

<https://doi.org/10.15407/frg2022.05.387>

УДК 632.954:551.583

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА БУР'ЯНОВУ РОСЛИННІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДІЇ ГЕРБІЦИДІВ

Ж.З. ГУРАЛЬЧУК

*Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17
e-mail: azhanna@ukr.net*

Глобальні зміни клімату, які відбуваються останнім часом, ставлять перед сільськогосподарськими виробниками завдання стабільного забезпечення продовольством зростаючого населення земної кулі, а перед дослідниками — вивчення змін у видовому складі сеgetальної рослинності, дослідження впливу змін клімату на культурні й бур'янові рослини та їх взаємодію. Розглянуто вплив прогнозованого підвищеного рівня CO₂ в атмосфері, температури, посушливих умов на C₃ і C₄ бур'янові рослини, їх взаємодію з культурними рослинами, оцінено конкурентоспроможність бур'янів, можливість виживати за несприятливих умов унаслідок фізіологічної пластичності та внутрішньовидової генетичної варіабельності, вказано на потенційну небезпеку поширення інвазивних видів бур'янів. Проаналізовано наявні в літературі дані щодо впливу змін клімату на ефективність дії гербіцидів. Підсумовано, що питання впливу підвищених температур, вмісту CO₂, посухи й інших змін клімату на ефективність гербіцидів, продуктивність сільськогосподарських культур, ріст, розвиток, особливості поширення та еволюцію бур'янів, взаємодію з культивованими рослинами є важливими і поки що недостатньо вивченими. Дослідження цих питань допоможе внести корективи до технологій захисту посівів з метою мінімізації впливу бур'янів на культурні рослини.

Ключові слова: зміни клімату, CO₂, температура, посуха, бур'яни, гербіциди, ефективність.

На сьогодні та в найближчому майбутньому актуальною проблемою є забезпечення продовольством зростаючої кількості населення земної кулі, чисельність якого до 2050 р. може перевищити 9 млрд осіб [1]. У зв'язку з інтенсивними глобальними змінами клімату особливої ваги набуває забезпечення сталого виробництва сільськогосподарської продукції. Головними чинниками зміни клімату вважають підвищення температури і вмісту CO₂ в атмосфері [2]. Відносний вміст CO₂ в атмосфері постійно зростає — з 280 ppm у доіндустріальний період (середина ХХ ст.) до 425 ppm нині й може становити 800 ppm наприкінці ХХІ ст., якщо збережуться нинішні темпи викидів унаслідок спалювання викопного палива та вирубування лісів [3–6].

Цитування: Гуральчук Ж.З. Вплив кліматичних змін на бур'янову рослинність та ефективність дії гербіцидів. *Фізіологія рослин і генетика*. 2022. 54, № 5. С. 387–403. <https://doi.org/10.15407/frg2022.05.387>

Згідно з однією з моделей, температура глобальної поверхні у XXI ст. може зрости на 1,5—4,5 град унаслідок подвоєння концентрації CO₂ в атмосфері та парникового ефекту [7]. Особливе занепокоєння викликає той факт, що, починаючи з 1880 р., 9 із 10 найспекотніших років припадало саме на період XXI ст. (з 2000 по 2010 рр.) [8]. Прогнози щодо зміни кількості опадів менш певні, але включають більшу ймовірність посухи на нижчих широтах, збільшення кількості опадів на вищих широтах, збільшення частоти та інтенсивності екстремальних опадів [9].

Швидкість підвищення температури повітря в Україні випереджає світові тенденції, середня річна температура зросла на 1,2 °C за тридцять останніх років [10]. Унаслідок зміни кліматичних умов, пов'язаних із підвищенням температури, фактично зміщуються межі природно-кліматичних зон на 100—150 км на північ [11]. У результаті цього сільськогосподарські культури, які раніше вирощували у південних широтах, просуваються значно північніше. Глобальні зміни клімату зумовили значне зростання вірогідності посух [12], які разом із негативним впливом на сільськогосподарські рослини здатні призводити до змін видового складу бур'янових угруповань, посилення конкурентних відносин між вирощуваними рослинами і бур'янами. Вплив зміни клімату на бур'янову рослинність може проявлятися як розширення географічного ареалу (міграція або інтродукція на нові території), зміни життєвих циклів видів і динаміки популяцій [13]. З огляду на зміни клімату Пітерс та співавт. [14] окреслили три різні типи змін у бур'яновій рослинності (зміни ареалу, ніші, ознак), що відбуваються в різних масштабах (масштаби ландшафту, угруповання та популяції) відповідно. На підставі аналізу літературних даних Пітерс та співавт. [14] зазначили, що протягом останніх десятиліть у флорі бур'янів орних екосистем Європи зареєстровано деякі чіткі зміни: зростання кількості теплолюбних бур'янів (шириці звичайної (*Amaranthus retroflexus* L.), канатника Теофраста (*Abutilon theophrasti* Medik.)) в північніших районах включно з екзотичними та потенційно інвазивними видами (просо напівквітуче (*Panicum dichotomiflorum* Michx.), дурман звичайний (*Datura stramonium* L.)). Деякі види (лобода (*Chenopodium* spp.), плоскуха (*Echinochloa* spp.), мишій (*Setaria* spp.), пальчатка (*Digitaria* spp.), сорго алепське (*Sorghum halepense* (L.) Pers.)) розширили свій ареал. Бур'яни, які раніше були не надто поширеними, стали регіонально важливими видами (зірочник середній (*Stellaria media* (L.) Vill.), журавець (*Geranium* spp.), кілька видів підродини гречкових (Polygonaceae), деякі капустяні (Brassicaceae)). Це зумовлює необхідність адаптації систем захисту рослин до змінених умов.

Вологі та м'які зими можуть підвищити виживаність деяких зимуючих однорічних бур'янів, а через тепліше літо й довший період вегетації теплолюбні літні однорічні рослини ростуть у північніших регіонах [15—17].

Бур'яни співіснують разом із культурними рослинами, утворюють єдину систему — агрофітоценоз. Серед бур'янів переважно поширені види, які за життєвою стратегією належать до рослин-експлерентів [18—20]. Вони високопродуктивні за оптимальних умов,

активно реагують на стресові чинники, є піонерними рослинами, оскільки забезпечують цілісність рослинного покриву внаслідок формування фітоценозів перших стадій відновлення після їх знищення різноманітними природними чинниками. Отже, бур'яни виявилися пристосованими до існування в посівах, які по суті є вторинними сукцесіями. У багатьох випадках бур'яни домінують в екосистемі й утворюють велику популяцію [2]. Успішне існування бур'янів в агрофітоценозах забезпечують їх висока насіннева продуктивність, яка сприяє утворенню банку насіння в ґрунті, здатність насіння бур'янів перебувати у стані органічного спокою і зберігати життєздатність упродовж багатьох років, а також високі конкурентоспроможність, агресивність та адаптивність [20—22]. Через це бур'яни виживають за несприятливих умов існування, в тому числі й за тих, що пов'язані зі змінами клімату.

Зміни клімату можуть позначатися не лише на життєдіяльності культурних і бур'янових рослин, а й на їхній взаємодії, проте ці питання вивчені недостатньо. Невизначеність реакції рослин зростає за одночасного поєднання дії кількох кліматичних чинників [2, 23]. Наприклад, на поширення бур'янів перш за все впливають температура і волога, однак вміст CO_2 в атмосфері може коригувати їхню дію. Підвищений вміст CO_2 здатний посилювати толерантність бур'янових рослин до несприятливих умов, зокрема до низьких температур, унаслідок чого їхній ареал зміщуватиметься у полярніші області [24—26]. Через зростання вмісту CO_2 можуть змінитись поширення й кількість бур'янів по всій планеті в результаті підвищеної толерантності до посухи [27]. При цьому значною мірою зросте поширення інвазивних видів бур'янів [28—32], втручання яких у природні еколого-ценотичні процеси спричинюватиме перерозподіл видів у групуваннях. Інвазивні чужорідні види руйнують біогеографічні сфери, впливають на багатство і чисельність місцевих видів, підвищують ризик зникнення місцевих видів, впливають на генетичний склад місцевих популяцій, змінюють поведінку місцевих тварин, філогенетичне різноманіття в спільнотах і трофічні мережі [33]. Крім того, якщо інвазія супроводжується фітопатогенними організмами рослин (або якщо вже є патогени, здатні інфікувати нового хазяїна), сформується нова патосистема, якої не було без інвазії рослин [34].

Слід зазначити, що нині за інвазивною здатністю в Україні найбільш потенційно небезпечними для довкілля є види рослин, що знаходяться в стані експансії (принаймні 29 видів) і види з високою інвазивною здатністю (близько 100 видів) [35]. Логічно передбачити, що зі зміною кліматичних умов їхня кількість може значно зрости. Наявність інвазивних видів рослин у посівах сільськогосподарських культур істотно знижує урожайність. За оцінками деяких учених [36—38], щоб запобігти своєму зникненню, рослини можуть або мігрувати в місця зі сприятливим кліматом через механізми дисперсії, або пристосуватись до змін кліматичних умов за допомогою фенотипної пластичності, або ж адаптуватися із залученням еволюційних пристосувань. Види бур'янів більш конкурентоспроможні й ліпше виживають за несприятливих умов унаслідок фізіологічної пластичності та ширшої внутрішньовидової генетичної варіабельності порівняно з більшістю

культурних рослин [39, 40]. Звісно ж, на ріст і розвиток бур'янів можуть опосередковано впливати виробники сільськогосподарської продукції доборою тієї чи іншої культури для вирощування, терміну її посіву, часу збирання врожаю, системи захисту рослин тощо [41].

Вплив підвищеного рівня CO_2 і температури на бур'янові рослини.

Підвищений рівень CO_2 в атмосфері чинитиме різний вплив на фізіологічні процеси культурних рослин і бур'янів із C_3 і C_4 типами фотосинтезу [42, 43]. Слід зазначити, що більшість сільськогосподарських культур, які вирощують у світі, належить до C_3 -рослин, тоді як переважна кількість бур'янів є C_4 -рослинами. Так, за даними, наведеними в огляді Манісанкар, Рамеш [44], серед 86 видів рослин, які головно забезпечують людство продовольством, лише 5 належать до C_4 -видів. І навпаки, серед 18 найбільш шкодочинних видів бур'янів основну частку (14) становлять C_4 -види.

Фотосинтетична асиміляція CO_2 є основою продукційного процесу рослин, оскільки близько 90 % маси сухої речовини формується в результаті фотосинтезу [45]. При цьому загалом у C_3 -рослин інтенсивність фотосинтезу і продуктивність досягають максимуму за концентрації CO_2 у повітрі близько 1000 ppm, у C_4 -рослин — за поточних рівнів CO_2 (~400 ppm), а надмірний вміст CO_2 може гальмувати фотосинтез і ростові процеси [46—52]. У разі підвищення концентрації CO_2 у повітрі в рослин змінюються не тільки швидкість фотосинтезу, а й температурний та світловий оптимуми. При цьому температурний оптимум фотосинтезу зміщується в бік вищих значень на 5—10 °C. Крім того, з підвищенням вмісту CO_2 в повітрі рослини ефективніше використовують воду, поживні речовини і світлову енергію [53]. Підвищена концентрація CO_2 пом'якшує несприятливі наслідки дефіциту води, підвищує ефективність її використання [54—55]. Це може посилити конкурентоспроможність деяких видів бур'янів порівняно з іншими рослинами за посушливих умов.

Зростання концентрації CO_2 в атмосфері може стимулювати процеси фотосинтезу C_3 -рослин через підвищення рівня CO_2 всередині листків, а також унаслідок зменшення втрат CO_2 при фотодиханні [44]. Отже, за цих умов C_3 -рослини матимуть перевагу порівняно з C_4 -рослинами. Зі збільшенням вмісту вуглекислого газу в атмосфері вегетативний ріст, конкуренція та потенційна врожайність економічно важливих C_4 -культур можуть знижуватись суміжними C_3 -бур'янами, як це було показано, наприклад, для конкурентних сумішей сорго і нетреби звичайної (*Xanthium strumarium* L.) [42]. При вирощуванні сої (C_3 -рослина) за наявності лободи білої (*Chenopodium album* (L.)), яка теж є C_3 -рослиною, за підвищеного на 250 ppm рівня CO_2 втрати врожаю культури порівняно з незабур'яненими ділянками збільшувались (на 39 % порівняно з 28), а за наявності шириці звичайної (C_4 -рослина), навпаки, зменшувались (із 45 до 30 %) [56]. Підвищений рівень CO_2 в повітрі може збільшити втрати урожаю і вегетативної маси C_3 -рослин культури при засміченні посіву як C_3 -, так і C_4 -бур'янами, що було показано в експериментах із карликовим просом за наявності канатника Теофраста (C_3) і шириці звичайної (C_4) [44]. C_3 -бур'яни відповідають на зростання рівня CO_2 сильніше, ніж C_4 , збільшенням накопичення маси і площі листків. Водночас

позитивна відповідь C_3 -культур на підвищений рівень CO_2 може зменшити конкурентоспроможність C_4 -бур'янів для C_3 -культур, тоді як C_3 -бур'яни у C_4 - або C_3 -культурах можуть стати проблемою, особливо в тропічних регіонах [57, 58]. Слід зазначити, що існує як внутрішньовидова, так і міжвидова варіабельність відгуку рослин на рівень CO_2 , яка також залежить від температури, світла, вологості і доступності поживних речовин [59]. Оскільки C_4 -види стійкіші до підвищених температур і зміни вологозабезпечення, розмірковувати про те, що підвищення рівня CO_2 буде корисним лише для C_3 -рослин треба з обережністю [2]. Існує певна біологічна невизначеність щодо прогнозування майбутніх урожаїв через вплив підвищеного рівня CO_2 у поєднанні з іншими змінами клімату на біологію бур'янів, конкуренцію культурних і бур'янових рослин [60, 61], адже в фітоагроценозах кожна культура конкурує зі значною кількістю видів бур'янів.

Як ми уже зазначали, підвищений рівень CO_2 в повітрі може віддавати перевагу видам із C_3 типом фотосинтезу порівняно з C_4 -видами, тоді як зростання температури, навпаки, може бути позитивнішим для C_4 -рослин [62]. Температура впливає на всі процеси життєдіяльності рослин, що в кінцевому підсумку позначається на інтенсивності їхнього росту. При цьому генеративний період розвитку чутливіший до зміни температур порівняно з вегетативним, життєвий цикл бур'янів може істотно скоротитися за некомфортних умов [63]. За несприятливих температур бур'яни мають або адаптуватися, або змінити ареал. У зв'язку з глобальним потеплінням ареал багатьох C_4 -видів бур'янів може змінитися і зміститися на північ [25]. Крім того, м'якші зими можуть призвести до ліпшого виживання зимуючих видів бур'янів, а вищі температури влітку — до інтенсивнішого росту однорічних літніх бур'янів у північніших широтах [16]. Підвищені температури є важливим абіотичним чинником, що впливає на біологію інвазивних бур'янів і можливість їх поширення у вищі широти [64].

Ефективність гербіцидів в умовах зміненого клімату. Зміни концентрації CO_2 можуть позначатись на ефективності гербіцидів. Це пов'язано, зокрема, зі стимуляцією росту бур'янів за підвищеної концентрації CO_2 в атмосфері, збільшенням співвідношення мас кореня і стебла [59, 65], скороченням часу проходження ювенільних фаз розвитку, коли бур'яни найчутливіші до гербіцидів [66]. За даними деяких дослідників [67, 68], зі зростанням вмісту CO_2 в атмосфері у C_3 -рослин зменшувались кількість продихів і продихова провідність, збільшувалась товщина листків, що може негативно впливати на поглинання гербіцидів, зокрема гліфосату [69, 70]. Крім того, збільшення інтенсивності росту і співвідношення мас кореня й пагона зменшує ефективність гербіцидів, як це було показано на прикладі дії гліфосату на осот (*Cirsium arvense* L. Scop.) за підвищеного на 350 мкМ/моль вмісту CO_2 порівняно з його кількістю в довкіллі [71]. Вважають, що таке зниження ефективності гліфосату зумовлене не відмінністю в поглинанні гербіциду, а ефектом «розбавляння», пов'язаним із сильнішою стимуляцією росту коренів порівняно з пагонами за підвищеного вмісту CO_2 . У дослідженні, проведеному з двома видами бур'янів, *Amaranthus retroflexus* L. (C_4 -рослина) і

Chenopodium album L. (C₃-рослини), Зиска та співавт. [72] виявили, що незалежно від вмісту CO₂ при внесенні 0,1 і 1,0 норми гліфосату рослини *A. retroflexus* відповідно пригнічувались або повністю знищувались, тоді як за підвищеного вмісту CO₂ порівняно з наявним у довкіллі *C. album* був менш чутливим до гліфосату. Пізніше Зиска і Тисдейл [69] виявили подібну толерантність в умовах підвищеного вмісту CO₂ для C₃-виду пирію повзучого *Elytrigia repens* (L.) Nevski, яка більшою мірою виявилась у зріліших рослин і, можливо, була зумовлена зменшенням продихової провідності та, відповідно, ослабленням абсорбції гліфосату або характерним для C₃-рослин за цих умов збільшенням вмісту крохмалю в листках. Підвищення концентрації крохмалю в листках може призвести до зниження вмісту в них протеїну й меншої потреби в амінокислотах, а в результаті — до зниження ефективності гербіцидів, які інгібують синтез амінокислот. Зменшення запиту рослини на амінокислоти може заціпати дію гербіцидів інгібіторів ацетолактатсинтази, які інгібують синтез амінокислот із розгалуженим ланцюгом (лейцин, ізолейцин, валін), інгібіторів шикиматного шляху, які впливають на синтез ароматичних амінокислот (триптофан, фенілаланін, тирозин), інгібіторів глутамінсинтази [73]. При цьому вплив підвищеного рівня CO₂ на ефективність гербіцидів, сайтом дії яких є синтез амінокислот, видоспецифічний, як це показано для гербіцидів інгібіторів ацетолактатсинтази (АЛС) [74]. Дослідженнями Манея та співавт. [65] показано, що три з чотирьох інвазивних екзотичних трав у Австралії, які належать до C₄-рослин, також мали вищу толерантність до гліфосату за підвищеного вмісту CO₂: *Chloris gayana* Kunth, *Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees і *Paspalum dilatatum* Poir., тоді як у *Sporobolus indicus* (L.) R.Br. впливу CO₂ на толерантність до гербіциду не виявлено. Зроблено припущення, що підвищена толерантність може бути пов'язана зі збільшенням маси рослин та ефектом «розбавляння» гліфосату в рослинах. Слід зазначити, що в літературі трапляються поодинокі дані стосовно відсутності змін в ефективності гліфосату у відповідь на підвищення рівня CO₂ або температури, як це продемонстровано для стоколоса покрівельного (*Bromus tectorum* L.), ячменю мишачого (*Hordeum murinum* L.) і латуку компасного (*Lactuca serriola* L.) [75].

Відомо, що чутливість до гліфосату може залежати від його переміщення й розподілу в рослинах, секвестрування у вакуолях, а також некрозу листків, що впливає на транслокацію гербіциду [76]. Знижену чутливість до гліфосату у відповідь на підвищену температуру, підвищений рівень CO₂ і поєднання обох цих чинників також спостерігали у пізніших дослідженнях у видів злиски канадської (*Conyza canadensis* (L.) Cronquist) і лободи білої (*Chenopodium album*), які відрізняються між собою характеристиками поверхні листка, фенологією цвітіння та архітектонікою рослин [77]. У цьому разі підвищена температура (32/26 °C день/ніч) сильніше впливала на виживаність рослин, ніж підвищений (720 ppm) рівень CO₂. За поєднаної дії високої температури і підвищеного рівня CO₂ втрачалось апікальне домінування та швидко наставав некроз у рослин, оброблених гліфосатом. Із використанням ¹⁴C-гліфосату показано, що в росли-

нах, які зазнали впливу високих температур і підвищеного рівня CO₂, гліфосат швидше переміщувався з оброблених листків до меристем пагонів і коренів, ніж у рослинах, вирощених за контрольних умов. Ці результати свідчать про те, що зміни транслокації гліфосату і тканиноспецифічне секвестрування можуть бути основою зниження чутливості рослин до гербіциду. Втрата апікального домінування та рання ініціація репродуктивних структур, які спостерігали в цьому дослідженні в оброблених гліфосатом рослин, вирощених за високої температури, можуть ще більше посилити проблеми з бур'янами внаслідок збільшення кількості насіння на рослину та швидкого поповнення банку насіння в ґрунті [77].

Підвищені рівні CO₂ (550 ppm порівняно з 380 ppm) можуть змінити ефективність деяких гербіцидів у боротьбі з бур'янами, але рівень толерантності до гербіцидів залежить від виду, тобто реакція бур'янів на гербіцид за підвищеного рівня CO₂ є видоспецифічною [78]. У дослідженні C₃-злакові трави були чутливішими до гербіцидів, зокрема гліфосату, порівняно з C₄-травами, причому стійкість до гербіцидів за цих умов не корелювала з рівнем накопичення маси рослин. Причини неоднозначної реакції досліджуваних видів рослин на різні норми внесення гербіцидів залежно від концентрації CO₂ в повітрі поки що залишаються нез'ясованими.

Неоднакова реакція бур'янів і культур на підвищення рівня CO₂ внаслідок змін у фенології та цвітінні може спричинити перенесення генів між ними. Це показано для бур'янистого червоного рису і Clearfield (гербіцидостійкої лінії рису), в яких періоди цвітіння збігалися з підвищенням вмісту CO₂, що призводило до збільшення деодомашнення рису та зростання кількості бур'янистих гібридних потомків, стійких до гербіцидів [79].

Високі температури, які фіксують протягом тривалого часу, можуть знизити ефективність і змінити вибірковість як до-, так і післясходових гербіцидів [80–82]. За високих температур навіть селективний гербіцид може стати неселективним [83]. Через збільшення інтенсивності росту рослин за підвищених температур скорочується період, протягом якого обприскування гербіцидом є найефективнішим, доки конкуренція між культурою і бур'янами не стає критичною [84]. З одного боку, підвищені температури можуть збільшити ефективність післясходових гербіцидів пришвидшенням їх поглинання і транслокації у рослинах, з іншого — також можуть посилити метаболічну активність, що призводить до зниження ефективності гербіцидів [85, 86]. Підвищені температури зменшували ефективність глюфосинату амонію для райграсу (*Lolium multiflorum*) і баяграсу (*Paspalum notatum*): за температур 10/15 і 15/20 °C відсоток контролювання був значно вищим, ніж за температур 20/25 і 25/30 °C [87]. Для гербіциду інгібітора АІС MON 37500, навпаки, показано більшу ефективність контролювання бур'янів оводника циліндричного (*Aegilops cylindrica* Host.), вівса дикого (*Avena fatua* L.), стоколоса покрівельного (*Bromus tectorum* L.) за температури 25/23 °C після обробки або оптимального вологозабезпечення порівняно з 5/3 °C після обробки або на дві третини меншим вологозабезпеченням [88]. Низька температура повітря ослаблювала метаболізм інгібітора АІС

MON 37500 в усіх досліджених видів, тоді як вологість ґрунту не впливала на цей показник.

За підвищеної температури знижувалась чутливість до піноксадену — інгібітора ацетил-КоА-карбоксилази кількох популяцій злакових бур'янів [89], зумовлена змінами метаболічної детоксикації гербіциду. Рівні неактивного глюкозокон'югованого продукту піноксадену (M5) були значно вищими за високої температури (38/24 °C) порівняно з низькою (16/10 °C). За високої температури швидке підвищення рівня проміжного метаболіту (M4) виявлено лише у рослин, стійких до піноксадену.

Амарант Палмера був чутливішим до мезотріону — інгібітора 4-гідроксифенілпіруватдіоксигенази за низьких температур (25/15 °C) і менш чутливим — за високих (40/30 °C) порівняно з оптимальними (32,5/22,5 °C) [90]. За високих температур відносно менше мезотріону переміщувалось до меристематичних зон, ніж за низьких і оптимальних, а його метаболізація відбувалася швидше. Водночас вищу стійкість до параквату виявлено в резистентній популяції пажитниці жорсткої (*Lolium rigidum* Gaud.), яку витримували за низької температури (15 °C), ніж за 30 °C після обробки цим гербіцидом [91].

Низька температура (близько 12 °C) помітно зменшувала вакуолярне секвестрування гліфосату в резистентного до цього гербіциду біотипу злинки канадської [92]. За дії підвищеної температури (30 °C) швидкість вакуолярного секвестрування гліфосату вища, що корелює зі змінами резистентності рослин до гербіциду.

Температура є одним із вирішальних чинників, які впливають на ефективність боротьби з бур'янами при застосуванні 2,4-Д. Показано підвищений рівень стійкості до 2,4-Д у резистентній щириці (*Amaranthus tuberculatus*) за високої температури (34/20 °C) порівняно з низькою (24/10 °C). Як чутливі до дії гербіциду, так і резистентні рослини водяних конопель швидко метаболізували ¹⁴C 2,4-Д за високої температури. Швидкий метаболізм 2,4-Д забезпечив підвищений рівень резистентності до 2,4-Д стійких рослин за високої температури. Отже, застосування 2,4-Д за низьких температур може поліпшити контроль стійких до 2,4-Д рослин щириці [93].

У дослідях Рефатті та співавт. [94] за підвищених вмісту CO₂ і температури зменшувалась ефективність інгібітора ацетил-КоА-карбоксилази цихалофопбутилу в рослин мультирезистентного біотипу *Echinochloa colona* L. майже на 50 % порівняно з тими, що росли за звичайних умов. При цьому цікавим є те, що у рослин чутливого генотипу, незважаючи на більше накопичення маси рослин, ні підвищена температура, ні збільшений вміст CO₂ не зменшували ефективності гербіциду.

Посухи, спричинені зменшенням кількості опадів або нерівномірним їх розподілом протягом року, негативно впливають на фізіологічні процеси у рослин. У них зменшується відкривання продихів, потовщується кутикула, збільшуються кількість воску в кутикулярному шарі, опушення листків [83]. Все це є додатковим бар'єром для проникнення молекул гербіцидів у листки бур'янових рослин.

Уповільнення швидкості росту бур'янів, яке настає за посухи, може призвести до зниження ефективності післясходових системних

гербицидів, які потребують активного росту рослин для транслокації та розвитку фітотоксичної дії [2]. Водночас для досходових гербицидів існує небезпека слабкішого поглинання кореннями рослин у зв'язку з недостатньою вологістю ґрунту, а також ослаблення детоксикації, зумовлене зменшенням активності мікробіоти ґрунту [39]. Спричинений посухою стрес знижував фітотоксичність гліфосату у рослин канатника Теофраста [95]. Частково зменшення ефективності гліфосату пояснюється зміною орієнтації листків (нахилом вниз), але вважають, що головною причиною підвищення толерантності є стресовий стан рослин. За недостатнього водозабезпечення знижувалась ефективність гліфосату в двох австралійських біотипів *Echinochloa colona* (як стійкого до гліфосату, так і чутливого) [96].

Ефективність контролювання трьох видів шириці післясходовим неселективним гербицидом інгібітором глутамінсинтетази глюфосинатом за меншої відносної вологості зменшувалась у дослідах Кетцер та співавт. [97]. Основна частка абсорбованого глюфосинату залишалася в оброблених листках, однак транслокація глюфосинату була більшою в рослинах, які вирощували за 90 %-ї вологості, ніж у тих, які культивували за відносної вологості 35 % і це збігалось з вищим рівнем контролювання видів амаранту за високої вологості.

При застосуванні трибенуронметилу вміст вільних амінокислот із розгалуженим ланцюгом у листках рослин, як правило, знижувався. Однак у підмаренника чіпкого (*Galium aparine* L.) і романа польового (*Anthemis arvensis* L.) цей показник зростає після застосування гербициду за низької (30 % ПГВ) вологості ґрунту, у *G. aparine* — за нижньої відносної вологості 50 %, ймовірно, через надмірне продукування амінокислот у відповідь на умови навколишнього середовища [98]. Оскільки температура і відносна вологість змінюються протягом доби, ефективність післясходових гербицидів, зокрема інгібіторів синтезу амінокислот — гліфосату та імазетапіру, за їх застосування в посіві сої може варіювати залежно від часу їх внесення [99]. Для багатьох видів бур'янів ефективність контролювання післясходовими гербицидами (атразин, бромоксиніл, дикамба/дифлуфензопір, гліфосат, глюфосинат, нікосульфурон) була знижена за обробки рано вранці або пізно ввечері [100]. Найчутливішим до часу внесення гербицидів протягом доби виявився абутилон Теофраста, за ним слідували амброзія звичайна, лобода біла і шириця звичайна. Дещо менш чутливими були злакові бур'яни плоскуха звичайна (*Echinochloa crus-galli* (L.) P.Beauv.) та мишій зелений (*Setaria viridis* (L.) Beauv.). Отримані результати підтвердили значний видоспецифічний вплив температури навколишнього повітря, інтенсивності освітлення та орієнтації листків на ефективність післясходових гербицидів [99]. Водночас для нового гербициду інгібітора 4-гідроксифенілпіруватдегідрогенази (HPPD) толпіралату, застосованого разом із атразином у посіві кукурудзи, не виявлено залежності ефективності від часу внесення протягом доби [101].

За незначної кількості опадів, принаймні за 7 діб до та після застосування гербициду в посівах сої, знижувався рівень контролювання бур'янів при обробках, які включали інгібітори АЛС імазетапір за досходового або післясходового застосування, чи флуметсулам із хлор-

ацетамідом *S*-метолахлором (премікс) за досходового внесення. Водночас кумулятивні опади протягом 12 діб після досходового застосування, які перевищували середньомісячну їх кількість щонайменше на 60 %, знизили рівень контролювання лободи білої (*Chenopodium album* L.) при застосуванні інгібітора транспорту електронів у фотосистемі II метрибузину і мишію зеленого (*Setaria viridis* L. (Beauv.)) при внесенні імазетапіру [102].

За рівнем виживаності й накопиченням маси сухої речовини виявлено підвищену стійкість до гербіцидів наступних поколінь бур'янів у тому випадку, коли попередні зазнали дії посухи [103]. Ці дослідники вважають, що посуха може надати стійкості до гербіцидів, але механізм успадкування такої стійкості не є генетичним.

Останніми роками через переважання зернових колосових у сівозмінах у ґрунтово-кліматичних зонах України та, відповідно, внаслідок систематичного застосування гербіцидів для знищення двосім'ядольних видів бур'янів у цих посівах спостерігається тенденція до збільшення засміченості бур'янами з родини тонконогових (злакових) [104]. Для контролювання бур'янів з цієї родини широко застосовують гербіциди класу інгібіторів ацетил-КоА-карбоксилази (грамініциди). Фітотоксична дія грамініцидів на злакові бур'яни значною мірою залежить від умов навколишнього середовища, зокрема істотно зменшується в умовах посухи [105–108]. Це, у тому числі, пов'язано з тим, що остаточна фітотоксичність гербіцидів не визначається на рівні сайту дії (мішені гербіциду), а залежить від проходження етапу індукованого гербіцидами патогенезу — процесів, які відбуваються не тільки внаслідок взаємодії гербіциду з його сайтом дії. Свій внесок в індукований гербіцидами патогенез може робити стресова реакція рослин-бур'янів [109].

Ефективний захист посівів від бур'янів є передумовою отримання стабільно високих урожаїв. Питання впливу підвищених температур, вмісту CO₂, посухи та інших змін клімату на продуктивність сільськогосподарських культур, ріст, розвиток, особливості поширення та еволюцію бур'янів, їх взаємодію з культивованими рослинами й на ефективність гербіцидів є важливими і поки що недостатньо дослідженими. Вивчення цих питань у зв'язку зі зростаючим тиском добору, який чинять зміни кліматичних умов на бур'янові рослини та їхню реакцію на гербіциди, допоможе внести корективи до технологій захисту посівів з метою мінімізації впливу бур'янів на культурні рослини. В умовах кліматичних змін важливо коригувати існуючі системи захисту посівів. Перспективними є дослідження можливості використання ад'ювантів для підвищення ефективності контролювання небажаної рослинності, а також комплексного застосування гербіцидів із різними механізмами дії з метою підвищення ефективності гербіцидів, запобігання виробленню резистентності бур'янових рослин до гербіцидів. Важливу роль в адаптації існуючих стратегій боротьби з бур'янами можуть відіграти розробка і створення гербіцидних препаратів із новими механізмами фітотоксичності [110]. Особливо вагомим і необхідним стає інтеграція старих і нових технологій боротьби з бур'янами в різноманітні системи захисту рослин, засновані на еко-

логічних принципах і ліпшому розумінні біології бур'янів [111–114]. Велике значення матиме розробка альтернативних підходів до захисту рослин, пошук нової парадигми боротьби з бур'янами [115].

REFERENCES

1. FAO (2009). How to feed the world in 2050. Retrieved from <http://www.fao.org>.
2. Anwar, M.P., Islam, A.K.M.M., Yeasmin, S., Rashid, M.H., Juraimi, A.S., Ahmed, S. & Shrestha, A. (2021). Weeds and their Responses to Management Efforts in a Changing Climate. *Agronomy*, 11, 1921, pp. 1-20. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101921>
3. Boychenko, S.G. & Voloshchuk, G.M. (2004). Peculiarities of the age dynamics of carbon dioxide in the atmosphere. *Naukovi pratsi UkrNDGMI*, 253, pp. 72-91 [in Ukrainian].
4. Leakey, A.D.B., Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Rogers, A., Long, S. P. & Ort, D. R. (2009). Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany*, 60 (10), pp. 2859-2876. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp096>
5. Bloomberg Carbon Clock (2022). Retrieved from <https://www.bloomberg.com/graphics/climate-change-data-green/carbon-clock.html>.
6. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee M., Ebi, K.L., Estrada Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
7. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate, Change; Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., (Eds.); Cambridge University Press: Cambridge, UK, 881 p.
8. Mittler, R., Finka, A. & Goloubinoff, P. (2012). How do plants feel the heat? *Trends Biochem Sci.*, 37, No. 3, pp. 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2011.11.007>
9. Ziska, L.H., Blumenthal, D.M. & Franks, S.J. (2019). Understanding the nexus of rising CO₂, climate change, and evolution in weed biology. *Invasive Plant Science and Management*, 12, Iss. 2, pp. 79-88. <https://doi.org/10.1017/inp.2019.12>
10. How the climate is changing in Ukraine. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. March 15, 2020. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/news/35246.html>
11. National report on the state of the environment in Ukraine in 2011 (2012). Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. Kyiv: LAT [in Ukrainian].
12. Semenova, I.N. (2015). Synoptic and climatic conditions of drought formation in Ukraine (Unpublished Doctoral thesis). Odessa State Ecological University, Odessa, Ukraine [in Ukrainian].
13. Ramesh, K., Matloob, A., Aslam, F., Florentine, S.K. & Chauhan, B.S. (2017). Weeds in a Changing Climate: Vulnerabilities, Consequences, and Implications for Future Weed Management *Frontiers in Plant Science*, 8, pp. 1-12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00095>.
14. Peters, K., Breitsameter, L. & Gerowitt, B. (2014). Impact of climate change on weeds in agriculture: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, 34, pp. 707-721. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0245-2>.
15. Bloomfield, J.P., Williams, R.J., Gooddy, D.C., Cape, J.N. & Guha, P. (2006). Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater — a UK perspective. *Science of the Total Environment*, 369 (1-3), pp. 163-177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.05.019>

16. Walck, J.L., Hidayati, S.N., Dixon, K.W., Thompson, K. & Poschod, P. (2011). Climate change and plant regeneration from seed. *Global Change Biol.*, 17, pp. 2145-2161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02368.x>
17. Hanzlik, K. & Gerowitt, B. (2012). Occurrence and distribution of important weed species in German winter oilseed rape fields. *J. Plant Dis. Prot.*, 119, pp. 107-120. <https://doi.org/10.1007/BF03356429>
18. Morderer, Ye.Yu. (2012). Weeds in crops. In: Strategy and tactics of plant protection. V. 1. Strategy/V.P. Fedorenko ed. Kyiv: Alfa-stevia, pp. 215-242 [in Ukrainian].
19. Morderer, Ye.Yu., Guralchuk, Zh.Z. & Morgun, V.V. (2018). The problem of controlling segetal vegetation in agrophytocenoses in the context of biodiversity conservation. *Ukr. bot. J.*, 75, No. 6, pp. 552-563 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj75.06.552>
20. Ivashchenko, O.O. & Ivashchenko, O.O. (2019). General herbology. Kyiv: Fenix [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36495/ISBN978-966-136-649-6/2019.752s>
21. Chandrasena, N. (2009). How will weed management change under climate change? Some perspectives. *J. Crop Weed*, 5, pp. 95-105.
22. Sharma, G., Barney, J.N., Westwood, J.H. & Haak, D.C. (2021). Into the weeds: new insights in plant stress. *Trends in Plant Science*, 26, No. 10, pp. 1050-1060. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.06.003>
23. Gray, S.B. & Brady, S.M. (2016). Plant developmental responses to climate change. *Developmental Biology*, 419, No. 1, pp. 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.02>
24. Boese, S.R., Wolfe, D.W. & Melkonian, J. (1997). Elevated CO₂ mitigates chilling-induced water stress and photosynthetic reduction during chilling. *Plant Cell Environ.*, 20, pp. 625-632. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1997.00082.x>
25. McDonald, A., Riha, S., DiTommaso, A. & DeGaetano, A. (2009). Climate change and the geography of weed damage: Analysis of U.S. maize systems suggests the potential for significant range transformations. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 130, No. 3-4, pp. 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.12.007>
26. Ziska, L.H. & Dukes, J.S. (2011). *Weed Biology and Climate Change*. Blackwell Publishing Ltd.: Hoboken, NJ, USA.
27. Bunce, J.A. (2001). Weeds in a changing climate. In: *Proceedings of the World's Worst Weeds — Proceedings of an International Symposium*, Brighton, UK, 12 November 2001, pp. 109-118. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20023001912>
28. Nguyen, T., Bajwa, A.A., Navie, S., O'Donnell, C. & Adkins, S. (2017). Parthenium weed (*Parthenium hysterophorus* L.) and climate change: the effect of CO₂ concentration, temperature, and water deficit on growth and reproduction of two biotypes. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 24, No. 11, pp. 10727-10739. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8737-7>
29. Bashar, H.M.K., Juraimi, A.S., Ahmad-Hamdani, M.S., Uddin, M.K., Asib, N., Anwar, M.P. & Rahaman, F. (2021). A Mystic Weed, *Parthenium hysterophorus*: Threats, Potentials and Management. *Agronomy*, 11, 1514. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081514>
30. Chadha, A., Florentine, S., Javid, M., Welgama, A. & Turville, C. (2020). Influence of elements of climate change on the growth and fecundity of *Datura stramonium*. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27 (28), pp. 35859-35869. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10251-y>
31. Clements, D.R. & Jones, V.L. (2021). Rapid Evolution of Invasive Weeds Under Climate Change: Present Evidence and Future Research Needs. *Front. Agron.* 3:664034. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.664034>
32. Sun, Y., Kaleibar, B.P., Oveisi, M. & Muller-Scharer, H. (2021). Addressing Climate Change: What Can Plant Invasion Science and Weed Science Learn From Each Other? *Front. Agron.* 2:626005. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.626005>
33. Pysek, P., Hulme, P.E., Simberloff, D., Bacher, S., Blackburn, T.M., Carlton, J.T., Dawson, W., Essl, F., Foxcroft, L.C., Genovesi, P., Jeschke, J.M., Kuhn, I., Liebhold, A.M., Mandrak, N.E., Meyerson, L.A., Pauchard, A., Pergl, J., Roy, H.E., Seebens, H., van Kleunen, M., Vila, M., Wingfield, M.J. & Richardson, D.M. (2020). Scientists' warning on invasive alien species. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* 95 (6): 1511-1534. <https://doi.org/10.1111/brv.12627>
34. Pautasso, M., Dehnen-Schmutz, K., Holdenrieder, O., Pietravalle, S., Salama, N., Jeger, M.J., Lange, E. & Hehl-Lange, S. (2010). Plant health and global change-some implications for landscape management. *Biol. Rev.*, 85, pp. 729-755.

35. Protopopova, V.V., Mosyakin, S.L. & Shevera, M.V. (2002). Phytoinvasions in Ukraine as a threat to biodiversity: current state and challenges for the future. Kyiv [in Ukrainian].
36. Bulleri, F., Eriksson, B.K., Queirys, A., Airoldi, L., Arenas, F., Arvanitidis, C., Bouma, T.J., Crowe, T.P., Davoult, D., Guizien, K., Ivesa, L., Jenkins, S.R., Michalet, R., Olabarria, C., Procaccini, G., Serrro, E.A., Wahl, M. & Benedetti-Cecchi, L. (2018). Harnessing positive species interactions as a tool against climate-driven loss of coastal biodiversity. *PLoS Biol.* 16(9): e2006852. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2006852>
37. Oostra, V., Saastamoinen, M., Zwaan, B.J. & Wheat, C.W. (2018). Strong phenotypic plasticity limits potential for evolutionary responses to climate change. *Nature Communications*, 9 (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03384-9>
38. Pazzaglia, J., Reusch, T. B. H., Terlizzi, A., Marin Guirao, L. & Procaccini, G. (2021). Phenotypic plasticity under rapid global changes: The intrinsic force for future seagrasses survival. *Evolutionary Applications*, 14, No. 5, pp. 1181-1201. <https://doi.org/10.1111/eva.13212>
39. Singh, R.P., Singh, R.K. & Singh, M.K. (2011). Impact of climate and carbon dioxide change on weeds and their management — a review. *Indian J. Weed Sci.*, 43, pp. 1-11.
40. Ziska, L.H. (2021). Crop Adaptation: Weedy and Crop Wild Relatives as an Untapped Resource to Utilize Recent Increases in Atmospheric CO₂. *Plants*, 10, 88. <https://doi.org/10.3390/plants10010088>
41. Fleming, A. & Vanclay, F. (2010). Farmer responses to climate change and sustainable agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*. 30 (1), pp. 11-19. <https://doi.org/10.1051/agro/2009028>
42. Ziska, L.H. (2001). Changes in competitive ability between a C₄ crop and a C₃ weed with elevated carbon dioxide. *Weed Sci.*, 49 (5), pp. 622-627. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2001\)049\[0622:cicaba\]2.0.co](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2001)049[0622:cicaba]2.0.co)
43. Ziska, L.H. (2003). Evaluation of yield loss in field sorghum from a C₃ and C₄ weed with increasing CO₂. *Weed Sci.*, 51 (6), pp. 914-918. <https://doi.org/10.1614/ws-03-002r>
44. Manisankar, G. & Ramesh, T. (2019). Response of weeds under elevated CO₂ and temperature: a review. *J. Pharmacogn. Phytochem.*, SP2, pp. 427-431.
45. Stasyk, O.O. & Kiriziy, D.A. (2011). Regulatory relationships and limiting factors in the photosynthesis-production process system and prospects for their optimization. *Fiziol. i biokhim. cult. rast.*, 43, No. 3, pp. 226-238 [in Ukrainian].
46. Gulyaev, B.I. (1986). Influence of CO₂ concentration on photosynthesis, growth and productivity of plants. *Fiziol. i biokhim. cult. rast.*, 18, No. 3, pp. 574-591 [in Russian].
47. Kim, S.-H., Sicher, R.C., Bae, H., Gitz, D.C., Baker, T., Timlin, J. & Reddy, V.R. (2006). Canopy photosynthesis, evapotranspiration, leaf nitrogen, and transcription profiles of maize in response to CO₂ enrichment. *Global Change Biology*, 12 (3), pp. 588-600. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01110.x>
48. Idso, C.D., Carter, R.M. & Singer, S.F. (2011). Climate change reconsidered: interim report of the nongovernmental panel on climate change (NIPCC), Chicago, IL: The Heartland Institute.
49. Xu, M. (2015). The optimal atmospheric CO₂ concentration for the growth of winter wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Plant Physiology*, 184, pp. 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.07.00>
50. Zheng, Y., Li, F., Hao, L., Shedayi, A. A., Guo, L., Ma, C., Huang B. & Xu, M. (2018). The optimal CO₂ concentrations for the growth of three perennial grass species. *BMC Plant Biology*, 18 (1). <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1243-3>
51. Zheng, Y., Li, F., Hao, L., Yu, J., Guo, L., Zhou, H., Ma Ch., Chang X. & Xu, M. (2019). Elevated CO₂ concentration induces photosynthetic down-regulation with changes in leaf structure, non-structural carbohydrates and nitrogen content of soybean. *BMC Plant Biology*, 19 (1), 255. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1788-9>
52. Saha, S., Das, B., Chatterjee, D., Sehgal, V.K., Chakraborty, D. & Pal, M. (2020). Crop Growth Responses Towards Elevated Atmospheric CO₂. In: *Plant ecophysiology and adaptation under climate change: mechanisms and perspectives I. General Consequences and Plant Responses*/Hasanuzzaman M. ed. Chapter 6. Springer, pp. 147-198. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-2156-0>.
53. Netis, I.T., Onufran, L.I. & Netis, V.I. (2021). The reaction of plants to the growth of CO₂ concentration in the atmosphere. *Tavr. Nauk. Visnyk*, No. 120, pp. 118-124. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.120.16>.

54. Javaid, M., Florentine, S.K., Ashraf, M., Mahmood, A., Sattar, A., Wasaya, A. & Li, F.M. (2022). Photosynthetic activity and water use efficiency of *Salvia verbenaca* L. under elevated CO₂ and water-deficit conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208, No. 4, pp. 536-551. <https://doi.org/10.1111/jac.12613>
55. Wang, Zh., Wang, Ch. & Liu, Sh. (2022). Elevated CO₂ alleviates adverse effects of drought on plant water relations and photosynthesis: a global meta-analysis. *Journal of Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jec.13988>
56. Ziska, L. H. (2000). The impact of elevated CO₂ on yield loss from a C₃ and C₄ weed in field-grown soybean. *Global Change Biology*, 6(8), pp. 899-905. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00364.x>
57. Korres, N.E., Burgos, N.R., Travlos, I., Vurro, M., Gitsopoulos, T.K., Varanasi, V.K., Duke, S.O., Kudsk, P., Brabham, Ch., Rouse, Ch.E. & Salas-Perez, R. (2019). New directions for integrated weed management: Modern technologies, tools and knowledge discovery. *Advances in Agronomy*. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.01.00>
58. Balbinot, A., Feijjy, A.R., Fipke, M.V., Gehrke, V. R., Agostinetto, D., Kruse, N.D., Ziska, L.H., Camargo, E.R. & de Avila, L.A. (2022). Rising atmospheric CO₂ concentration affect weedy rice growth, seed shattering and seedbank longevity. *Weed Research*, 62, No. 4, pp. 277-286. <https://doi.org/10.1111/wre.12536>
59. Patterson, D.T. (1995). Weeds in a changing climate. *Weed Sci.* 43, pp. 685-701.
60. Ziska, L.H. & Bunce, J.A. (2007). Predicting the impact of changing CO₂ on crop yields: some thoughts on food. *New Phytol.*, 175 (4), pp. 607-618. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02180.x>
61. Hatfield, J.L., Boote, K.J., Kimball, B.A., Ziska, L.H., Izaurralde, R.C., Ort, D., Thomson, A.M. & Wolfe, D. (2011). Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. *Agronomy Journal*, 103 (2), 351. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>
62. Tubiello, F.N., Soussana, J.F. & Howden, S.M. (2007). Crop and pasture response to climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104, pp. 19686-19690. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701728104>
63. Jagadish, K.S., Cairns, J.E., Kumar, A., Somayanda, I.M. & Craufurd, P.Q. (2011). Does susceptibility to heat stress confound screening for drought tolerance in rice? *Funct. Plant Biology*, 38, pp. 261-269. <https://doi.org/10.1071/FP10224>
64. Ziska, L. H., Blumenthal, D. M., Runion, G. B., Hunt, E. R. & Diaz-Soltero, H. (2010). Invasive species and climate change: an agronomic perspective. *Climatic Change*, 105 (1-2), pp. 13-42. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9879-5>
65. Manea, A., Leishman, M.R. & Downey, P.O. (2011). Exotic C₄ grasses have increased tolerance to glyphosate under elevated carbon dioxide. *Weed Sci.*, 59, pp. 28-36. <https://doi.org/10.1614/ws-d-10-00080.1>
66. Guo, P. & Al-Khatib, K. (2003). Temperature effects on germination and growth of red-root pigweed (*Amaranthus retroflexus*), Palmer amaranth (*A. palmeri*), and common waterhemp (*A. rudis*). *Weed Sci.*, 51, pp. 869-875. <https://doi.org/10.1614/P2002-127>
67. Nowak, R.S., Ellsworth, D.S. & Smith, S.D. (2004). Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂: do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytol.*, 162, pp. 253-280.
68. Ainsworth, E.A. & Long, S.P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytol.*, 165, pp. 351-372.
69. Ziska, L.H. & Teasdale, J.R. (2000). Sustained growth and increased tolerance to glyphosate observed in a C₃ perennial weed, quackgrass (*Elytrigia repens*), grown at elevated carbon dioxide. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27, pp. 159-166.
70. Malarkodi, N., Manikandan, N. & Ramaraj, A.P. (2017). Impact of climate change on Weeds and Weed management. *J. Innov. Agric.*, 4, pp. 1-6.
71. Ziska, L. H., Faulkner, S. & Lydon, J. (2004). Changes in biomass and root:shoot ratio of field-grown Canada thistle (*Cirsium arvense*), a noxious, invasive weed, with elevated CO₂: implications for control with glyphosate. *Weed Sci.*, 52 (4), pp. 584-588. <https://doi.org/10.1614/ws-03-161r>
72. Ziska, L.H., Teasdale, J.R. & Bunce, J.A. 1999. Future atmospheric carbon dioxide may increase tolerance to glyphosate. *Weed Sci.*, 47, pp. 608-615.

73. Varanasi, A., Prasad, P.V.V. & Jugulam, M. (2015). Impact of climate change factors on weeds and herbicide efficacy. *Advances in Agronomy*, 135, pp. 107-146. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.09.002>
74. Archambault, D.J., Li, X., Robinson, D., O'Donovan, J.R. & Klein, K.K. (2001). The effects of elevated CO₂ and temperature on herbicide efficacy and weed/crop competition. Report to the Prairie Adaptation Res. Coll., No. 29, pp. 1-29.
75. Jabran, K. & Dogan, M.N. (2018). High carbon dioxide concentration and elevated temperature impact the growth of weeds but do not change the efficacy of glyphosate. *Pest Management Science*, 74, No. 3, pp. 766-771. <https://doi.org/10.1002/ps.4788>
76. Sammons, R.D. & Gaines, T.A. (2014). Glyphosate resistance: state of knowledge. *Pest Management Science*, 70, pp. 1367-1377. <https://doi.org/10.1002/ps.3743>
77. Matzrafi, M., Brunharo, C., Tehranchian, P., Hanson, B.D. & Jasieniuk, M. (2019). Increased temperatures and elevated CO₂ levels reduce the sensitivity of *Coryza canadensis* and *Chenopodium album* to glyphosate. *Sci Rep.*, 9, 2228. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38729-x>
78. Waryszak, P., Lenz, T.I., Leishman, M.R. & Downey, P.O. (2018). Herbicide effectiveness in controlling invasive plants under elevated CO₂: sufficient evidence to rethink weeds management. *Journal of environmental management*, 226, pp. 400-407. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.050>
79. Ziska, L.H., Gealy, D.R., Tomecek, M.B., Jackson, A.K. & Black, H.L. (2012). Recent and projected increases in atmospheric CO₂ concentration can enhance gene flow between wild and genetically altered rice (*Oryza sativa*). *PLoS One*, 7, e37522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037522>
80. Madafiglio, G.P., Medd, R.W., Cornish, P.S. & Van de Ven, R. (2000). Temperature-mediated responses of flumetsulam and metosulam on *Raphanus raphanistrum*. *Weed Res.*, 40, pp. 387-395. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2000.00200.x>
81. Medd, R.W., Van de Ven, R., Pickering, D.I. & Nordblom, T. (2001). Determination of environment specific dose response relationships for clodinafop-propargyl on *Avena* spp. *Weed Res.*, 41, pp. 351-368. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00243.x>
82. Bailey, S.W. (2004). Climate change and decreasing herbicide persistence. *Pest Management Science*, 60 (2), pp. 158-162. <https://doi.org/10.1002/ps.785>
83. Amare, T. (2016). Review on impact of climate change on weed and their management. *J. Agric. Biol. Environ., Stat.* 2, Iss. 3, pp. 21-27. <https://doi.org/10.11648/j.ajbes.20160203.12>
84. Howden, S.M., Soussana, J.F., Tubiello, F.N., Chhetri, N., Dunlop, M. & Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104, pp. 19691-19696. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701890104>
85. Patterson, D.T., Westbrook, J.K., Joyce, R.J.V., Lingren, P.D. & Rogasik, J. (1999). Weeds, insects and diseases. *Clim. Change*, 43, pp. 711-727. <https://doi.org/10.1023/A:1005549400875>
86. Johnson, B.C. & Young, B.G. (2002). Influence of temperature and relative humidity on the foliar activity of mesotrione. *Weed Sci.*, 50, No. 2, pp. 157-161. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0157:iotarh\]2.0.co](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0157:iotarh]2.0.co)
87. Tendai Mucheri (2016). The efficacy of glufocinate ammonium on ryegrass as influenced by different plant growth stages and different temperatures. Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree Master of Science in Agriculture (Agronomy) at Stellenbosch University. Stellenbosch University. 117 p.
88. Olson, B.L. S., Al-Khatib, K., Stahlman, P. & Isakson, P.J. (2000). Efficacy and metabolism of MON 37500 in *Triticum aestivum* and weedy grass species as affected by temperature and soil moisture. *Weed Sci.*, 48 (5), pp. 541-548. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2000\)048\[0541:eamomi\]2.0.co](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2000)048[0541:eamomi]2.0.co)
89. Matzrafi, M., Seiwert, B., Reemtsma, T., Rubin, B. & Peleg, Z. (2016). Climate change increases the risk of herbicide-resistant weeds due to enhanced detoxification. *Planta*, 244, No. 6, pp. 1217-1227. <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2577-4>
90. Godar, A.S., Varanasi, V.K., Nakka, S., Prasad, P.V., Thompson, C.R. & Mithila, J. (2015). Physiological and molecular mechanisms of differential sensitivity of palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) to mesotrione at varying growth temperatures. *PLoS One*, 10, e0126731-e0126731. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126731>
91. Yu, Q., Cairns, A. & Powles, S.B. (2004). Paraquat resistance in a population of *Lolium rigidum*. *Funct Plant Biol*, 31, No. 3, pp. 247-254. <https://doi.org/10.1071/FP03234>

92. Ge, X., d'Avignon, D.A., Ackerman, J.J., Duncan, B., Spaur, M.B. & Sammons, R.D. (2011). Glyphosate-resistant horseweed made sensitive to glyphosate: low-temperature suppression of glyphosate vacuolar sequestration revealed by ³¹P NMR. *Pest Management Science*, 67, No. 10, pp. 1215-1221. <https://doi.org/10.1002/ps.2169>
93. Shyam, Ch., Jhala, A.J., Kruger, G. & Jugulam, M. (2019). Rapid metabolism increases the level of 2,4-D resistance at high temperature in common waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*). *Agronomy & Horticulture — Faculty Publications*. 1303. <https://digital-commons.unl.edu/agronomyfacpub/130>
94. Refatti, J.P., de Avila, L. A., Camargo, E.R., Ziska, L.H., Oliveira, C., Salas-Perez, R., Rouse, Ch.E. & Roma-Burgos, N. (2019). High [CO₂] and Temperature Increase Resistance to Cyhalofop-Butyl in Multiple-Resistant *Echinochloa colona*. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00529>
95. Zhou, J., Tao, B., Messersmith, C.G. & Nalewaja, J.D. (2007). Glyphosate efficacy on velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) is affected by stress. *Weed Sci.*, 55, pp. 240-244. <https://doi.org/10.1614/WS-06-173.1>
96. Mollae, M., Mobli, A. & Chauhan, B.S. (2020). The response of glyphosate-resistant and glyphosate-susceptible biotypes of *Echinochloa colona* to carbon dioxide, soil moisture and glyphosate. *Sci. Rep.*, 10, p. 329. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57307-9>
97. Coetzer, E., Al-Khatib, K. & Loughin, T. M. (2001). Glufosinate efficacy, absorption, and translocation in amaranth as affected by relative humidity and temperature. *Weed Sci.*, 49, No. 1, pp. 8-13. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2001\)049\[0008:geaati\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2001)049[0008:geaati]2.0.CO;2)
98. Kieloch, R., Sadowski, J. & Domaradzki, K. (2014). Influence of selected soil-climatic parameters and application method of tribenuron methyl on biomass productivity and amino acids content in weeds. *J. Plant Dis. Prot.*, 121, pp. 26-31. <https://doi.org/10.1007/BF03356487>
99. Stopps, G.J., Nurse, R.E. & Sikkema, P.H. (2013). The Effect of Time of Day on the Activity of Postemergence Soybean Herbicides. *Weed Technology*, 27, No. 4, pp. 690-695. <https://doi.org/10.1614/wt-d-13-00035.1>
100. Stewart, C.L., Nurse, R.E. & Sikkema, P.H. (2009). Time of Day Impacts Postemergence Weed Control in Corn. *Weed Technology*, 23, No. 3, pp. 346-355. <https://doi.org/10.1614/wt-08-150.1>
101. Langdon, N.M., Soltani, N., Raedar, A. J., Hooker, D.C., Robinson, D.E. & Sikkema, P.H. (2020). Time-of-day effect on weed control efficacy with tolypyralate plus atrazine. *Weed Technology*, 35, No. 1, pp. 149-154. <https://doi.org/10.1017/wet.2020.93>
102. Stewart, C.L., Nurse, R.E., Hamill, A.S. & Sikkema, P.H. (2010). Environment and Soil Conditions Influence Pre — and Postemergence Herbicide Efficacy in Soybean. *Weed Technology*, 24, No. 3, pp. 234-243. <https://doi.org/10.1614/wt-09-009.1>
103. Mohammad, V.H., Osborne, C.P. & Freckleton, R.P. (2022). Drought exposure leads to rapid acquisition and inheritance of herbicide resistance in the weed *Alopecurus myosuroides*. *Ecol. Evol.*, 12(2): e8563. <https://doi.org/10.1002/ece3.8563>
104. Storchous, I. (2013). Effective protection of winter wheat crops from monocotyledonous weeds. *Agro-business today*. April 29, 2013. Retrieved from. <http://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/318-efektyvnyi-zakhyst-positviv-ozymoi-pshenytsi-vid-odnosimiadolynnykh-burianiv.html> [in Ukrainian].
105. Rossi, F.S., Tomaso, J.M. & Neal, J.C. (1993). Fate of fenoxaprop-ethyl applied to moisture-stressed smooth crabgrass (*Digitaria ischaemum* L.). *Weed Sci.*, 41, pp. 335-340. <https://doi.org/10.1017/S0043174500052024>
106. Boydston, R.A. (1992). Drought stress reduces fluazifop-P activity on green foxtail. *Weed Sci*, 40, pp. 20-24. <https://doi.org/10.1017/S0043174500056885>
107. Radchenko, M., Sychuk, A. & Morderer, Ye. (2014). Decrease of the herbicide fenoxaprop phytotoxicity in the drought condition: the role of antioxidant enzymatic system. *Journal of Plant Protection Research*, 54, No 4, pp. 390-394. <https://doi.org/10.2478/jppr-2014-0058>
108. Morderer, Ye.Yu., Guralchuk, Zh.Z., Rodzevych, O.P. & Novak, L. (2020). The efficiency of adjuvant AGNS 1056-X joint application with herbicides aryloxyphenoxy propionic acid derivatives. *Fiziol. rast. genet.*, 52, No. 3, pp. 224-237. <https://doi.org/10.15407/frg2020.03.224>

109. Radchenko, M.P., Ponomareva, I.G., Pozynych, I.S. & Morderer, Ye.Yu. (2021). Stress and use of herbicides in field crops. *Agriculture Science and Practice*, 8, No. 3, pp. 50-70. <https://doi.org/10.15407/agrisp8.03.050>
110. Dayan, F.E. (2019). Current Status and Future Prospects in Herbicide Discovery. *Plants*, 8 (9), 341. <https://doi.org/10.3390/plants8090341>
111. Shaner, D.L. & Beckie, H.J. (2014). The future for weed control and technology. *Pest Management Science*, 70 (9), pp. 1329-1339. <https://doi.org/10.1002/ps.3706>
112. Westwood, J.H., Charudattan, R., Duke, S.O., Fennimore, S.A., Marrone, P., Slaughter, D.C., Swanton, C. & Zollinger, R. (2018). Weed Management in 2050: Perspectives on the Future of Weed Science. *Weed Sci.*, 66 (3), pp. 275-285. <https://doi.org/10.1017/wsc.2017.78>
113. Morin, L. (2020). Progress in Biological Control of Weeds with Plant Pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 58 (1). <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-010820-012823>
114. Jabran, K., Florentine, S. & Chauhan, B.S. (2020). Impacts of Climate Change on Weeds, Insect Pests, Plant Diseases and Crop Yields: Synthesis. *Crop Protection Under Changing Climate*, pp. 189-195. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46111-9_8
115. Ziska, L.H. (2020). Climate Change and the Herbicide Paradigm: Visiting the Future. *Agronomy*, 10 (12), 1953. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121953>

Received 12.09.2022

IMPACT OF CLIMATE CHANGES ON WEED VEGETATION AND HERBICIDES EFFICIENCY

Zh.Z. Guralchuk

Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine
31/17 Vasylykivska St., 03022, Kyiv, Ukraine
e-mail: azhanna@ukr.net

Global climate changes, which have been observed recently, present agricultural producers with the task of providing sustainable food for the growing population of the globe, and researchers with the task of studying changes in the species composition of segetal vegetation, researching the impact of climate change on cultivated and weed plants and their interaction. The article examines the impact of the predicted increased level of CO₂ in the atmosphere, temperature, drought conditions on C₃ and C₄ weed plants, their interaction with cultivated plants, evaluates the competitiveness of weeds, their ability to survive under adverse conditions due to physiological plasticity and genetic variability, the potential danger of the spread of invasive weed species is indicated. Data available in the literature on the impact of climate change on the effectiveness of herbicides are considered. It is concluded that the issue of the effect of increased temperatures, CO₂ content, drought and other climate changes on the effectiveness of herbicides, productivity of agricultural crops, growth, development, characteristics of the spread and evolution of weeds, their interaction with cultivated plants are important and still insufficiently studied. Researching these issues will help to make adjustments to crop protection technologies to minimize the impact of weeds on cultivated plants.

Key words: climate change, CO₂, temperature, drought, weeds, herbicides, efficiency.