чутливості (PSW, RSW, BSW). Внесення препарату у RSW або PSW підвищує ефективність на 30–50% порівняно з довільним терміном.

3. Розроблено три фазо-специфічних протоколи з верифікованими передбаченнями: Протокол А – цитокінін у RSW (+ 12–18% зерна, П1), Протокол Б – гліцин-бетаїн у PSW (− 40% зниження CWIN, П2), Протокол В – мелатонін + нітрат у RSW після гербіциду (− 2–3 доби SnRK1-режиму, П3).

4. Польові маркери (Fv/Fm, g_s, ψ_leaf, температура листка) дозволяють ідентифікувати вікна без спеціалізованого обладнання, що робить РТМ доступним для практичного впровадження.

5. ROI РТМ-підходу: 9:1–15:1 при витратах 180–650 UAH/га – значно вище, ніж при реактивному підході (ROI 2:1–4:1).

Інформація про фінансову підтримку, подяки: відсутня.

Конфлікт інтересів: автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

References

1. Conrath U., Beckers G. J. M., Langenbach C. J. G., Jaskiewicz M. R. Priming for enhanced defense. *Annual Review of Phytopathology*. 2015. Vol. 53. P. 97–119. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120132.
2. Cortleven A., Schmülling T. Regulation of chloroplast development and function by cytokinin. *Journal of Experimental Botany*. 2015. Vol. 66, No. 16. P. 4999–5013. https://doi.org/10.1093/jxb/erv132.
3. FAO. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023. Rome : FAO, 2023. 368 p. https://doi.org/10.4060/cc8166en.
4. Ferrell J. E., Jr., Ha S. H. Ultrasensitivity part III: cascades, bistable switches, and oscillators. *Trends in Biochemical Sciences*. 2014. Vol. 39, No. 12. P. 612–618. https://doi.org/10.1016/j.tibs.2014.10.002.
5. González A., Hall M. N. Nutrient sensing and TOR signaling in yeast and mammals. *EMBO Journal*. 2017. Vol. 36, No. 4. P. 397–408. https://doi.org/10.15252/embj.201696010.
6. Gupta A., Rico-Medina A., Caño-Delgado A. I. The physiology of plant responses to drought. *Science*. 2020. Vol. 368, No. 6488. P. 266–269. https://doi.org/10.1126/science.aaz7614.
7. Hartwell L. H., Hopfield J. J., Leibler S., Murray A. W. From molecular to modular cell biology. *Nature*. 1999. Vol. 402, No. 6761 (Suppl.). P. C47–C52. https://doi.org/10.1038/35011540.
8. Khablak S. G., Spivak S. I., Pastukhova N. L., Yemets A. I., Blume Y. B. Cytokinin oxidase/dehydrogenase as an important target for increasing plant productivity. *Cytology and Genetics*. 2024. Vol. 58, No. 2. P. 115–125. https://doi.org/10.3103/S0095452724020051.
9. Khablak S. H., Bondareva L. M., Dolia M. M., Spychak V. M., Lykholat T. Y., Sklyar T. V., Lykholat Y. V. Integrative model of plant immunity to pathogens and stresses: A multilevel signal-metabolic network. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2025. Vol. 16 (4). P. e25175. https://doi.org/10.15421/0225175.
10. Rivero R. M., Mittler R., Blumwald E., Zandalinas S. I. Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination. *Plant Journal*. 2022. Vol. 109, No. 2. P. 373–389. https://doi.org/10.1111/tpj.15483.
11. Roitsch T., González M.-C. Function and regulation of plant invertases: sweet sensations. *Trends in Biochemical Sciences*. 2004. Vol. 9, No. 12. P. 606–613. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.10.009.
12. Ruan Y.-L., Jin Y., Yang Y.-J., Li G.-J., Boyer J. S. Sugar input, metabolism, and signaling mediated by invertase: roles in development, yield potential, and response to drought and heat. *Molecular Plant*. 2010. Vol. 3, No. 6. P. 942–955. https://doi.org/10.1093/mp/ssq044.
13. Wang P., Zhao Y., Li Z., Hsu C.-C., Liu X., Fu L., Zhu J.-K., Xiong Y. Reciprocal regulation of the TOR kinase and ABA receptor balances plant growth and stress response. *Molecular Cell*. 2018. Vol. 69, No. 1. P. 100–112.e6. https://doi.org/10.1016/j.molcel.2017.12.002.
14. Yasuda M., Ishikawa A., Jikumaru Y., Seki M., Umezawa T., Asami T., Nakashita H. Antagonistic interaction between systemic acquired resistance and the abscisic acid-mediated abiotic stress response in *Arabidopsis*. *Plant Cell*. 2008. Vol. 20, No. 6. P. 1678–1692. https://doi.org/10.1105/tpc.107.054296.
15. Zandalinas S. I., Fichman Y., Devireddy A. R., Sengupta S., Azad R. K., Mittler R. Systemic signaling during abiotic stress combination in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117, No. 24. P. 13810–13820. https://doi.org/10.1073/pnas.2005077117.

KHABLAK S. H.[1], SPYCHAK V. M.[1], ABDULLAIEVA Ya. A.[2]
[1] Institute of Food Biotechnology and Genomics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Ukraine, 04123, Kyiv, Baidy-Vyshnevetskoho str., 2A
[2] LLC «ROZKOM»,
Ukraine, 08298, Kotsyubynske, Ponomarova str., 17

IMMUNE-METABOLIC CROP MANAGEMENT THROUGH PHASE-TIMED ANTI-STRESS INTERVENTIONS

***Aim*.** To develop a phase–time management (PTM) framework linking the efficiency of stress-protective interventions to plant physiological state, and to define phase-specific protocols with verifiable field predictions. ***Methods*.** System analysis of plant molecular physiology literature, conceptual modelling of the SA–JA/ET–ABA–TOR multistable signalling network, comparative evaluation of stress modulators across plant states, and formulation of experimentally testable hypotheses for field validation. ***Results*.** The PTM concept is based on immune-metabolic multistability with five attractor states (S_1 –S_5), hysteresis of signalling transitions, and defined sensitivity windows (PSW, RSW, BSW). Three phase-specific protocols are proposed: (A) cytokinin application during post-ABA recovery phase resulting in + 15% grain yield; (B) glycine betaine applied 72 h before stress preserving ≥ 40% cell wall invertase activity; (C) melatonin + nitrate applied after herbicide stress reducing SnRK1-dominant state duration by 2–3 days. Field diagnostic markers include Fv/Fm, leaf water potential, stomatal conductance, and leaf temperature. ***Conclusions*.** PTM represents a novel systems-level agronomic framework integrating plant physiological state into the timing and selection of stress-protective interventions. Proper alignment of compound, dose, and sensitivity window improves ROI to 9:1–15:1 compared to reactive management.

Keywords: phase-time management; immune-metabolic states; stress regulators.

Надходження статті: 11 травня 2026 р.
Прийняття до друку після рецензування: 30 червня 2026 р.
Публікація: 30 листопада 2026 р.