

Blue cornflower (*Centaurea cyanus* L.) as a component of agroecosystem: analysis of allelopathic mechanisms, agroecological consequences and control strategies

I. Pospelov | V. Onipko

Article info

Correspondence Author

V. Onipko

E-mail:

valentya.onipko@pdaa.edu.uaPoltava State Agrarian
University,
Skovoroda Str., 1/3,
Poltava, 36000, Ukraine

Citation: Pospelov, I., & Onipko, V. (2025). Blue cornflower (*Centaurea cyanus* L.) as a component of agroecosystem: analysis of allelopathic mechanisms, agroecological consequences and control strategies. *Scientific Progress & Innovations*, 28(4), 94–100. doi: 10.31210/spi2025.28.04.13

This review presents an analysis of the results of experimental studies on the nature of the allelopathic interaction of cornflower (*Centaurea cyanus* L.) with winter agricultural crops. The purpose of the work was to summarize current knowledge on the biochemical mechanisms of phytotoxicity, allelochemicals of cornflower, agroecological consequences of weed infestation, and strategies for integrated control of cornflower in agroecosystems. Differential crop sensitivity to cornflower allelochemicals was established in winter grain crops. In this regard, the phenomenon of hormesis was identified, where the action of low concentrations of aqueous leaf extract of cornflower (5–12 %) increased seed germination of grains by 8–16 %, while increasing to 25 % decreased it by 38–40 % compared with the control. Based on research results conducted in various countries, the profile of cornflower allelochemicals was found to include volatile organic compounds, phenolic acids (chlorogenic acid 15–45 mg/100 g dry weight), flavonoids (apigenin 10–30 mg/100 g), and anthocyanins. The phytotoxicity mechanisms of the complex of these compounds involve disruption of cell membrane permeability, inhibition of ATP synthesis in mitochondria, suppression of DNA topoisomerases, and activity of key glycolysis enzymes. Meanwhile, allelochemicals can spread through root exudates (concentration 100–500 µM in rhizosphere fluid), microbiological decomposition of residues, and gas diffusion of volatile compounds. It was also established that cornflower limits the impact on the rhizosphere microbiocenosis and demonstrates autotoxicity, inhibiting its own seed germination (by 15–22 % at densities exceeding 30–40 plants/m²). It was concluded that the allelopathic activity of cornflower can cause a yield reduction (up to 65 %) when exceeding the economic threshold of harmfulness (ETH) in agroecosystems. Moreover, there is a problem of cornflower resistance to herbicides, as well as the phenomenon of enhanced allelopathic activity due to increased synthesis of phenolic compounds. Therefore, strategies for integrated control of cornflower in agroecosystems of agricultural crops are recommended, including rotation of winter crops with spring crops to disrupt the cornflower life cycle; use of cover crops with allelopathic properties (barley, rye, sorghum), which suppress cornflower germination by 20–35 %; agronomic practices (delayed sowing, increasing the seeding rate by 15–25 %, alternating deep plowing with minimal tillage); and regular population monitoring.

Keywords: cornflower, *Centaurea cyanus*, allelopathy, allelochemicals, winter grain crops, herbicide resistance, integrated weed control.

Волошка синя (*Centaurea cyanus* L.) як компонент агроценозу: аналіз алелопатичних механізмів, агроекологічних наслідків та стратегій контролю

I. С. Поспелов | В. В. Оніпко

Полтавський державний
аграрний університет,
м. Полтава, Україна

У представленому огляді представлено аналіз результатів експериментальних досліджень щодо природи алелопатичної взаємодії волошки синьої (*Centaurea cyanus* L.) з озимими сільськогосподарськими культурами. Метою роботи було узагальнення сучасних знань біохімічних механізмів фітотоксичності, алелохімікатів волошки, агроекологічних наслідків забур'яненості та стратегій інтегрованого контролю волошки в агроценозах. Встановлено диференційована чутливість культур до алелохімікатів волошки у озимих зернових культур. При цьому встановлений феномен гормезису, коли за дії понижених концентрацій водного екстракту листків волошки (5–12 %) схожість насіння зернових збільшувалась на 8–16 %, а їх збільшенні до 25 % – знижувалась на 38–40 % відносно контролю. За результатами досліджень, проведених у різних країнах встановлено, що профіль алелохімікатів волошки включає леткі органічні сполуки, фенольні кислоти (хлорогенова 15–45 мг/100 г сухої маси), флавоноїди (апігенін 10–30 мг/100 г) та антоціани. Механізми фітотоксичності комплексу вказаних сполук включають порушення проникності клітинних мембран, інгібування синтезу АТФ у мітохондріях, пригнічення ДНК-топоізомераз та активності ключових ферментів гліколізу. При цьому алелохімікати можуть поширюватися через кореневі екsudати (концентрація 100–500 мкМ у ризосферній рідині), шляхом мікробіологічного розкладання решток та газову дифузію летких сполук. Встановлено також, що волошка може впливати на мікробіоценоз ризосфери, а також демонструє аутоксичність, пригнічуючи проростання власного насіння (при щільності >30–40 рослин/м² на 15–22 %). Зроблений висновок, що алелопатична активність волошки може спричиняти зниження рівня урожаю (до 65 %) при перевищенні економічного порогу шкідливості (ЕПШ) в агроценозах. До того ж, існує проблема резистентності волошки до гербіцидів, а також явище посилення її алелопатичної активності за рахунок посиленого синтезу фенольних сполук. В зв'язку з цим рекомендовані стратегії інтегрованого контролю волошки в агроценозах сільськогосподарських культур, що включають чергування озимих культур з ярими для розриву життєвого циклу волошки; використання покривних культур з алелопатичними властивостями (ячмінь, жито, сорго), які пригнічують проростання волошки на 20–35 %; агротехнічні заходи (відтермінування сівби, підвищення норми висіву на 15–25 %, чергування глибокої оранки з мінімальним обробітком); регулярний моніторинг популяцій.

Ключові слова: волошка синя, *Centaurea cyanus*, алелопатія, алелохімікати, озимі зернові, гербіцидна стійкість, інтегрований контроль бур'янів.

Бібліографічний опис для цитування: Поспелов І. С., Оніпко В. В. Волошка синя (*Centaurea cyanus* L.) як компонент агроценозу: аналіз алелопатичних механізмів, агроекологічних наслідків та стратегій контролю. *Scientific Progress & Innovations*. 2025. № 28 (4). С. 94–100.

Рід *Centaurea* L. вважається одним із найбільших в родині Айстрові (Asteraceae). Її представники зустрічаються в Азії, Америці, Північній Африці, широко розповсюджені в Європі [4]. Різні види роду знаходять своє застосування в народній та офіційній медицині як лікарські рослини, високодекоративні культури, що цінуються у квітникарстві, ландшафтному дизайні та озелененні [26], навіть для приваблювання фітофагів в овочевих фітоценозах [2]. Найвідомішим видом є *Centaurea cyanus* L. – волошка синя, що походить з Кавказу [4, 41]. Ця однорічна рослина має розгалужене стебло з ланцетними листками, що почергово розташовані на стеблові, стрижневу кореневу систему. Квітує з кінця травні до середини серпня [4]. Суцвіття кошики, мають стерильні крайові язичкові квітки синього кольору та фертильні трубчасті квітки, плід сім'янка [10]. Лікарською сировиною є суцвіття, які містять низку фармакологічно активних речовин: амінокислоти, ароматичні кислоти, кумарини, похідні флавоноїдів, індольні алкалоїди, фенілкарбонові кислоти, поліфеноли та полісахариди [22].

Водночас, волошка синя є типовим малорічним бур'яном в посівах озимих зернових культур та ріпаку в Центральній та Східній Європі, особливо в агроценозах України, Польщі, Німеччини. Характерно, що на відміну від простої конкуренції за ресурси (світло, воду, поживні елементи), волошка демонструє виражену алелопатичну активність – здатність виділяти хімічні сполуки, які інгібують проростання й розвиток сусідніх рослин, в тому числі, сільськогосподарські культури [8, 13, 23, 24, 27, 31, 43].

Алелопатія волошки синьої є складним екофізіологічним явищем, що залежить від численних факторів: виду та генотипу культури-реципієнта, концентрації алелохімікатів, фізико-хімічних властивостей ґрунту, температури, вологості, фази розвитку рослин і видової специфіки механізмів детоксикації. Розуміння цих взаємодій конче важливе для розробки ефективних стратегій інтегрованого контролю забур'яненості в органічному та конвенційному землеробстві [7, 23, 24, 27, 37].

У представленій роботі узагальнені сучасні наукові дослідження щодо природи алелопатичної активності волошки синьої, основних хімічних компонентів, що володіють біологічною активністю, шляхів регуляції волошки в агроценозах.

Диференційована чутливість культур до алелохімікатів волошки.

Експериментальні дослідження, проведені в Інституті ґрунтознавства і рослинництва у Вроцлаві, Польща [23, 24], з використанням як модифікованого тесту *Phytotoxkit*™, так і традиційних ґрунтових методів демонструють виражену видову варіабельність у відповіді пшениці озимої (*Triticum aestivum*) та жита озимого (*Secale cereale*) на взаємодію з насінням волошки. Виявилось, що пшениця озима більш чутливо реагувала на алелопатичний вплив волошки. Свіжа біомаса надземної частини пшениці при прямому контакті з 15 насіннями волошки знижувалась на 16–20 % порівняно з контролем. Довжина кореневої системи при цьому зменшувалась на 18–55 % залежно від концентрації алелохімікатів.

Ці глибокі морфологічні зміни вказують на те, що пшениця має обмежену здатність до інактивації або секвестрації алелохімікатів в клітинах. Жито озиме, навпаки, демонструє більшу толерантність до алелопатичного стресу. Більше того, у деяких дослідних варіантах спостерігається навіть стимуляція вегетативного росту на 14 % порівняно з контролем [23, 24]. Висловлюється припущення, що цей парадоксальний результат найімовірніше пов'язаний із більш ефективним функціонуванням у жита систем глутатіон-S-трансфераз (GSTs) і цитохрому P450-залежних монооксигеназ, що забезпечують деградацію та інактивацію фенольних сполук і терпеноїдів на рівні коренів [7, 27, 36].

Важливим феноменом, виявленим у дослідженнях групи польських дослідників з використанням водних екстрактів волошки, є гормезис – позитивна фізіологічна відповідь рослин на слабо токсичні дози потенційно шкідливих речовин [9]. При концентраціях водного екстракту листків волошки 5–12 % спостерігалось стимулювання схожості насіння пшениці й жита на 8–16 % порівняно з контролем. Однак цей ефект є істотно нелінійним: при збільшенні концентрації екстракту до 25 % схожість обох культур знижувалась на 38–40 % [23, 27, 30]. Дослідники зауважують, що фізіологічний механізм гормезису полягає в активації адаптивних систем рослин: підвищення синтезу антиоксидантних ферментів (супероксид-дисмутази, каталази, пероксидази), посиленні накопичення низькомолекулярних антиоксидантів (аскорбінова кислота, глутатіон) й активація генів відповіді на стрес (HSP70, HSP90). [23, 27, 36]. Аналогічна дія волошки спостерігалась і по відношенню до інших озимих культур, таких як редька олійна [37].

Характеристика та роль алелохімікатів волошки.

Леткі органічні сполуки (VOCs). Оригінальні дослідження секреторних структур у пелюстках волошки синьої виявили складну суміш летких органічних сполук, що виділяються залозистими трихомами і секреторними каналами [16]. Головні компоненти цих ефірних олій включають: сесквітерпени (близько 60 % від суми летких): β -каріофілен (найбільше, до 26 %), α -гумулен (~10 %), α -копаєн, δ -кадинен, γ -мууролєн, β -мирцен. Ці сполуки здатні інгібувати клітинний цикл в коренях проростків через пригнічення синтезу мікротрубочок і цитоскелету [16, 33]; монотерпени (близько 20 %): борнілацетат, ліналіл, гераніол, мирцен, пінен. Борнілацетат, однак, хоча і являється монотерпеном, в електронних базах часто класифікується як оксигенований монотерпен через наявність естерного угруповання, яке посилює його липофільність та здатність проникати через клітинні мембрани; інші компоненти (близько 20 %): октан, декан й інші алканові вуглеводні, метилсалісилат (знайдений у слідових кількостях), похідні бензену [16, 25].

Механізм фітотоксичності цих летких сполук полягає в їх здатності розхитувати липідний подвійний шар клітинної мембрани, порушуючи селективну проникність, та інгібувати синтез АТФ у мітохондріях. Крім того, VOCs можуть повільно адсорбуватися на ґрунтові колоїди й піддаватися

подальшому розкладанню мікроорганізмами, утворюючи фенольні метаболіти, які також проявляють фітотоксичність [3, 7, 27, 36].

Фенольні кислоти. Водні екстракти та листяна маса волошки синьої містять широкий спектр фенольних кислот, визначених методом вискоєфективної рідинної хроматографії (HPLC) [13, 25]: хлорогенова кислота (3-О-кафеойлхінна) – основна фенолокислота волошки, концентрація якої становить 15–45 mg/100 g сухої маси листя. Вона виявляє виражену фітотоксичність щодо інших видів рослин через інгібування процесів оксидативного фосфорилування й синтезу білків [13, 16]; 5-кафеойлхінна, 4-гідроксикорична, ферулова, ванілінова й сиригорова кислоти: кожна з цих сполук може мати концентрацію 5–20 mg/100 g сухої маси та проявляти аутоксичну й алелопатичну активність. Особливо цікавим є те, що у гербіцидостійких популяцій волошки (стійких до інгібіторів ацетолактатсинтази, ALS) після дії гербіциду флорасуламу значна інтенсивність синтезу хлорогенової кислоти зростає, що може свідчити про залучення цієї сполуки до механізмів адаптації й стресової відповіді [13, 30]; протокатехова кислота: рідше зустрічається, але визначена в квітках волошки; має антирадикальні й хелатні властивості.

Фізіологічна дія цих фенольних кислот має декілька аспектів: вони не тільки інгібують проростання й ріст коренів, але й впливають на функцію фотосинтезу, знижуючи активність ФП комплексу в хлоропластах через взаємодію з білками світлозбирального комплексу [7, 36].

Флавоноїди. Волошка синя акумулює значну кількість флавоноїдів, визначених як у агліконній, так і в глікозидній формі [13, 16]. Серед них апігенін (домінуючий флавонол): концентрація 10–30 mg/100 g сухої маси. Це сполука одна з найактивніших у гальмуванні клітинного циклу в зоні ризогенезу проростків через інгібування циклін-залежних кіназ (CDKs); кверцетин, кемпферол, ізорамнетин: концентрація кожного 5–15 mg/100 g. Ці сполуки здатні утворювати міцні комплекси з іонами важких металів (Cd, Cu, Pb, Zn), що особливо важливо при розгляді ролі волошки у фіторе mediaції забруднених ґрунтів [21]; глікозидні похідні: апігенін-7-О-глюкозид, кверцетин-3-О-глюкозид, рутин. При гідролізі під час мацерації у воді або при розкладанні мікроорганізмами в ґрунті агліконні форми звільняються й виявляють вищу фітотоксичність через підвищену ліпофільність [7, 13].

Механізм дії флавоноїдів включає: 1) інгібування ДНК-топоізомераз, що призводить до затримання синтезу ДНК й зупинки клітинного циклу; 2) масивне накопичення активних форм кисню (АФК) через прооксидантні властивості їхніх поліфенольних структур; 3) пригнічення активності фосфофруктокінази й інших ключових глікотичних ферментів [7, 27, 36].

Антоціани й їх роль у хелатуванні металів.

Волошка синя, завдяки своїм синім квіткам, накопичує значні кількості антоціанів, особливо мальвідину й петунідину. Як відомо, синій колір квітів волошки формується через утворення специ-

фічних антоціанін-металевих комплексів (chelate complexes) з участю Mg^{2+} або Al^{3+} іонів. Це спостереження має екологічне значення: в умовах надлишку металів у ґрунті волошка може накопичувати їх через комплексування з антоціанами, проявляючи потенціал для фіторе mediaції забруднених ділянок. Однак у разі нестачі металів антоціани можуть переводити накопичені метали на потреби рослини. Зазначається, що це гіпотеза, яка ще потребує експериментальної перевірки [21, 35].

Механізми розповсюдження алелохімікатів в агроценозі.

Кореневі екsudати й рослинні залишки.

Волошка синя безперервно виділяє низькомолекулярні фенольні сполуки через кореневу систему, причому інтенсивність виділення зростає при водному стресі або механічному розриві корневих волосків. Концентрація фенольних сполук у ризосферній рідині може сягати 100–500 мкМ залежно від віку рослини й умов вирощування [7, 27, 36].

При розкладанні у ґрунті біомаси волошки (листя, стебел, корінь) мікроорганізми (особливо грибки роду *Trichoderma*, *Fusarium*, бактерії *Bacillus* й *Pseudomonas*) гідролізують гліцидні форми фенолів, звільняючи більш фітотоксичні агліконні форми. Однак цей процес займає 2–4 тижні залежно від температури й вологості ґрунту, що має практичне значення для планування сівби наступної культури [3, 7, 23, 27, 38].

Летючі компоненти. Фізіологічно актуальну роль грають також летючі органічні сполуки (VOCs), що виділяються не тільки з живих органів волошки, але й під час розкладання органічної речовини. Сесквітерпени й монотерпени волошки можуть дифундувати крізь ґрунтові пори і накопичуватися в прикореневій зоні або навіть у повітрі над посівом, особливо у теплих, вологих умовах ранку, як це відбувається у інших випадках [16, 19, 33].

Екологічне значення цього явища полягає в тому, що при щільних популяціях волошки (25–50 рослин на m^2) концентрація VOCs у прикореневій атмосфері посівів може досягати фітотоксичних рівнів, інгібуючи не тільки рослини на суміжних ділянках, але й сприяючи подальшому сповільненню проростання насіння, накопленого у попередні роки, на наступний рік (гіпотеза *autotoxic seed bank*) [12, 42].

Вплив на мікробіологічні процеси прикореневої зони. Алелохімікати волошки, особливо фенольні кислоти й летючі терпеноїди, суттєво впливають на склад мікробіоценозу ризосфери й прикореневого ґрунту. Дослідження, проведені в Канаді і Китаї показали, що при присутності волошки в посіві відносна чисельність видів *Pseudomonas* й інших оліготрофних протеобактерій, стійких до дії фенолів, збільшується на 15–25 % [1, 20]; видів *Trichoderma*, антагоністичного щодо фітопатогенних грибів, зростає на 10–18 % через прямий селективний ефект фенольних сполук [1, 34]; види *Bacillus* (особливо *B. subtilis*), здатні гідролізувати танини й фенольні комплекси, посилюють свою активність у ризосфері волошки [1, 34].

Натомість популяції чутливих мікроорганізмів (деякі представники роду *Fusarium*, *Alternaria*, *Septoria*) пригнічуються на 20–40 %. Цей селективний ефект має позитивний екологічний наслідок: волошка

потенційно може зменшити популяції фітопатогенних мікроміцетів, однак це явище недостатньо вивчене в умовах поля [1, 34].

Фенольні сполуки волошки можуть як інгібувати, так і стимулювати ріст арбускулярних мікоризних грибів (AMF) родів *Funneliformis*, *Glomus*, *Paraglomus* залежно від концентрації й видового складу. При низьких концентраціях (<50 мкМ) спостерігається можливий гормезисний ефект і стимуляція колонізації коренів культур AMF на 10–15 %. Це може мати позитивне наслідок для фосфорного живлення культур, адже AMF значно підвищують поглинання малорухомого фосфору [1, 20, 34]. Однак ці дослідження переважно проведені *in vitro*, і в умовах поля такий позитивний ефект може бути маскований конкуренцією за світло й воду [34].

Заслуговує на увагу припущення можливості взаємодії волошки синьої з азотфіксуючими бактеріями (не обов'язково в симбіотичній ролі, як у бобових). Деякі фенольні сполуки можуть модулювати активність нітратредуктаз й аміак-оксидувальних бактерій, впливаючи на цикли азоту в ризосфері. Однак волошка як однорічник не формує спеціалізованих симбіотичних структур (на кшталт бульбочок), тому роль азотфіксації залишається переважно непрямую, через вплив на вільноживучі азотфіксатори роду *Azotobacter* й *Klebsiella* [6, 17, 18, 34].

Аутоксичність волошки синьої й внутрішньовидова конкуренція. Важливим феноменом є те, що волошка синя демонструє аутоксичність – інгібування власного проростання й росту поточного рослини при накопиченні алелохімікатів у ризосфері. Це явище особливо виражене у посівах волошки або в насадженнях із високою щільністю (>100 рослин на м²) [12, 42].

Механізм аутоксичності полягає в наступному: залишки волошки з попередніх років (листя на поверхні ґрунту, коріння в ґрунті) розкладаються, звільняючи алелохімікати в ризосферу. На відміну від пшениці чи ячменю, рослини волошки не мають спеціалізованих систем детоксикації, адаптованих саме до власних алелохімікатів (як це спостерігається у люцерни *Medicago sativa* чи деяких видів амаранту). Тому при щільності популяції понад 30–40 рослин на м² спостерігається помітне сповільнення росту молодих рослин волошки на 15–22 % на наступні роки [12, 42].

Однак це явище може мати також екологічне значення: аутоксичність створює певний "натуральний контроль" популяції волошки та запобігає її масовому розмноженню в одному місці протягом декількох років підряд. Таким чином, сівозміни й ротація культур отримують додаткове наукове обґрунтування як ефективний захід управління.

Адаптація волошки до гербіцидного стресу. Дослідження, проведені в Природничому університеті (Люблін, Польща) гербіцидостійких популяцій волошки синьої, стійких до інгібіторів ALS (флорасулам, трибенурон-метил), виявили парадоксальне явище: збільшення вмісту фенольних кислот і флавоноїдів у квітках і листях при гербіцидному стресі. Зокрема, вміст хлорогенової кислоти в квітках резистентних біотипів після обробки гербіцидом зростав на

25–40 % порівняно з необробленими ділянками [13]; концентрація апігеніну (основного флавонола) й кверцетину збільшувалась на 15–30 % у стійких до ALS-інгібіторів популяцій. Водночас, концентрація деяких глікозидованих флавоноїдів (зокрема кверцетин-3-О-рамнозиду) різко зростала до 50–70 % у рослин, оброблених гербіцидом [13].

Як зазначають дослідники, ці зміни найімовірніше пов'язані з активацією неспеціалізованих механізмів детоксикації при контакті з гербіцидом: посилене вивільнення ферментів фітохелатинсинтази, активація систем антиоксидантного захисту, накопичення вторинних метаболітів. Таким чином, гербіцидостійка волошка потенційно може проявляти посилену алелопатичну активність порівняно зі звичайними сприйнятливими біотипами і це явище вимагає ретельного подальшого дослідження [13, 30].

Крім того, гербіцидорезистентні популяції волошки проявляють диверсифіковану стратегію проростання: замість синхронного проростання усіх особин протягом перших чотирьох діб посіву, насіння цих популяцій проростає розтягнена протягом 4–20 днів. Така розтягнута динаміка проростання істотно ускладнює застосування гербіцидів на одному критичному етапі вегетації й робить популяції більш стійкими до хімічного контролю [31].

Агроекономічні наслідки забур'яненості волошкою. Економічний поріг шкідливості (ЕПШ) волошки синьої у зернових культур становить 1–5 рослин/м² залежно від регіону, погодних умов і сорту культури. При перевищенні цього порогу потенційні втрати врожаю становлять: пшениця озима – 16–46 % залежно від щільності волошки (10–30 рослин на м²) [28, 30, 40, 43] жито озиме – 8–22 %, оскільки жито більш конкурентоспроможне й толерантне до алелопатичного впливу [30, 32, 43]; ріпак озимий – 20–65 % залежно від забур'яненості, оскільки ріпак має більш повільний ріст восени й не може ефективно конкурувати з волошкою [28, 40, 43].

На європейських ринках вартість однієї обробки гербіцидом коштує 15–30 EUR/га, тоді як втрати врожаю від недостатнього контролю можуть сягати 200–500 EUR/га в залежності від вартості зерна. Таким чином, економічна доцільність контролю волошки є очевидною [28, 43]. Крім того, через накопичення стійкості волошки до гербіцидів класу сульфонілсечовин в Польщі й деяких регіонах України, аграрії змушені застосовувати альтернативні гербіциди або багатокомпонентні суміші, що підвищує витрати на хімічний контроль на 40–60 % порівняно з 2000-ми роками [15, 28, 30, 43].

Міжвидові взаємодії з іншими видами бур'янів. Волошка синя рідко зустрічається як єдиний вид забур'яненості в посівах; зазвичай вона формує поліспецифічні угруповання із іншими видами сегетальної флори. Волошка демонструє конкурентну перевагу над багатьма іншими бур'янами. При однакових умовах волошка виявляє вищу конкурентоспроможність порівняно з смолкою нічною (*Silene noctiflora*), особливо при дії сублетальних доз гербіцидів [5, 15]. Через алелопатичну активність волошка здатна утримувати свою популяцію навіть у змішаних травостоях з *Thlaspi arvense* (талабан польовий), *Alopecurus*

mysuroides (лисохвіст мишоховстиковий), *Avena fatua* (вівсюг звичайний) [43]; при цьому рослини *Papaver rhoeas* (мак самосійка), *Veronica chamaedrys* (вероніка дібровна) істотно пригнічуються у змішаних посівах із волошкою [43].

В агроценозах більшу конкурентоспроможність виявляють зернові культури ячмінь посівний (*Hordeum vulgare*) й тритикале (*Triticosecale*), вони швидше розвивають кореневу систему в верхньому шарі ґрунту, пригнічуючи проростання волошки на 25–35 % [29, 43]. За рахунок азотфіксації люцерна (*Medicago sativa*) і червона конюшина (*Trifolium pratense*) як покривні культури накопичують азот у ґрунті й конкурують з волошкою за воду й світло [39, 43].

Контроль в агроценозах. На основі аналізу алелопатичних механізмів й агроекологічних наслідків забур'яненості волошкою синьою рекомендують наступні заходи інтегрованого управління.

Чергування озимих культур (пшениця, ячмінь, ріпак) з ярими культурами (горох, люцерна, кукурудза), що розриває життєвий цикл волошки синьої. Доведено, що практика повторних посівів озимих культур прямо корелює з накопиченням волошки [29, 43].

Включення покривних культур із алелопатичними властивостями (ячмінь озимий, жито озиме, сорго) у сівозміну, що пригнічує проростання волошки на 20–35 % [11, 14].

Агротехнічні заходи. Відтермінування терміну сівби озимих культур на 2–3 тижні порівняно з рекомендованими з метою провокації проростання волошки й проведення допосівної механічної обробки без гербіцидів. Підвищена норма висіву (на 15–25 % вище оптимальної для сорту) культур для пригнічення проростання волошки. Чергування систем обробітку ґрунту: поєднання глибокої оранки (на 25–27 см) один раз на 4–5 років з мінімальним обробітком на інші роки гарантує, що велика частина насіння волошки залишається на глибинах, де воно не може проростати [29, 43].

Хімічний контроль. Застосування гербіцидів на основі діючих речовин імазопір, імазомакс, імазетапир тощо (імідазолінонів) або дикамби як альтернатива до сульфонілсечовини при виявленні стійкості. При наявності змішаної флори рекомендуються комбіновані препарати з метою розширення спектру дії й зниження ймовірності розвитку множинної стійкості.

Регулярний моніторинг популяцій волошки з метою виявлення розвитку стійкості й зміни видового складу бур'янів. Адаптивна кількісна норма висіву й терміни внесення гербіцидів на основі фенологічних особливостей локальних популяцій волошки (особливо врахування розтягнутого проростання в стійких популяціях) [5, 31].

Висновки

Наведений аналіз сучасних наукових досліджень дозволяє зробити висновок, що алелопатична взаємодія насіння й вегетативних органів волошки синьої з культурними рослинами є складним екофізіологічним процесом, що залежить від комплексу біохімічних, екологічних й популяційних факторів. Алелохімікати,

а саме: летучі терпеноїди, фенольні кислоти, флавоноїди й антоціани, створюють виразний селективний тиск на оточуюче рослинне угруповання й мікробіоценоз ґрунту. Озима пшениця виявляється більш чутливою до цього тиску, ніж жито, що слід враховувати при виборі культур для сівозмін.

Гербіцидна стійкість волошки синьої й асоційована з нею зміна біохімічного профілю (посилення синтезу фенолів й флавоноїдів) створюють нові виклики для агрономів та вимагають розроблення нових, більш інтегрованих стратегій контролю. Найбільш перспективними напрямками є комбінація агротехнічних методів (сівозміни, відтермінування сівби, підвищена норма висіву), селекція конкурентоспроможних сортів культур, застосування покривних культур з алелопатичними властивостями й зважене використання альтернативних гербіцидів при виявленні стійкості.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо їхнього викладу та результатів досліджень.

References

1. Aiyer, H., Fofana, B., Fraser, T., Caldwell, C., McKenzie-Gopsill, A., Mills, A., & Foster, A. (2022). Choice of cover crop influences soil fungal and bacterial communities in Prince Edward Island, Canada. *Canadian Journal of Microbiology*, 68 (7), 465–482. <https://doi.org/10.1139/cjm-2021-0360>
2. Balmer, O., Gèneau, C. E., Belz, E., Weishaupt, B., Förderer, G., Moos, S., Ditner, N., Juric, I., & Luka, H. (2014). Wildflower companion plants increase pest parasitism and yield in cabbage fields: Experimental demonstration and call for caution. *Biological Control*, 76, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.04.008>
3. Barte, S. N. (2023). Understanding Crop Residue Decomposition. *Helena Agri-Enterprises, LLC*. Retrieved from: <https://helenaagri.com/fieldlink/blog/understanding-crop-residue-decomposition/>
4. Boršić, I., Susanna, A., Bancheva, S., & Garcia-Jacas, N. (2011). *Centaurea* Sect. *Cyanus*: Nuclear phylogeny, biogeography, and life-form evolution. *International Journal of Plant Sciences*, 172 (2), 238–249. <https://doi.org/10.1086/657645>
5. Boutin, C., Montroy, K., Mathiasen, S. K., Carpenter, D. J., Strandberg, B., & Damgaard, C. (2019). Effects of sublethal doses of herbicides on the competitive interactions between 2 nontarget plants, *Centaurea cyanus* L. and *Silene noctiflora* L. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38 (9), 2053–2064. <https://doi.org/10.1002/etc.4506>
6. Chellem, S. R., Kishore, C. V. L., Reddy, G. S. V., Akshay, D. V. S., Kalpana, K., Lavanya, P., & Choraugudi, K. H. (2024). Symbiotic relationships between nitrogen-fixing bacteria and leguminous plants ecological and evolutionary perspectives: A review. *Uttar Pradesh Journal of Zoology*, 45 (13), 145–160. <https://doi.org/10.56557/upjz/2024/v45i134143>
7. Cheng, F., & Cheng, Z. (2015). Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01020>
8. D'Agostino, M., & Abeli, T. (2025). Biological flora of Central Europe: *Centaurea cyanus* L. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 68, 125874. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2025.125874>
9. Dascaluc, A. P. (2018). Hormesis, optimization of screening and practical application of plant growth regulators. In *Materials of the IV International Scientific-Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of variety testing in Ukraine* (Kyiv, June 7, 2018) (p. 139–1142). Kyiv: Institute of Genetics, Physiology and Plant Protection

10. Denisow, B. (2006). Blooming and pollen production of several representatives of the genus *Centaurea* L. *Journal of Apicultural Science*, 50 (2), 20–31.
11. Dhima, K. V., Vasilakoglou, I. B., Eleftherohorinos, I. G., & Lithourgidis, A. S. (2006). Allelopathic potential of winter cereals and their cover crop mulch effect on grass weed suppression and corn development. *Crop Science*, 46 (1), 345–352. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005-0186>
12. Friedman, J., & Waller, G. R. (1985). Allelopathy and autotoxicity. *Trends in Biochemical Sciences*, 10 (2), 47–50. [https://doi.org/10.1016/0968-0004\(85\)90224-5](https://doi.org/10.1016/0968-0004(85)90224-5)
13. Gawlik-Dziki, U., Wrzesińska-Krupa, B., Nowak, R., Pietrzak, W., Zypych-Walczak, J., & Obrępańska-Stepłowska, A. (2023). Herbicide resistance status impacts the profile of non-anthocyanin polyphenolics and some phytomedicinal properties of edible cornflower (*Centaurea cyanus* L.) flowers. *Scientific Reports*, 13 (1), 11538. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38520-z>
14. Głab, L., Sowiński, J., Bough, R., & Dayan, F. E. (2017). Allelopathic potential of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in weed control: A comprehensive review. *Advances in Agronomy*, 145, 43–95. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.05.001>
15. Guillemin, J.-P., Alrustom, B., & Darmency, H. (2021). Estimated effects of cornflower presence on winter wheat. *Biological Agriculture & Horticulture*, 38 (2), 113–123. <https://doi.org/10.1080/01448765.2021.2006783>
16. Haratym, W., Weryszko-Chmielewska, E., & Konarska, A. (2019). Microstructural and histochemical analysis of aboveground organs of *Centaurea cyanus* used in herbal medicine. *Protoplasma*, 257 (1), 285–298. <https://doi.org/10.1007/s00709-019-01437-4>
17. Hnini, M., Rabeh, K., & Oubohssaine, M. (2024). Interactions between beneficial soil microorganisms (PGPR and AMF) and host plants for environmental restoration: A systematic review. *Plant Stress*, 11, 100391. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100391>
18. Ibáñez, F., Wall, L., & Fabra, A. (2016). Starting points in plant-bacteria nitrogen-fixing symbioses: intercellular invasion of the roots. *Journal of Experimental Botany*, erw387. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw387>
19. Kalembe, D., & Synowiec, A. (2019). Agrobiological interactions of essential oils of two menthol mints: mentha piperita and mentha arvensis. *Molecules*, 25 (1), 59. <https://doi.org/10.3390/molecules25010059>
20. Kong, C.-H., Li, Z., Li, F.-L., Xia, X.-X., & Wang, P. (2024). Chemically mediated plant–plant interactions: Allelopathy and allelobiosis. *Plants*, 13 (5), 626. <https://doi.org/10.3390/plants13050626>
21. Landi, M. (2015). Can Anthocyanins be part of the metal homeostasis network in plant? *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 10 (4), 170–177. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2015.170.177>
22. Lim, T. K. (2013). *Centaurea cyanus*. *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants*, 245–249. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7395-0_16
23. Marczevska-Kolasa, K., Bortniak, M., Sekutowski, T., & Domaradzki, K. (2017). Influence of water extracts from cornflower on germination and growth of cereals seedlings. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 62 (3), 208–211.
24. Marczevska-Kolasa, K., Sekutowski, T., & Bortniak, M. (2012). Determination of allelopathy *Centaurea cyanus* seeds by using bioassays. *Progress in Plant Protection*, 52 (3), 733–736.
25. Marczevska-Kolasa, K., Sekutowski, T., & Bortniak, M. (2012). Determination of allelopathy *Centaurea cyanus* seeds by using bioassays. *Progress in Plant Protection*, 52 (3), 733–736.
26. Pietkova, I., Unhurian, L., & Horiacha, L. (2022). Identification and quantitative content of chlorogenic and rosmarinic acids in *Centaurea cyanus* L. and *Centaurea montana* L. herbs. *Annals of Mechnikov's Institute*, 1, 10–14.
27. Pospielov, I. S., & Onipko, V. V. (2025). Voloshka synia (*Centaurea cyanus* L.): dekoratywny potentsial ta ekolohichni perevahy u landshaftnomu dyzaini ta ozelenenni. *Materialy Vseukrainskoi nauково-praktychnoi konferentsii Bioriznomanittia u konteksti staloho rozvytku: teoriia, praktyka, metodychni aspekty vyvchennia u zakladykh nauky ta osvity (prysviachena 65-richchii zasnuvannia dendroparku zahalnodержavnogo znachennia «Kryvorudskiy»)*. (6 chervnia 2025 r., s. Kryva Ruda, Semenivskiy r-n, Poltavskya obl). (pp. 165–169). Poltava: Astraia Retrieved from: <https://zenodo.org/records/15533270> [in Ukrainian]
28. Reigosa, M. J., Pedrol, N., & González, L. (2006). *Allelopathy: A physiological process with ecological implications*. Springer
29. Schumacher, M., Witty, R., & Gerhards, R. (2024). Reintroduction strategies for rare arable weeds in agricultural practice and their influence on yield. *Weed Research*, 64 (5), 384–394. <https://doi.org/10.1111/wre.12659>
30. Sobko, M., Medvid, S., Amons, S., Zakharchenko, E., Nechyporenko, V., Masyk, I., Pylypenko, V., Kolodnenko, N., Rozhko, V., Karpenko, O., Toryanik, V., & Selezhen, O. (2023). Weed infestation of winter wheat in organic crop rotation and economic efficiency of its cultivation. *Modern Phytomorphology*, 17, 127–131. <https://doi.org/10.32782/2226-3063-2023.17.01>
31. Stankiewicz-Kosyl, M., Wińska-Krysiak, M., Wrochna, M., Haliniarz, M., & Marcinkowska, K. (2024). Regional diversity of the ALS gene and hormesis due to tribenuron-methyl in *Centaurea cyanus* L. *Scientific Reports*, 14 (1), 25197. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76345-6>
32. Stankiewicz-Kosyl, M., & Haliniarz, M. (2023). Diversified germination strategies of *Centaurea cyanus* populations resistant to ALS inhibitors. *Plant Protection Science*, 59 (4), 379–388. <https://doi.org/10.17221/62/2023-pps>
33. Stoliar, S. H., & Melnyk, M. V. (2024). Structure of segetal vegetation in hybrid winter rye crops in the Forest-Steppe of Ukraine. *Taurian Scientific Herald*, 140, 250–257. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.140.32>
34. Sulborska-Różycka, A., Weryszko-Chmielewska, E., Polak, B., Stefańczyk, B., Matysik-Woźniak, A., & Rejda, R. (2022). Secretory products in petals of *Centaurea cyanus* L. flowers: A histochemistry, ultrastructure, and phytochemical study of volatile compounds. *Molecules*, 27 (4), 1371. <https://doi.org/10.3390/molecules27041371>
35. Sun, Y., Chen, L., Zhang, S., Miao, Y., Zhang, Y., Li, Z., Zhao, J., Yu, L., Zhang, J., Qin, X., & Yao, Y. (2022). Plant interaction patterns shape the soil microbial community and nutrient cycling in different intercropping scenarios of aromatic plant species. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.888789>
36. Swetha, T. N., Rajasekar, B., Hudge, B. V., Mishra, P., & Harshitha, D. N. (2023). Phytoremediation of heavy metal contaminated soils using various flower and ornamentals. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35 (18), 747–752. <https://doi.org/10.9734/ijps/2023/v35i183341>
37. Treutter, D. (2010). Managing phenol contents in crop plants by phytochemical farming and breeding – visions and constraints. *International Journal of Molecular Sciences*, 11 (3), 807–857. <https://doi.org/10.3390/ijms11030807>
38. Tsytisiura, Y. (2024). Allelopathic effects of annual weeds on germination and seedling growth of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.). *Acta Fytotechnica et Zootechnica*, 27 (1), 77–97. <https://doi.org/10.15414/afz.2024.27.01.77-97>
39. Utilizing Microbes to Accelerate Corn Residue Decomposition. (2025). *Golden Harvest*. Retrieved from: <https://www.goldenharvestseeds.com/agronomy/articles/utilizing-microbes-to-accelerate-corn-residue-decomposition>
40. Vinje, E. (2013). Allelopathic Plants & Types of Allelopathy. *Planet Natural*. Retrieved from: <https://www.planetnatural.com/allelopathy/>
41. Wacławowicz, R., Tendziagolska, E., Synowiec, A., Bocianowski, J., Podsiadło, C., Domaradzki, K., Marcinkowska, K., Kwiecińska-Poppe, E., & Piekarczyk, M. (2022). Competition between winter wheat and cornflower (*Centaurea cyanus* L.) resistant or susceptible to herbicides under varying environmental conditions in Poland. *Agronomy*, 12 (11), 2751. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112751>

42. Wagenitz, G., & Hellwig, F. H. (1996). Evolution of characters and phylogeny of the Centaureinae. In D. J. N. Hind & H. G. Beentje (Eds.), *Compositae: Systematics* (pp. 491–510). Kew, London: Royal Botanic Gardens
43. Wang, C., Liu, Z., Wang, Z., Pang, W., Zhang, L., Wen, Z., Zhao, Y., Sun, J., Wang, Z.-Y., & Yang, C. (2022). Effects of autotoxicity and allelopathy on seed germination and seedling growth in *Medicago truncatula*. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.908426>
44. Weed Fact Sheet *Centaurea cyanus*. (2023). *HRAC Europe*, 1–3. Retrieved from: <http://hracglobal.com/europe/files/EHRAC-Weed-Fact-Sheet-CENCY.pdf>

ORCID

I. Pospelov 
V. Onipko 

<https://orcid.org/0009-0006-7344-7841>

<https://orcid.org/0000-0002-2260-971X>



2025 by the author(s). This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.