

UDC: 551.586:634.1/.7:551.524.37(477.87)

АГРОКЛІМАТИЧНА ОЦІНКА РИЗИКУ ВЕСНЯНИХ ЗАМОРОЗКІВ ДЛЯ ПЛОДОВИХ КУЛЬТУР НА ЗАКАРПАТТІ В УМОВАХ СУЧАСНОЇ ЗМІНИ КЛІМАТУ

О.В. Куклишин, О.В. Вольвач

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
вул. Змієнка Всеволода, 2, 65082, Одеса, Україна, kuklishyn.oksana@stud.onu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0005-9793-8285>, <https://orcid.org/0000-0002-6650-758X>

Це дослідження присвячене актуальній проблемі адаптації промислового садівництва до умов трансформації кліматичного режиму в Закарпатській області. Робота фокусується на аналізі ризиків, що виникають через весняні заморозки інтенсивністю до -2°C , які є критичними для плодівих дерев у фазі цвітіння. Дослідження охоплює довготривалий період спостережень з 2001 по 2025 роки, що дозволило виявити стійкі тенденції у зміні термічного режиму регіону.

Встановлено, що глобальне потепління спричиняє парадоксальну ситуацію для садівництва Закарпаття. З одного боку, спостерігається зростання суми активних температур, а з іншого - стабільно висока повторюваність пізніх весняних заморозків. Дослідження показало, що терміни настання фази цвітіння у зерняткових та кісточкових культур зміщуються на більш ранні дати. Водночас дати останніх весняних заморозків не демонструють пропорційного зміщення в бік початку весни. Це призводить до критичного скорочення фенологічного інтервалу безпеки, під яким ми розуміємо часовий проміжок між останнім критичним зниженням температури та початком масового цвітіння.

Виявлено значну просторову диференціацію агрокліматичних ризиків залежно від висоти над рівнем моря та особливостей рельєфу. Найбільш загрозлива ситуація характерна для гірських районів, зокрема за даними метеорологічної станції Нижні Ворота, де амплітуда коливань інтервалу безпеки є максимальною. Дослідження дозволило нам оцінити вплив потепління на окремі види культур. Ми встановили, що абрикос є найбільш вразливою культурою, оскільки фаза його цвітіння у більшості досліджених років повністю збігається з періодом ймовірних заморозків. Порівняльний аналіз показав, що найбільш адаптованою до сучасних умов є яблуня, яка завдяки пізнішим термінам вегетації зберігає стабільніший інтервал безпеки. Натомість слива та черешня демонструють тенденцію до зближення дат цвітіння з датами останніх заморозків, що дедалі частіше призводить до потрапляння цих культур у «заморозкову пастку» та повної або часткової втрати врожаю.

Отримані результати дозволили охарактеризувати закономірності деградації часового ресурсу безпечного розвитку садівництва. Доведено, що для мінімізації втрат врожаю необхідно переглянути стратегію розміщення садів та впроваджувати активні методи захисту, такі як системи штучного туманоутворення та вітрові машини. Результати роботи підтверджують гіпотезу про необхідність мікрокліматичного районування територій для ефективного ведення високоризикового агровиробництва.

Ключові слова: весняні заморозки, фенологія цвітіння, плодіві культури, Закарпаття, зміна клімату, агрокліматичні ризики, фенологічний інтервал безпеки, термічний режим

1 ВСТУП

Зміни клімату, що спостерігаються в останні десятиліття, мають неоднозначний та часто парадоксальний вплив на агрокліматичні умови Європейського континенту. Однією з найбільш гострих проблем для сучасного рослинництва є дестабілізація термічного режиму, яка проявляється через зростання амплітуди температурних коливань. Для садівництва це створює ситуацію «по-

двійного ризику»: тривалі зимові та ранньовесняні відлиги провокують передчасне відновлення вегетації плодівих культур, що робить їх критично вразливими до наступних поворотних холодів. Зміна глобального клімату суттєво трансформує ризики для помірних екосистем та агросфери. Одним із найбільш критичних факторів виступають пізні весняні заморозки, які часто називають «фальшивими веснами» (false springs). Як зазначають дослідники, ці явища накладають серйозні обмеження на ареали розповсюдження видів і за-

вдають значних екологічних та економічних збитків [1]. Перші дослідження заморозків і пошкоджень ними сільськогосподарських культур були проведені ще у середині XIX століття. У минулому столітті ґрунтовні дослідження стосовно походження та характеристик заморозків були проведені І.А. Гольцберг. Саме вона надала сучасне визначення заморозку, а також обґрунтувала наявність трьох типів заморозків, зокрема адвективно-радіаційних. Також дослідженням заморозків займалися в різний час С.О. Сапожнікова, Т.В. Покровська, З.А. Міщенко, Г.В. Ляшенко. Результати сучасних досліджень заморозків та їх шкідливого впливу на сільськогосподарське виробництво представлені у багаточисленних джерелах, як вітчизняних, так і зарубіжних авторів [2, 3, 4, 5].

У роботі [6] представлені результати досліджень стосовно визначення ризиків пошкоджень винограду від весняних заморозків для двох локацій швейцарської долини Рони (більш тепле місце Сьон у порівнянні з прохолоднішим місцем Егль), де виноградарство є важливою частиною сільського господарства. На основі створеної фенологічної моделі було запропоновано індекси ризику заморозку, що враховують середньодобові та мінімальні температури.

Порівняння цих індексів за базовий період (1961–1990) та за період реалізації сценаріїв змін клімату (2021–2050) показало, що найближчим часом ризики пізніх весняних заморозків можуть зростати або зменшуватися залежно від місцезнаходження та сценаріїв зміни клімату, але у цілому вони залишаються актуальними для розглянутого періоду часу та двох місць дослідження.

У роботі молдавських фахівців [6] відзначається, що на території Республіки Молдова весняні заморозки можуть спостерігатися навіть більше ніж через місяць після стабільної температури вище 10°C. Небезпечні заморозки, що з'являються на початку осені, настають до закінчення вегетаційного періоду з від'ємними температурами на тлі середньодобових температур вище 10°C.

Заморозки впливають не тільки на плодові культури. Дослідження [8] впливу весняних та осінніх заморозків на п'ять найважливіших з економічного точки зору європейських видів дерев (ялицю срібну, ялину звичайну, модрина європейську, бук європейський та дуб черешковий) показали, що листяні породи більш чутливі до пізніх заморозків, що значно зменшують приріст поточного року і ростові процеси повністю відновлюються лише через два роки. Автори вважа-

ють, що зростання найбільш розповсюджених європейських видів дерев у майбутньому все більше обмежуватиметься змінами клімату. Основна небезпека пізніх весняних заморозків полягає в тому, що потепління стимулює раніший початок вегетації, через що чутливі тканини рослин опиняються під ударом у періоди, коли ймовірність заморозків все ще залишається високою. Це створює гостру потребу в розробці надійних методів прогнозування ризиків у розрізі біології конкретних видів.

Водночас, сучасні підходи до оцінки цих ризиків стикаються з методологічними труднощами. Аналіз останніх досліджень показує наявність суттєвих розбіжностей між емпірично визначеними та отриманими за допомогою моделювання порогами пошкоджень [9]. Особливий науковий інтерес викликає регіональна специфічність цього явища. На фоні глобального потепління в низці європейських регіонів спостерігається позитивна динаміка. До прикладу, у Чехії (за даними досліджень 1961–2020 рр.) фіксується поступове зменшення частоти виникнення заморозків у вегетаційний період, що знижує кліматичний тиск на агросектор [10]. Натомість у Закарпатті спостерігається протилежна тенденція: попри загальне підвищення температур, інтенсивність та ймовірність заморозків зростає, а беззаморозковий період скорочується [11].

Така розбіжність трендів зумовлена складним фізико-географічним положенням регіону та особливостями синоптичних процесів. В умовах Закарпатської області, яка є зоною підвищеного ризику, попри високий тепловий потенціал, вивчення динаміки заморозків та їхнього впливу на плодові культури є критично важливим для мінімізації економічних збитків та адаптації садівництва до нових кліматичних реалій.

Для комплексної характеристики заморозків важливою є інформація про фазу розвитку культури під час заморозку, стійкість її до зниження температури у цю фазу, про інтенсивність самого заморозку. Найбільш суттєву шкоду плодовим завдають пізні весняні заморозки, особливо коли вони співпадають з розгортанням бруньок та цвітінням. Квіти починають пошкоджуватись при заморозках -2°C, -3°C. Зниження температури до -5°C, -8°C призводить до масових пошкоджень та до повної загибелі плодів [6].

Метою дослідження є комплексне оцінювання впливу весняних заморозків на фенологічний розвиток та стабільність плодоношення кісточкових і зерняткових культур у Закарпатській області в умовах сучасних кліматичних змін. Робота спрямована на виявлення закономірностей

деградації «фенологічного інтервалу безпеки» (часового розриву між останнім критичним заморозком і початком цвітіння) у різних агрокліматичних зонах регіону — від низини до гірських районів. На основі аналізу багаторічних даних (2001–2025 рр.) дослідження обґрунтовує рівень адаптованості різних видів плодів до дестабілізації термічного режиму та доводить необхідність впровадження систем активного протизаморозкового захисту в сучасному промисловому садівництві.

2 ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процеси вегетації та стабільність плодоношення зерняткових (яблуна, груша) і кісточкових (вишня, слива, черешня, абрикос) культур у різних агрокліматичних зонах Закарпатської області. Для аналізу використано масиви багаторічних метеорологічних та фенологічних спостережень за період 2001–2025 рр. Закарпатського обласного центру з гідрометеорології. Дані метеорологічних спостережень використано з 8 метеостанцій Закарпатської області (Берегове, Ужгород, Хуст, Великий Березний, Рахів, Закарпатська, Нижні Ворота, Нижній Студений. Базовими пунктами фенологічних спостережень обрано метеостанції Берегове (низинна зона), Хуст (передгір'я) та Нижні Ворота (гірська зона), що дозволило врахувати орографічну специфіку.

Для оцінки часової динаміки фенологічного інтервалу безпеки використовувалася різниця між фактичною датою останнього заморозку -2°C та фактичною датою досягнення масового цвітіння плодової культури.

Виявлення тенденцій у зміні часової динаміки фенологічного інтервалу безпеки здійснювалося за допомогою методу лінійної апроксимації (метод найменших квадратів).

У роботі застосовано комплексний підхід, що базується на аналізі:

- термічних ресурсів. Розрахунок сум ефективних температур (вище $+5^{\circ}\text{C}$) для визначення строків настання фаз цвітіння. Згідно з агрометеорологічними нормами, пороговими значеннями для початку масового цвітіння було прийнято: для абрикоса 88°C , для груші та сливи 125°C , вишні 150°C , яблуні 185°C [6];

- заморозконебезпечності. Оцінка інтенсивності (-2°C) та ймовірності останніх весняних заморозків;

- стійкості культур. Використання критичних температур пошкодження для фази цвітіння.

Побудова карт-схем територіального розподілу дат останніх заморозків інтенсивністю -2°C та карт-схем дат цвітіння плодів здійснювалася методом просторової інтерполяції методом кригінгу.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведений аналіз агрокліматичних показників за період 2001–2025 рр. свідчить про стійку тенденцію до інтенсифікації термічних ресурсів у ранньовесняний період. Результати узагальнення фенологічних спостережень за плодами культур на метеостанціях Закарпатської області за досліджуваний період наведено в табл. 1.

Аналіз даних свідчить про значну часову та просторову варіативність настання фази цвітіння, що зумовлено як біологічними особливостями культур, так і вертикальною зональністю регіону. Встановлено, що середні дати цвітіння в низинній зоні (Берегове, Хуст) припадають на другу та третю декади квітня. Зокрема, для сливи та черешні середні терміни настання фази коливаються в межах 19.04–24.04. Найпізніше серед досліджуваних культур зацвітає яблуна, для якої в низинній зоні середня дата становить 26.04, а в гірській (Нижні Ворота) - 14.05, що демонструє затримку вегетації на один місяць при збільшенні висоти місцевості.

Таблиця 1 - Настання фази цвітіння у плодів

Table 1 - Onset of the flowering stage in fruit crops

Метеостанція	Середня дата	Найраніша дата	Найпізніша дата
Яблуна			
Берегове	26.04	10.04.2024	11.05.2021
Нижні Ворота	14.05	20.04.2024	24.05.2021
Слива			
Берегове	19.04	04.04.2014	30.04.2006
Хуст	24.04	08.04.2024	04.05.2021
Черешня			
Хуст	21.04	04.04.2024	04.05.2021
Груша			
Берегове	26.04	06.04.2014	08.05.2003

2024 рік став аномальним для більшості культур. На метеостанції Берегове цвітіння яблуні розпочалося 10 квітня (на 16 днів раніше середніх дат за період дослідження), а на метеостанції Хуст черешня та слива зацвіли вже 4 та 8 квітня відповідно. Це підтверджує наявність тенденції до зсуву сезонного розвитку плодів культур у бік більш ранніх строків. Амплітуда між найранішими та найпізнішими датами цвітіння для більшості культур становить від 20 до 32 днів, що підтверджує високу пластичність плодів культур до термічних умов весняного періоду та водночас вказує на нестабільність сучасного кліматичного

режиму.

Останні весняні заморозки інтенсивністю -2°C в низинно-передгірних районах спостерігаються в середньому в першій декаді квітня (табл. 2). В північній частині передгір'я та в гірських районах наприкінці другої-третьої декаді квітня. Місцями в горах заморозки відповідної інтенсивності фіксуються і на початку травня. Найпізніші дати настання заморозку -2°C відмічались на початку травня, в горах – наприкінці травня.

Таблиця 2 - Дати останнього ранньовесняного заморозку інтенсивністю -2°C

Table 2 - Dates of the last early spring frosts with intensity of -2°C

Метеостанція	Середня дата	Найраніша дата	Найпізніша дата
Берегове	03.04	17.03.2017	06.05.2011
Ужгород	10.04	13.03.2014	10.05.2017
Хуст	03.04	11.03.2014	02.05.2007
Великий Березний	18.04	31.03.2008	13.05.2020
Рахів	17.04	30.03.2023	30.05.2014
Закарпатська	24.04	03.04.2018	16.05.2025
Нижні Ворота	29.04	29.03.2008	22.05.2020
Нижній Студений	04.05	12.04.2002	23.05.2020

Для візуалізації встановлених часових параметрів та виявлення територіальних закономірностей поширення заморозків було проведено просторовий аналіз. Результати картографічного моделювання (рис. 1) демонструють чітку залежність дат припинення заморозків від гіпсометричних умов регіону. Слід зазначити, що території з висотами понад 600 м над рівнем моря не включені в дослідження, оскільки вони знаходяться поза межами активного сільськогосподарського використання та промислового вирощування плодів культур. На картах ці зони виділені фоновим білим кольором як такі, що не мають агрокліматичного значення для цілей даного дослідження.

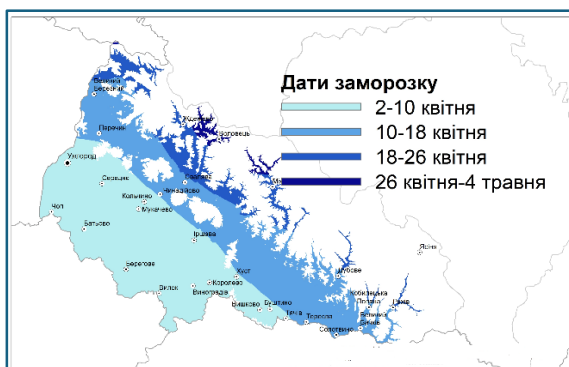


Рис. 1 - Дати останнього весняного заморозку -2°C
Fig. 1 - Dates of the last spring frost of -2°C

Загалом, порівнюючи середні дати цвітіння плодів культур в різних агрокліматичних зонах та середні дати останнього заморозку в повітрі інтенсивністю -2°C , можна зробити висновок що найбільш адаптованою для сучасних агрокліматичних умов регіону є яблуня, у якої масова фаза цвітіння в усіх зонах розпочинається на 24-26 днів пізніше після дати останнього критичного заморозку (рис. 2).

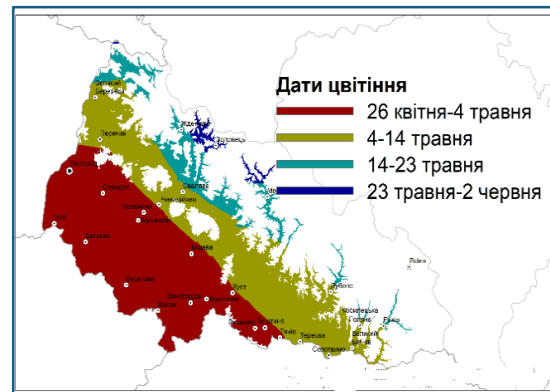


Рис. 2 - Дати цвітіння яблуні
Fig. 2 - Flowering dates of apple

Наступною плодовою культурою, більш адаптованою для регіону є вишня. Хоча її цвітіння відбувається трохи раніше за яблуню, вона більш стійка до весняних заморозків. Зацвітає вишня в середньому на 22 дні пізніше середнього останнього заморозку інтенсивністю -2°C (рис. 3).

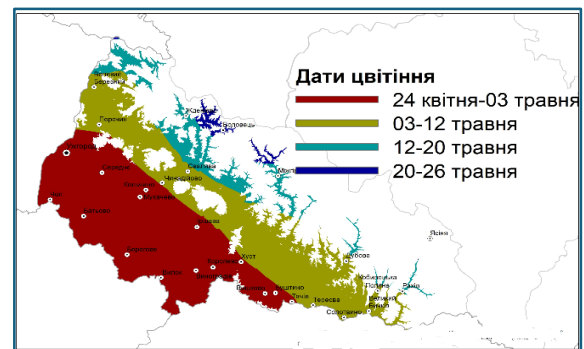


Рис. 3 - Дати цвітіння вишні
Fig. 3 - Flowering dates of sour cherry trees

Груша, слива та черешня демонструють задовільний рівень безпеки. Попри більш ранні терміни цвітіння порівняно з яблунею (рис. 4), часовий розрив між заморозками та цвітінням становить 17-20 днів, що є достатнім для мінімізації ризиків.

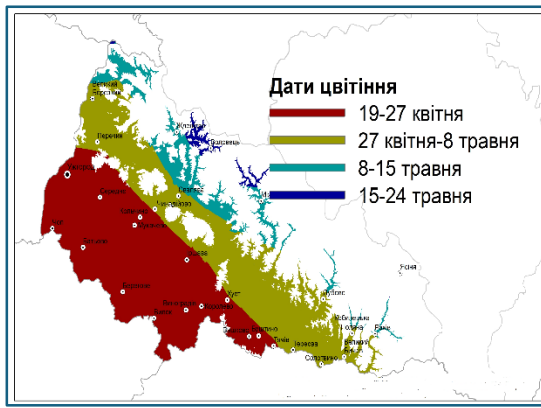


Рис. 4 - Дати цвітіння черешні, сливи, груші
Fig. 4 - Flowering dates of sweet cherry, plum, and pear trees

Вирощування у промислових масштабах абрикосу класифікується як високоризиковане. Майже у 100% випадків фаза цвітіння збігається з датами останніх заморозків інтенсивністю -2°C , що зумовлює нестабільність плодоношення (рис.5).

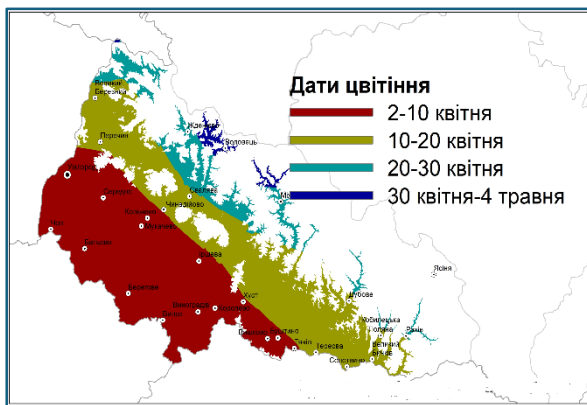


Рис. 5 - Дати цвітіння абрикосу
Fig. 5 - Flowering dates of apricot trees

Проте порівнюючи фактичні дані цвітіння плодів та дати останнього заморозку -2°C за останні 25 років спостерігається тенденція до зближення цих дат. Ранні культури (черешня, слива) дедалі частіше потрапляють у «заморозкову пастку» через раннє настання вегетаційних процесів. В цей же час лінія початку цвітіння яблуні утримує найбільшу та найстабільнішу часову дистанцію від лінії останнього весняного заморозку протягом усього досліджуваного періоду (рис. 6).

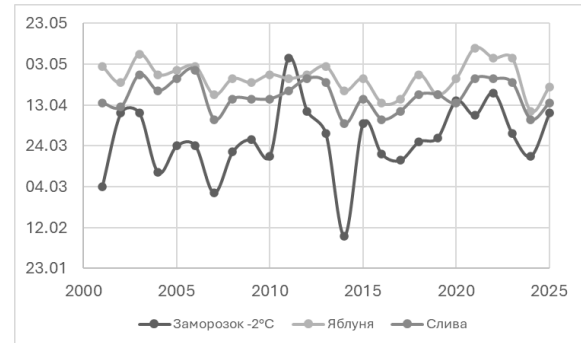


Рис. 6 - Динаміка цвітіння яблуні і сливи у порівнянні з датою останнього весняного заморозку -2°C по М Берегове
Fig. 6 - Dynamics of Apple and Plum Flowering in Relation to the Date of the Last Spring Frost (-2°C) in Berehove

Для більш точної оцінки тенденції підвищення такого небезпечного метеорологічного явища як заморозок, проведено розрахунок фенологічного інтервалу безпеки - кількості днів між останнім критичним заморозком -2°C та датою початку цвітіння яблуні і сливи. Згідно з результатами лінійної апроксимації (пунктир) (рис. 7), спостерігається стрімке зменшення днів фенологічного інтервалу безпеки для обох культур. Для яблуні середній інтервал безпеки на початку 2000-х становив близько 40 днів, тоді як до 2025 року він скоротився до 20 днів. Для сливи ситуація критичніша: інтервал скоротився з 30 днів до менш ніж 15 днів.

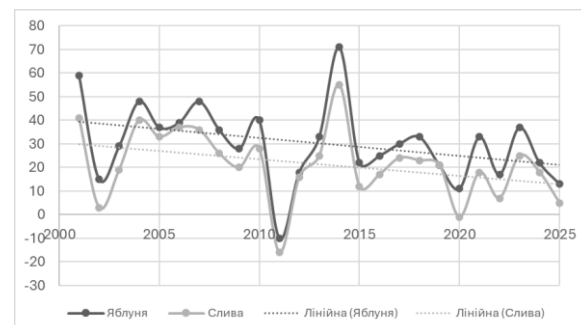


Рис. 7 - Фенологічний інтервал безпеки (дні) для яблуні і сливи по М Берегове
Fig. 7 - Phenological Safety Margin (days) for Apple and Plum in Berehove

В передгрітій кісточковій (слива, черешня) перебувають у зоні підвищеного ризику. За період спостережень з 2001 по 2025 рік зафіксовано численні випадки, коли дата останнього весняного заморозку -2°C збігається або перевищує дату цвітіння. Ймовірність таких випадків сягає біля 28%. Найбільш загрозлива ситуація спостерігалась у 2007 році, коли дата останнього заморозку змістилась на першу декаду квітня (рис. 8).

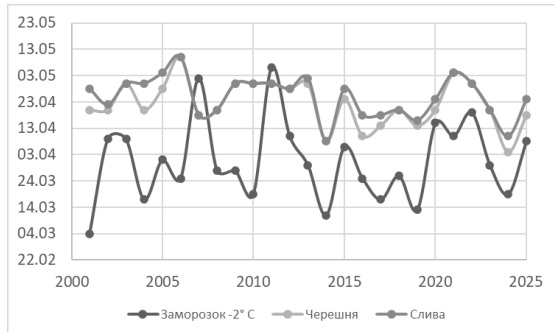


Рис. 8 - Динаміка цвітіння черешні і сливи у порівнянні з датою останнього весняного заморозку -2°C по М Хуст
Fig. 8 - Dynamics of Cherry and Plum Flowering in Relation to the Date of the Last Spring Frost (-2°C) in Khust

На відміну від зерняткових, кісточкові культури (черешня, слива) мають значно вужчий фенологічний інтервал безпеки, що робить їх критично вразливими до весняних заморозків. Лінії лінійної регресії (пунктир) для обох культур мають чітко виражений спадний характер. На початку 2000-х років середній інтервал безпеки коливався в межах 25–30 днів (рис. 9) Станом на 2025 рік значення інтервалу опустилося до 10–15 днів, що фактично нівелює природний захист рослин від заморозків.

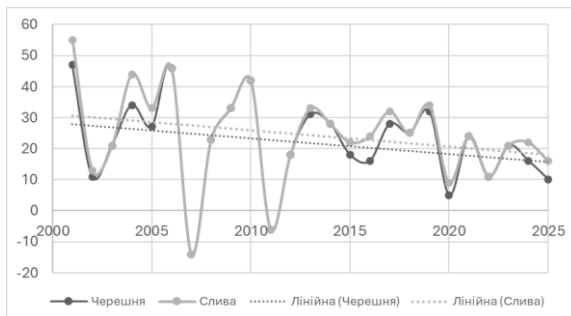


Рис. 9 - Фенологічний інтервал безпеки (дні) для черешні і сливи по М Хуст
Fig. 9 - Phenological Safety Margin (days) for Cherry and Plum in Khust

Аналіз багаторічних даних дат цвітіння яблуні на метеостанції Нижні Ворота, яка представляє гірську територію Закарпаття, демонструє специфічний ризик для яблуні (рис. 10). Попри те що в цій зоні фаза цвітіння настає значно пізніше, ймовірність її збігу з пізніми весняними заморозками залишається високою і становить 24%.

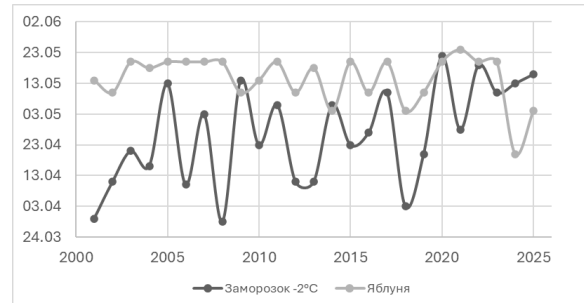


Рис. 8 - Динаміка цвітіння яблуні у порівнянні з датою останнього весняного заморозку -2°C по М Нижні Ворота
Fig. 8 - Dynamics of Apple Flowering in Relation to the Date of the Last Spring Frost (-2°C) in Nyzhni Vorota

На відміну від низинних районів, гірські умови М Нижні Ворота демонструють найвищу амплітуду нестабільності та найшвидшу деградацію безпекового інтервалу навіть для такої стійкої культури, як яблуня (рис. 11). Лінія лінійної регресії (пунктир) демонструє стрімке падіння: від середніх 35 днів на початку 2000-х років до 0 днів у 2025 році. Це означає, що за 25 років яблуня в цій зоні повністю втратила свій часовий «імунітет» до весняних заморозків. На графіку чітко видно шість років (2009, 2014, 2020, 2022, 2024, 2025), коли інтервал безпеки був або нульовим, або глибоко від'ємним. Показник 2024 року (біля -23 днів) є абсолютним антирекордом. Це свідчить про те, що заморозок стався через три тижні після початку цвітіння, що є нищівним для майбутнього врожаю.

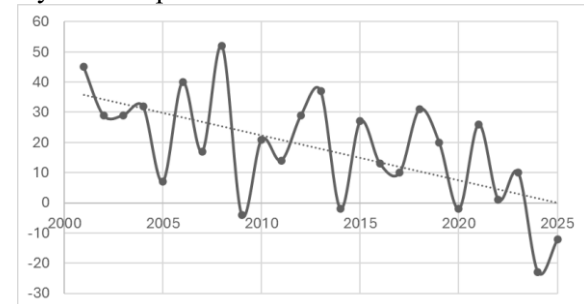


Рис. 11 - Фенологічний інтервал безпеки (дні) для яблуні по М Нижні Ворота
Fig. 11 - Phenological Safety Margin (days) for Apple in Nyzhni Vorota

Отже, порівняльний аналіз динаміки фенологічного інтервалу безпеки свідчить про територіальну неоднорідність кліматичних ризиків. Якщо у низинах і передгір'ї (Берегово, Хуст) спостерігається лише скорочення цього інтервалу, то в гірських умовах (Нижні Ворота) ситуація характеризується значним зростанням агрокліматичної вразливості.

4 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані дані підтверджують гіпотезу про те, що сучасне потепління не знижує, а навпаки, підвищує агрокліматичні ризики для садівництва Закарпаття. Деградація інтервалу безпеки переводить регіон із зони помірного ризику до зони високого ризику для більшості кісточкових культур.

З огляду на це, стратегія розвитку галузі повинна базуватися не лише на підборі пізньоквітучих сортів, а й на впровадженні систем активного захисту (антизаморозкове зрошення, теплові гармати, вітрові установки). Це є критично необхідним для збереження врожайності в умовах, коли природний захист рослин (через пізній початок вегетації) фактично перестав функціонувати.

5 ВИСНОВКИ

У ході проведеного дослідження було проаналізовано вплив весняних заморозків на плоді культури Закарпаття та встановлено, що темпи зміщення дат цвітіння плодових культур на більш ранні терміни суттєво випереджають темпи відступу весняних заморозків. Це призвело до того, що за останні 25 років (2001–2025 рр.) природний механізм захисту рослин, що базувався на пізніших фазах розвитку, практично втратив свою ефективність.

Виявлено закономірне звуження «фенологічного інтервалу безпеки» у всіх досліджуваних зонах. Найбільш критична ситуація спостерігається

в гірській зоні (М Нижні Ворота), де безпекове вікно для яблуні скоротилося з 35 днів до нульових або від'ємних значень. У низинних районах (М Берегове) цей показник для яблуні все ще зберігає певний буфер (близько 20 днів), проте також демонструє стабільну тенденцію до зниження.

Найбільш адаптованою культурою до сучасних агрокліматичних умов регіону залишається яблуня, у якої цвітіння зазвичай розпочинається через 24–26 днів після останнього критичного заморозку. Натомість вирощування абрикосу класифікується як високоризиковане, оскільки фаза їх цвітіння майже у 100% випадків збігається з періодом небезпечних знижень температури.

Підтверджено високу просторову мінливість настання фенофаз, зумовлену рельєфом. Різниця у строках цвітіння між низинними та гірськими районами може досягати 15–25 діб. При цьому гірські райони демонструють найшвидшу деградацію стабільності навіть для стійких сортів.

Отримані результати свідчать про перехід промислового садівництва Закарпаття до категорії високоризикового землеробства. Це зумовлює необхідність обов'язкового впровадження активних систем протизаморозкового захисту (системи зрошення, туманоутворення, вітрові машини) та ретельного підбору сортів із пізніми термінами цвітіння. Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка мікрокліматичного районування для виявлення безпечних «мезозон», придатних для вирощування найбільш чутливих культур.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Chamberlain, C., Cook, B. I., García de Cortázar-Atauri, I., & Wolkovich, E. (2019). Rethinking false spring risk. *Global Change Biology*, 25(10), 2209–2220. <https://doi.org/10.1111/gcb.14642>
- Олексієнко І.М., Затула В.І. Кліматична оцінка ступеня пошкодження плодових культур заморозками на території України. Тези доповідей Першого Всеукраїнського гідрометеорологічного з'їзду (Одеса, ОДЕКУ, 22–23 березня 2017). Одеса: ТЕС, 2017. С. 87–88.
- Олексієнко І.М., Затула В.І. Пізні весняні та ранні осінні заморозки в Україні в умовах сучасних змін клімату. Збірник наукових праць Військового інституту КНУ ім. Т.Г. Шевченка. 2010. Том 27. С. 353–358 http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viking/db/ftp/univ/znp_vi_knu/znp_vi_knu_2010_27.pdf
- Маринін Є.І. Ризики пошкодження винограду заморозками на території Північно-Західного Причорномор'я: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.09 – метеорологія, кліматологія, агрометеорологія. / Маринін Є.І.; Одеський державний екологічний університет. Одеса, 2015. 20 с.
- Ляшенко Г. В., Мельник Е. Б., Суздалова В. І., Любка О. С., Маймеско В. В. Агрокліматична оцінка морозо- і заморозкобезпеки стосовно винограду в Закарпатті. Виноградарство і виноробство. 2018. Вип. 55. С. 85–92.
- Meier M., Fuhrer J., Holzkämper A. Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley. *International Journal of Biometeorology*. 2018. Vol. 62. Pp. 991–1002. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1501-y>
- Botnari A., Botnari A. Impact of late and early frost on agriculture. Case study – Republic of Moldova. *Geoconcept Journal. Special Issue: Geoscience in the Carpathian and Black Sea Region*. 2023. Vol. 4. No. 1. Pp. 63–67 <https://geoconcept-journal.com/index.php/geosp/special/view/4>
- Vitasse Y., Bottero A., Cailleret M. et al. Contrasting resistance and resilience to extreme drought and late spring frost in five major European tree species. *Global Change Biology*. 2019. Vol. 25. Issue 11. Pp. 3781–3792. <https://doi.org/10.1111/gcb.14803>
- Kirchhof E., Campos-Arguedas F., Arias N. S., Kovalski A. P. Thresholds for spring freeze: measuring risk to improve predictions in a warming world. *New Phytologist*. 2025. <https://doi.org/10.1111/nph.70453>
- Mozny, M., Trnka, M., & Žalud, Z. Changing Climatic Conditions in Czechia Require Adaptation Measures in

- Agriculture. *Climate*. 2023. 11(10). 210.
<https://doi.org/10.3390/cli11100210>
11. Куклишин О.В., Вольвач О.В (2025) Аналіз динаміки весняних заморозків у Закарпатті за останні двадцять років. Сільське господарство і зміни клімату: наукові підходи та інновації для стійкого майбутнього : зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених, з нагоди Дня науки в Україні (Одеса, 16 трав. 2025 р.). С. 45–48.
 12. Польовий А.М. Божко Л.Ю, Вольвач О.В. Основи агрометеорології: підручник. Одеса: ТЕС, 2012. 250 с.
 13. Адаменко Т. І. (2014). Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату. Київ.
 14. Hájková L., Možný M., Oušková V., Bartošová L., Dížková P., Žalud Z. Increasing Risk of Spring Frost Occurrence during the Cherry Tree Flowering in Times of Climate Change. *Water*. 2023. Vol. 15. Issue 3. 497.
<https://doi.org/10.3390/w15030497>
 15. Kiss V., Minarik M., Prcik M., Snopkova Z., Tarnik A. The influence of climate change on the beginning of flowering of pear (*Pyrus communis*, L.) and cherry (*Cerasus avium*, L.) and the probability of spring frosts in Slovakia. *Proceedings of 24th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2024. Vol. 24. Issue 4.2.
<https://doi.org/10.5593/sgem2024v/4.2/s19.48>
- ## REFERENCES
1. Chamberlain, C., Cook, B. I., García de Cortázar-Atauri, I., & Wolkovich, E. (2019). Rethinking false spring risk. *Global Change Biology*, 25(10), 2209–2220.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14642>
 2. Oleksienko I.M., Zatul V.I. Klimatychna otsinka stupenia poshkodzhennia plodovykh kultur zamorozkami na terytorii Ukrainy [Climatic assessment of the degree of damage to fruit crops by frosts in Ukraine]. *Tezy dopovidei Pershoho Vseukrainskoho hidrometeorologichnoho zizdu (Odesa, ODEKU, 22–23 bereznia 2017)* [Abstracts of the First All-Ukrainian Hydrometeorological Congress (Odesa, OSENU, March 22–23, 2017)]. Odesa: TES, 2017. Pp. 87–88.
 3. Oleksienko I.M., Zatul V.I. Pizni vesniani ta ranni osinni zamorozky v Ukraini v umovakh suchasnykh zmin klimatu [Late spring and early autumn frosts in Ukraine under modern climate change conditions]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu KNU im. T.H. Shevchenka* [Collection of Scientific Papers of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv]. 2010. Vol. 27. Pp. 353–358. Available at: http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viing/db/ftp/univ/zn_p_vi_knu/zn_p_vi_knu_2010_27.pdf
 4. Marynin Ye.I. Ryzyky poshkodzhennia vynohradu zamorozkami na terytorii Pivnichno-Zakhidnoho Prychornomoria [Risks of grapevine damage by frosts in the North-Western Black Sea region]: *avto-ref. dys. ... kand. heohr. nauk: 11.00.09 – meteorologhiia, klimatologhiia, ahrometeorologhiia* [Extended abstract of Cand. Geogr. Sci. diss.: 11.00.09 – Meteorology, Climatology, Agrometeorology]. Odeskyi derzhavnyi ekolohichnyi universytet [Odesa State Environmental University]. Odesa, 2015. 20 p.
 5. Liashenko H. V., Melnyk E. B., Suzdalova V. I., Liubka O. S., Maimenko V. V. Ahroklimatychna otsinka morozo- i zamorozkonebezpechnosti stosovno vynohradu v Zakarpatti. *Vynohradarstvo i vynorobstvo*. 2018. Vyp. 55. S. 85–92.
 6. Meier M., Fuhrer J., Holzkämper A. Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley. *International Journal of Biometeorology*. 2018. Vol. 62. Pp. 991–1002.
<https://doi.org/10.1007/s00484-018-1501-y>
 7. Botnari A., Botnari A. Impact of late and early frost on agriculture. Case study – Republic of Moldova. *Geoconcept Journal. Special Issue: Geoscience in the Carpathian and Black Sea Region*. 2023. Vol. 4. No. 1. Pp. 63–67. <https://geoconcept-journal.com/index.php/geosp/issue/view/4>
 8. Vitasse Y., Bottero A., Cailleret M. et al. Contrasting resistance and resilience to extreme drought and late spring frost in five major European tree species. *Global Change Biology*. 2019. Vol. 25. Issue 11. Pp. 3781–3792.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14803>
 9. Kirchhof E., Campos-Arguedas F., Arias N. S., Kovaleski A. P. Thresholds for spring freeze: measuring risk to improve predictions in a warming world. *New Phytologist*. 2025.
<https://doi.org/10.1111/nph.70453>
 10. Mozy, M., Trnka, M., & Žalud, Z. (2023). Changing Climatic Conditions in Czechia Require Adaptation Measures in Agriculture. *Climate*, 11(10), 210.
<https://doi.org/10.3390/cli11100210>
 11. Kuklyshyn, O. V., & Volvach, O. V. (2025). Analiz dynamiky vesnianykh zamorozkiv u Zakarpatti za ostanni dvadtsiat rokiv [Analysis of the dynamics of spring frosts in Zakarpattia over the last twenty years]. *Sil's'ke hospodarstvo i zminy klimatu: naukovi pidkhody ta innovatsii dlia stiikoho maibutnoho* (Odesa, May 16, 2025), pp. 45–48, 267–268
 12. Polevoi A.M., Bozhko L.Iu., Volvach O.V. *Osnovy ahrometeorologii: pidruchnyk* [Fundamentals of agrometeorology: a textbook]. Odesa: TES, 2012. 250 p.
 13. Адаменко, Т. І. (2014). Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату [Agroclimatic zoning of the territory of Ukraine taking into account climate change]. Kyiv.
 14. Hájková L., Možný M., Oušková V., Bartošová L., Dížková P., Žalud Z. Increasing Risk of Spring Frost Occurrence during the Cherry Tree Flowering in Times of Climate Change. *Water*. 2023. Vol. 15. Issue 3. 497.
<https://doi.org/10.3390/w15030497>
 15. Kiss V., Minarik M., Prcik M., Snopkova Z., Tarnik A. The influence of climate change on the beginning of flowering of pear (*Pyrus communis*, L.) and cherry (*Cerasus avium*, L.) and the probability of spring frosts in Slovakia. *Proceedings of 24th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2024. Vol. 24. Issue 4.2.
<https://doi.org/10.5593/sgem2024v/4.2/s19.48>

AGROCLIMATIC RISK ASSESSMENT OF SPRING FROSTS FOR FRUIT CROPS IN THE TRANSCARPATHIAN REGION UNDER MODERN CLIMATE CHANGE

O.V. Kuklyshyn, O.V. Volvach

Odesa I.I. Mechnikov National University,
2, V. Zmiienka Str., 65016 Odesa, Ukraine kuklyshyn.oksana@stud.onu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0005-9793-8285> , <https://orcid.org/0000-0002-6650-758X>

This study addresses the urgent issue of adapting industrial fruit growing to the transforming climatic regime in the Transcarpathian region. The research focuses on analyzing risks arising from spring frosts with intensities down to -2°C , which are critical for fruit trees during the flowering phase. The study covers a long-term observation period from 2001 to 2025, allowing for the identification of stable trends in the region's thermal regime changes.

We have established that global warming creates a paradoxical situation for Transcarpathian horticulture. On one hand, there is an increase in the sum of active temperatures; on the other hand, there remains a consistently high frequency of late spring frosts. The research indicates that the onset dates of the flowering phase for pome and stone fruits are shifting to earlier dates. At the same time, the dates of the last spring frosts do not show a proportional shift toward the beginning of spring. This leads to a critical reduction in the "phenological safety interval," defined here as the time gap between the last critical temperature drop and the onset of mass flowering.

We identified significant spatial differentiation in agroclimatic risks depending on elevation and topographical features. The most threatening situation is characteristic of mountainous areas, particularly according to data from the Nyzhni Vorota meteorological station, where the amplitude of safety interval fluctuations is maximal. The study assessed the impact of warming on specific crop types. We established that apricot is the most vulnerable crop, as its flowering phase in most studied years completely coincides with the period of probable frosts. Comparative analysis showed that the apple tree is the most adapted to modern conditions, maintaining a more stable safety interval due to later vegetation stages. Conversely, plum and sweet cherry demonstrate a trend toward the convergence of flowering dates with the last frost dates, increasingly leading these crops into a "frost trap" and resulting in partial or total crop loss.

The results obtained characterize the patterns of degradation in the temporal resources for safe horticultural development. We have proven that minimizing yield losses requires a revision of orchard placement strategies and the implementation of active protection methods, such as artificial fogging systems and wind machines. This work confirms the hypothesis regarding the necessity of microclimatic zoning for the effective management of high-risk agricultural production.

Keywords: spring frosts, flowering phenology, fruit crops, Transcarpathia, climate change, agroclimatic risks, phenological safety interval, thermal regime.

*Подання до редакції : 17. 02. 2026
Надходження остаточної версії : 22. 04. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026*