

ЗМІНА КЛІМАТУ ТА ЙОГО ВПЛИВ

на розширення ареалу *Ambrosia artemisiifolia* в Європі

Мета. Аналіз та узагальнення результатів досліджень проблеми глобального характеру щодо розширення ареалу виду *Ambrosia artemisiifolia* L. у результаті впливу зміни клімату. **Методи.** Системно-аналітичний, абстрактно-логічний, емпіричний. **Результати.** За результатами досліджень вчені передбачили, що *A. artemisiifolia* зміститься на північний схід і розширить свій потенційний ареал в Європі через кліматичні зміни. Встановлено, що поширенню *A. artemisiifolia* сприяє потепління клімату в Європі, яке призводить до прояву високого інвазійного потенціалу виду у широких діапазонах у межах Європи. Використовуючи ENM, вчені чітко визначили регіони, які підпадають під загрозу поширення та зазнають негативних змін. **Висновки.** Глобальне потепління, яке вже відбулося, продовжує сприяти подальшому поширенню та прояву інвазійного потенціалу *A. artemisiifolia* в Європі згідно з результатами моделювання. Багатосторонні дослідження іноземних вчених впливу кліматичних змін на поширення амброзії обґрунтували, що Україна належить до країн, на території яких буде поширюватися цей злісний вид бур'яну. Такі результати досліджень сприяють ефективності рішень, від прийняття яких залежить захист і збереження врожаю сільськогосподарських культур, збереження біорізноманіття країни, а також можливість враховувати його вплив на здоров'я населення. За таких умов заходи з моніторингу та управління видом є надзвичайно актуальними.

амброзія полинолиста, ареал, інвазійний вид, зміна клімату, продукування життєздатного насіння

Батьківщиною *Ambrosia artemisiifolia* L. є Північна Америка, де цей вид широко поширений, як злісний бур'ян у посівах просапних культур, а також багаторічних трав. Нині цей інвазійний вид вважається одним з найпроблемніших в Європі [1].

І.М. СТОРЧОУС,

кандидат сільськогосподарських наук
 Інститут захисту рослин НААН,
 вул. Васильківська, 33, м. Київ,
 03022, Україна
 e-mail: igor_storchous@ukr.net

A. artemisiifolia почала поширюватися в Європі після ненавмисного її завезення у Німеччину у 1873 р. з насінням конюшини і жита. Кількості насіння цього чужорідного виду вистачило для широкого поширення амброзії в Південно-Східній Європі [2]. Впродовж останнього десятиліття зафіксовано поширення також багатьох інших популяцій *A. Artemisiifolia* L. у Центральній і Північній Європі [3]. Нині цей бур'ян поширений в Австрії, Бельгії, Великобританії, Італії, Німеччині, Польщі, Португалії, Чехії, Словаччині, Франції, Угорщині, Швеції, Швейцарії, Україні, Молдові, Росії та інших.

A. artemisiifolia є шкідливим об'єктом й на інших континентах. На африканському континенті вона поширена в Алжирі, на Мадейрі, Мадагаскарі. В азіатських країнах — у Кореї, Казахстані, Японії. Також амброзія поширена й в Австралії. При цьому бур'ян залишається проблемним і в країнах Північної, Центральної та Південної Америки: США, Канада (природньо), Куба, Гваделупа, Мартініка, Мексика, Аргентина, Болівія, Парагвай, Уругвай, Перу, Чілі та ін.

В Україні вперше цей вид виявлено у 1925 р. Починаючи з 50-х років ХХ сторіччя, *A. artemisiifolia* почала активну інвазію у північному і західному напрямках країни. Цей бур'ян поширений на території АР Крим і в усіх областях країни без винятку, у різних масштабах. Тенденція щодо розширення площ забур'яненості *A. artemisiifolia* в Україні зберігається, як за раху-

нок збільшення старих вогнищ, так і за рахунок виявлення нових, зокрема у Вінницькій, Дніпропетровській, Донецькій, Житомирській, Закарпатській, Запорізькій, Київській, Луганській, Миколаївській, Одеській, Полтавській, Рівненській, Сумській, Харківській областях.

Водночас, за висновками українських науковців, проблемним є утворення макровогнища у результаті поступового об'єднання двох мікрровогнищ — закарпатського та чернівецького — в єдине південно-східне (суцільна зона поширення).

Однією з основних проблем, яку становить *A. Artemisiifolia*, є загроза для здоров'я людей. Цей фактор не можна ігнорувати. У надземній частині рослини міститься 0,014% ефірних олій, кверцетин, кумарин, псилостахін та багато інших складних сполук. Пилок рослин має чітко виражену сенсibilізуючу дію. Значної шкоди здоров'ю людей бур'ян завдає саме під час цвітіння внаслідок того, що він продукує величезну кількість пилку, з сильно вираженими алергенними властивостями [4]. Переважна більшість алергічних захворювань, які спричинені пилом амброзії, об'єднані під назвою «полліноз» від англійського слова «pollen» — пилок. Ці захворювання відомі також під назвами «сінна лихоманка», «пилкова алергія», «сінна астма», «осіння пропасниця». До 12% населення страждає на алергію (риніт й астма), спричинену пилом амброзії [5]. Фінансові витрати людей, які хворіють на алергію, на її лікування значні і збільшуватимуться у разі подальшого поширення *A. Artemisiifolia* в Європі [5].

Розповсюдження *A. artemisiifolia* призводить до порушення біологічної різноманітності видів у регіонах і є руйнівним для місцевої флори, завдає великої шкоди сільськогосподарським та декоративним культурам. В умовах зміни клімату інвазійні види науковцями

розглядаються, як основна небезпека біорізноманіттю [6, 7]. Інвазійні види, й амброзія не виняток, можуть спричинити економічні проблеми, особливо у сільському і лісовому господарствах [7]. Зміна (потепління) клімату тільки сприятиме поширенню інвазійних видів [8]. Наявність у інвазійних видів певних характеристик (короткий термін до дозрівання і формування насіння з низькою масою тощо) і широка кліматична варіабельність полегшують швидке розширення їхнього ареалу [9]. Крім цього, необхідно враховувати і людську діяльність, яка часто є причиною поширення інвазійних видів, наприклад, на природні середовища впливає значною мірою глобальна торгівля, транспорт і освоєння нових торговельних транспортних напрямків [7, 10]. Для успішного поширення інвазійних видів рослин важливу роль відіграють й еволюційні фактори, зокрема потенціал для швидкої адаптації до нових умов навколишнього середовища [7, 11]. У випадку з *A. artemisiifolia* науковці припускають кілька причин її поширення на північ. Однією з причин була зміна (потепління) клімату, іншими — збільшення імпорту посівного матеріалу, засміченого насінням бур'яну, а також поширення насіння бур'яну з послідом птахів [2].

Під час досліджень основна увага науковців була зосереджена на дослідженні впливу зміни клімату на розширення ареалу виду *A. artemisiifolia*. Подовження вегетаційного періоду в умовах зміни (потепління) клімату може особливо сприяти пізньому цвітінню однорічних рослин і, тим самим, сприяти потенційному змищенню їх ареалу на північ. При цьому, основними факторами розповсюдження насіння *A. artemisiifolia* залишається використання для сівби посівного матеріалу, яке засмічене насінням амброзії, та рознесення її насіння птахами [12]. У Центральній Європі *A. artemisiifolia* поширювалася завдяки збільшенню імпорту насіння з Південно-Східної Європи, де *A. artemisiifolia* широко поширена. Крім того, широка екологічна амплітуда виду є одним із чинників, який сприяє успішній інвазії цього виду [13, 14].

У зв'язку з наявністю широкої екологічної амплітуди й очі-

куваним поширенням амброзії та пов'язаними з цим збільшеннями фінансових витрат на охорону здоров'я, науковці проявили особливий інтерес щодо визначення територій, на яких переважатимуть сприятливі умови для росту і розвитку *A. artemisiifolia*, також до здійснення оцінки інвазійного потенціалу цього виду та прогнозування впливу зміни клімату на географічний ареал виду.

Мета. Основною метою досліджень була оцінка впливу очікуваних змін клімату на географічний ареал *A. artemisiifolia* в Європі за допомогою моделювання екологічної ніші (ENM). ENM — це усталений та успішний метод оцінки потенційного поширення видів рослин або тварин у сучасних умовах навколишнього середовища і майбутніх екологічних сценаріях [15]. На основі інформації про поточні явища виду та умови навколишнього середовища у відповідних місцях визначався взаємозв'язок між видом і середовищем за допомогою статистичних моделей [16].

ENM застосовується для кількісної оцінки біологічних інвазій [17]. Однак є певні труднощі. Досліджуючи інвазійні види, для науковців необхідно було з'ясувати проблему і розмежувати умови, які несприятливі для поширення інвазійного виду, від факторів, які обмежують таке поширення на певній території. ENM припускає, що поширення виду знаходиться в рівновазі з умовами навколишнього середовища [18], тобто потенційне поширення дорівнює фактичному поширенню. Таке припущення про рівновагу [19] часто може бути порушеним у випадку з інвазійними видами, які перебувають у зоні захоплення нового ареалу, оскільки вони можуть не захоплювати всіх придатних середовищ для вегетування через наявність там факторів, які будуть обмежувати їхній ріст і розвиток.

Одним із способів справитися з припущенням про потенційно порушену рівновагу у випадку інвазійних видів є використання даних з місцевого ареалу для формування базової моделі, а потім перенесення зв'язків видового середовища до зони, що зазнала вторгнення (адвентивний ареал). Це називається перенесенням у просторі [20]. Отже, вчені вико-

ридали два підходи для моделювання видових та екологічних взаємозв'язків для *A. artemisiifolia*. Використали європейські дані (дані про появу та екологічні дані), та дані про природний ареал, тобто дані Північної Америки.

Для дослідження використовували базу даних Глобального інформаційного фонду про біорізноманіття. Пропонуючи велику кількість вільно доступних даних, база даних GBIF є потенційним інформаційним ресурсом для використання в ENM [21]. Проте європейські дані GBIF для *A. artemisiifolia* не відображали належним чином реального її поширення, зокрема для Угорщини, долини Рона (Франція) або долини По (Італія), хоча це три основні регіони, в яких в Європі широко поширена *A. artemisiifolia*.

Оскільки загальна для всієї Європи карта поширення *A. artemisiifolia*, яка була б розроблена згідно зі стандартними вказівками, на час досліджень була відсутня [5], науковцями було зібрано незалежну інформацію про поточний стан поширення амброзії з кількох національних карт розповсюдження і баз даних, на основі яких створено нову карту європейського поширення виду. Ця інформація була використана як незалежні дані для оцінки точності результатів ENM. Науковці використовували ці дані лише для оцінки, а не для моделювання.

Для моделювання потенційного європейського ареалу *A. artemisiifolia* за майбутніх кліматичних умов науковці взяли до уваги дев'ять різних екологічних сценаріїв. Порівняння результатів цих сценаріїв зі змодельованим європейським ареалом у сучасних кліматичних умовах дало змогу оцінити інвазійний потенціал *A. artemisiifolia* в Європі та дало відповіді на наступні три питання:

- 1 — у яких регіонах Європи змінюватиметься придатність середовища існування для *A. artemisiifolia* за сценарієм потепління клімату?
- 2 — чи є в Європі в середньому кращі умови для поширення *A. Artemisiifolia* L. після прогнозованого потепління клімату?
- 3 — наскільки правильні прогнози?

Методика досліджень. В якості змінних навколишнього середовища використовували кліматичні змінні поточних умов за період 1950–2000 рр., які містяться в глобальній кліматичній базі даних WorldClim [22]. Під час досліджень інші змінні довіклля, такі як землекористування, не враховувалися. Землекористування є важливим фактором для *A. artemisiifolia* у місцевому масштабі (*A. artemisiifolia* в основному зустрічається в рудеральних і сегетальних місцях вегетування в Європі). Відсутність цього фактора на масштабній структурі результатів моделювання [23] не впливала, прогноз поширення *A. artemisiifolia* базувався на дослідженні лише впливу зміни клімату.

За висновками вчених деякі алгоритми ENM погано працювали із взаємопов'язаними змінними середовища [16]. Тому для досліджень було обрано підмножину з шести кліматичних змінних: середній добовий температурний діапазон, сезонна температура, середня температура найтеплішого кварталу, сезонність опадів, опади найвологішого кварталу, опади найсухішого кварталу.

Для прогнозування потенційного географічного поширення *A. artemisiifolia* в Європі за майбутніх кліматичних умов використовували сценарії IPCC A1, A2 і B1 до 2080 року [24] та три Моделі глобальної циркуляції:

- зв'язана глобальна кліматична модель CGCM (the Coupled Global Climate Model CGCM) [25];
- кліматична модель атмосферних досліджень CSIRO (the CSIRO Atmospheric Research Climate Model) [26];
- зв'язана модель Hadley Center HadCM3 (the Hadley Centre Coupled Model HadCM3) [27, 28].

Також під час досліджень було використано дані третього звіту IPCC, наданого Міжнародним центром тропічного землеробства (International Centre for Tropical Agriculture) — CIAT з просторовою роздільною здатністю 5 хвилин.

Дані про поширення (тільки наявність) *A. artemisiifolia* з географічною прив'язкою дослідниками були отримані з GBIF 15 червня 2009 року. Записи про поширення з точністю менше одного де-

сяткового знака ними не враховувалися.

Щоб оцінити якість результатів моделювання, дослідники випадковим чином розділили дані про випадки у співвідношенні 70:30, щоб отримати дві підмножини даних: одну базову модель та іншу для тестування моделі розповсюдження, що передбачалося, відповідно. Крім того, було використано незалежні дані про ареал *A. artemisiifolia* для перевірки узгодженості між діапазонами, які моделювалися та які спостерігалися, та для оцінки потенційного упередження даних GBIF. Оскільки карта розповсюдження по всій Європі, яка відповідає 6 стандартним вказівкам, була відсутня, дані з понад 40-ка національних карт розповсюдження та баз даних були зібрані та зведені для формування карти розповсюдження амброзії в Європі.

Просторова протяжність отриманих даних коливалася від 35° п.ш. до 79° північної широти і від 10° з.д. до 70° східної довготи (Європа), відповідно, від 11° п.ш. до 58° північної широти і від 130° з.д. до 50° західної довготи (Північна Америка). Просторова роздільна здатність для інформації про навколишнє середовище становила 5' × 5', що відповідало точності координат записів про події GBIF.

Продемонстровано, що існує велика мінливість прогнозування моделі від одного алгоритму до іншого [29]. Щоб не покладатися тільки на один алгоритм і мати можливість оцінити невизначеність, спричинену різними підходами, було використано 16 різних алгоритмів. Для алгоритмів, які використовують дані про відсутність, було вибрано навмання 10 000 псевдочок відсутності із випадків, що не виникають у межах області, яка досліджувалася.

Науковцями застосовано два підходи для оцінки потенційного ареалу поширення *A. artemisiifolia* в Європі. По-перше, було змодельовано взаємозв'язок між видами і навколишнім середовищем на основі європейського набору даних, тобто кліматичної ніші в інвазійному ареалі — та спроектовано кліматичну нішу на Європу (адвентивний підхід до діапазону). По-друге, було спроектовано взаємозв'язок видів і довіклля, розроблений на підставі набору

даних з Північної Америки, тобто кліматичною нішею в місцевому ареалі, на Європу [30] (підхід до місцевого (природного) ареалу).

Щоб вибрати кращі окремі моделі, науковці розглядали значення AUC («площа під кривою робочих характеристик приймача», [31]) і точкову бісеріальну кореляцію (COR) між результатами моделювання і даними незалежних випробувань [29] — два заходи, які часто використовуються для визначення продуктивності моделі [32].

Для перетворення результатів безперервного моделювання в двійкові дані про наявність і відсутність, було обрано поріг, що мінімізує різницю між чутливістю і специфічністю (задовільний) в якості критерію оптимізації [33].

Метод зменшення невизначеності одиничних моделей, що прогнозувався, полягав у поєднанні прогнозів найбільш ефективних алгоритмів в узгоджену карту [34]. М. Marmion et al. [34] рекомендувало розрахувати середнє значення кращих одиничних моделей за їх значенням AUC. Значення AUC були розраховані з використанням тестових даних того ж діапазону й якості, що і дані дослідження (наприклад, дані власного діапазону) — з використанням 30% даних GBIF, які обиралися випадковим чином і які не використовувалися для формування, та приблизно в десять разів більше псевдовідсутностей, які також обрали випадково.

Науковцями був застосований метод консенсусу за М. Marmion et al. [34] до результатів моделювання, які були стандартизовані щодо середньої придатності середовища існування в межах всієї області дослідження вибірки даних. В іншому випадку ефективні моделі, які не вичерпують весь спектр придатності середовища існування, в середньому недооцінені, незважаючи на їхнє високе значення AUC. Крім того, дослідники модифікували визначення, віднявши 0,5 від AUC. Ця остання модифікація була доречною, оскільки скасовувала вплив одиничних не вибірковок моделей (AUC ≈ 0,5).

Дослідники визначили відсоток моделей, які передбачають наявність *A. artemisiifolia* (на основі двійкових даних), що дало ще



Фаза бутонізації Амброзії (фото — Масенький Р.Є.)

одну можливість поєднати кілька результатів моделювання в консенсусну карту.

Для оцінки ефективності моделювання використано незалежні дані про поширення *A. artemisiifolia* в Європі, отримані зі створеної ними карти такого поширення. Для кожного результату моделювання було розраховано AUC і COR [29].

Кліматичні (метео)-карти зроблені з прив'язкою до вегетаційного періоду амброзії полинолистоті, який становить один цикл розвитку рослини, тобто з весни (орієнтовно квітень), коли насіння бур'яну проростає, по осінь (орієнтовно серпень-жовтень, та листопад — для південних районів), коли достигле насіння опається і засмічує ґрунт. Насіння, яке визріло у серпні — листопаді, набуває первинного стану спокою і не здатне прорости взимку. Протягом зими воно проходить у ґрунті природну стратифікацію й навесні проростає. Додатково необхідно зазначити таку особли-

ву морфологічну ознаку бур'яну, як наявність чоловічих і жіночих квіток. Чоловічі квітки (3—5 мм у діаметрі) зібрані в кошики і колосоподібні суцвіття на верхівках пагонів. Жіночі квітки зібрані по 2—3 у пазухах верхніх листків або біля основи чоловічих суцвіть.

Результати та обговорення.

Дані про поширення з GBIF (рис. 1, a) помітно відрізнялися від даних діапазону, отриманого з національних карт і баз даних (рис. 1, b). Результати моделювання з використанням підходу з адвентивним діапазоном відображали суттєве упередження вибірки з даних GBIF (рис. 1, c) і, отже,

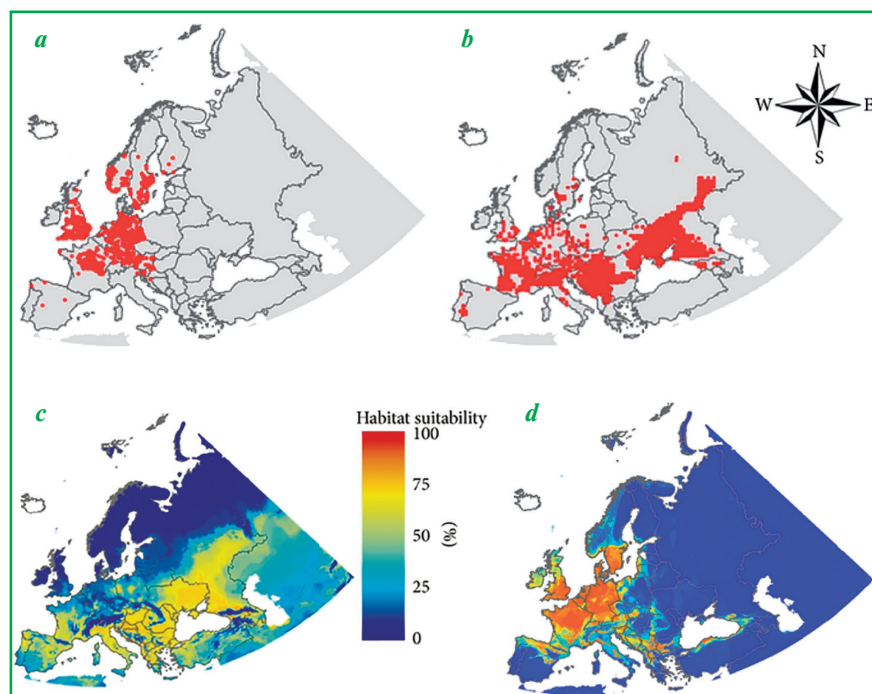


Рис. 1. a — поширення *Ambrosia artemisiifolia* відповідно до європейських записів GBIF; b — поширення *Ambrosia artemisiifolia* в Європі в осередках сітки 50 км × 50 км — на основі інформації понад 40-ка національних карт поширення і міжнародних баз даних; c — змодельована придатність середовища поширення *Ambrosia artemisiifolia* в Європі за сучасних кліматичних умов на основі європейських даних (підхід з адвентивним ареалом). Більш теплі кольори показують області з краще прогнозованими умовами. Алгоритм GBM; d — змодельована придатність середовища поширення *Ambrosia artemisiifolia* N=2048 × в у Європі в сучасних кліматичних умовах, заснованих на північноамериканських даних (підхід аборигенного ареалу). Більш теплі кольори показують області з краще прогнозованими умовами. Алгоритм GBM. Проекція Europe Albers Equal Area Conic [34]



Дозрілий плід Амброзії полинолистоті (1,5—2 мм у розрізі) (фото — Масенький Р.Є.)

не задовольнили дослідників. І навпаки, підхід до природного ареалу забезпечував більш надійну оцінку потенційного поширення *A. artemisiifolia* (рис. 1, d).

Вищу ефективність результатів моделювання з використанням даних з ареалу походження цього виду, тобто місця походження, було підтверджено під час вивчення значень AUC та кореляції (COR) між результатами моделювання та даними про поширення *A. artemisiifolia* в Європі в осередках 50 км × 50 км на підставі інформації з понад 40-ка національних карт поширення та міжнародних баз даних (рис. 2). Для вибору найкращих одиничних моделей науковці досліджували значення AUC values (“area under the receiver operating characteristic curve”) [31] і точкову бісеріальну кореляцію (COR) між результатами моделювання та незалежними тестовими даними [29] — дві міри продуктивності моделі, які часто використовуються з цією метою [32]. Для більшості алгоритмів підхід з використанням даних з ареалу походження цього виду, тобто місця походження, дає більш високі значення AUC і COR порівняно з підходом щодо використання даних адвентивного ареалу.

Для подальшого аналізу було використано лише підхід з вико-



Колосоподібне суцвіття дозрілих плодів Амброзії полинолистої (фото — Масенький Р.Є.)

ристанням даних з ареалу походження цього виду, тобто місця походження, і 10 найкращих алгоритмів. Результати моделювання для цих алгоритмів і вихідні дані з ареалу походження виду показали значення AUC-values > 0,8, що є «відмінним» (“excellent” according) за Hosmer and Lemeshow [35], за винятком СТА із значенням AUC 0,76, що є «прийнятним» (“acceptable” according) за Hosmer and Lemeshow [35]. Значення COR варіювали в межах 0,45—0,51.

Карта консенсусу (зважена за значенням AUC-value та середньою придатністю навколишнього середовища поширення для окремих моделей, підготовлених і прогнозованих з урахуванням даних з ареалу Північної Америки) у сучасних кліматичних умовах (рис. 2, a) приймає значення AUC-value 0,86 і значення COR-value 0,52 (оцінка проєкції на Європу) — використовуючи дані про поширення *A. artemisiifolia* в Європі в осередках 50 км × 50 км на підставі інформації з понад 40-ка національних карт поширення та міжнародних баз даних (рис. 1, б). Порівняно з одиничними моделями, це найбільше значення COR-value і друге за величиною значення AUC-value (після ANN: AUC = 0,86).

За сучасних кліматичних умов прогнозується, що *A. artemisiifolia* буде поширена на півночі Португалії та в окремих регіонах Франції (Долина Рона, Аквітанія), Північній та Середній Італії, а також у Південно-Східній Європі (Угор-

щина, Словенія, Хорватія, Сербія, Албанія, південно-західна Росія, схід України, частини Румунії, Чорногорії, Боснії та Герцеговини, Греції) відповідно до карти консенсусу (рис. 2, a).

На картах консенсусу за майбутніх умов (рис. 3, b, g) показано зсув ареалу поширення на північний схід і подвоєння площі території, яка за прогнозами матиме сприятливі умови навколишнього середовища для вегетування *A. artemisiifolia* (табл.). У випадку зміщення і збільшення ареалу, який прогнозується у майбутньому, між результатами моделювання трьох сценаріїв IPCC B2, A1 і A2 не було великих відмінностей.

За результатами досліджень вчені передбачили, що *A. artemisiifolia* зміститься на північний схід і розширить свій потенційний ареал в Європі через кліматичні зміни. Отже, поширенню *A. artemisiifolia* сприяє потепління клімату в Європі, яке призводить до високого інвазійного потенціалу виду у широкому діапазоні у межах Європи. Використовуючи ENM, вчені надійно визначили регіони, які перебувають під загрозою вторгнення. Прогнозування потенційного поширення *A. Artemisiifolia* має стати корисним інструментом для розробки заходів контролю цього виду [36], таких як моніторинг та викорінення його в регіонах, яким загрожує його поширення. Заходи протидії повинні здійснюватися і в місцях, що потенційно підпадають під загрозу вторгнення *A. artemisiifolia*.



Плоди Амброзії полинолистої (фото — Масенький Р.Є.)

Для прогнозування потенційного ареалу *A. artemisiifolia* аборигенний підхід до ареалу працював набагато краще, ніж адвентивний підхід. Хоча на час досліджень вибірка даних про поширення амброзії в Європі з природного ареалу була обмежена та формувалася у процесі моделювання, подальша змодельована ніша, що проектувалася на Європу, добре відобразила її поширення. При цьому вчені припустили, що аборигенні дані про ареал інформативно перевершують адвентивні дані про ареал також і по інших інвазійних видах, причиною є те, що останні часто важко отримати [37].

Оцінка з використанням незалежних даних про виявлення показала, що підхід до природного ареалу дає надійні результати за поточних кліматичних умов, і тому його можна прогнозувати на майбутнє. ENM на основі картографічних даних, які було створено під час дослідження, можливо стало б зручнішим для прогнозування подальшого поширення *A. artemisiifolia* в Європі. Але вибірка даних з кількох національних джерел — це дуже трудомісткий процес. На відміну від них, дані GBIF з аборигенного ареалу були доступними для багатьох видів і, принаймні, у випадку з *A. artemisiifolia* стали надійними. Крім того, науковцям було необхідно використати незалежні дані для оцінки поширення виду.

Додатковою перевагою підходу до використання аборигенного ареалу є те, що змодельовану нішу (як виявилось ймовірним за оцінкою дослідників) можна проектувати на інші регіони (наприклад, Азію чи Австралію), щоб оцінити інвазійний потенціал *A. Artemisiifolia* у цих місцях. Вчені припустили, що дані з місцевого ареалу, ймовірно, були б простіші у використанні, але все ж таки містили обмежену інформацію.

Дослідники пояснили погану ефективність адвентивного підходу тим, що він може бути зумовлений серйозним упередженням вибірки європейських даних з GBIF щодо *A. artemisiifolia*. Упередженість вибірки означає, що ймовірність реєстрації не однакова для всіх особин виду в межах території, яка підпадала під дослідження. Таким чином, європейські дані GBIF для *A. artemisiifolia* не

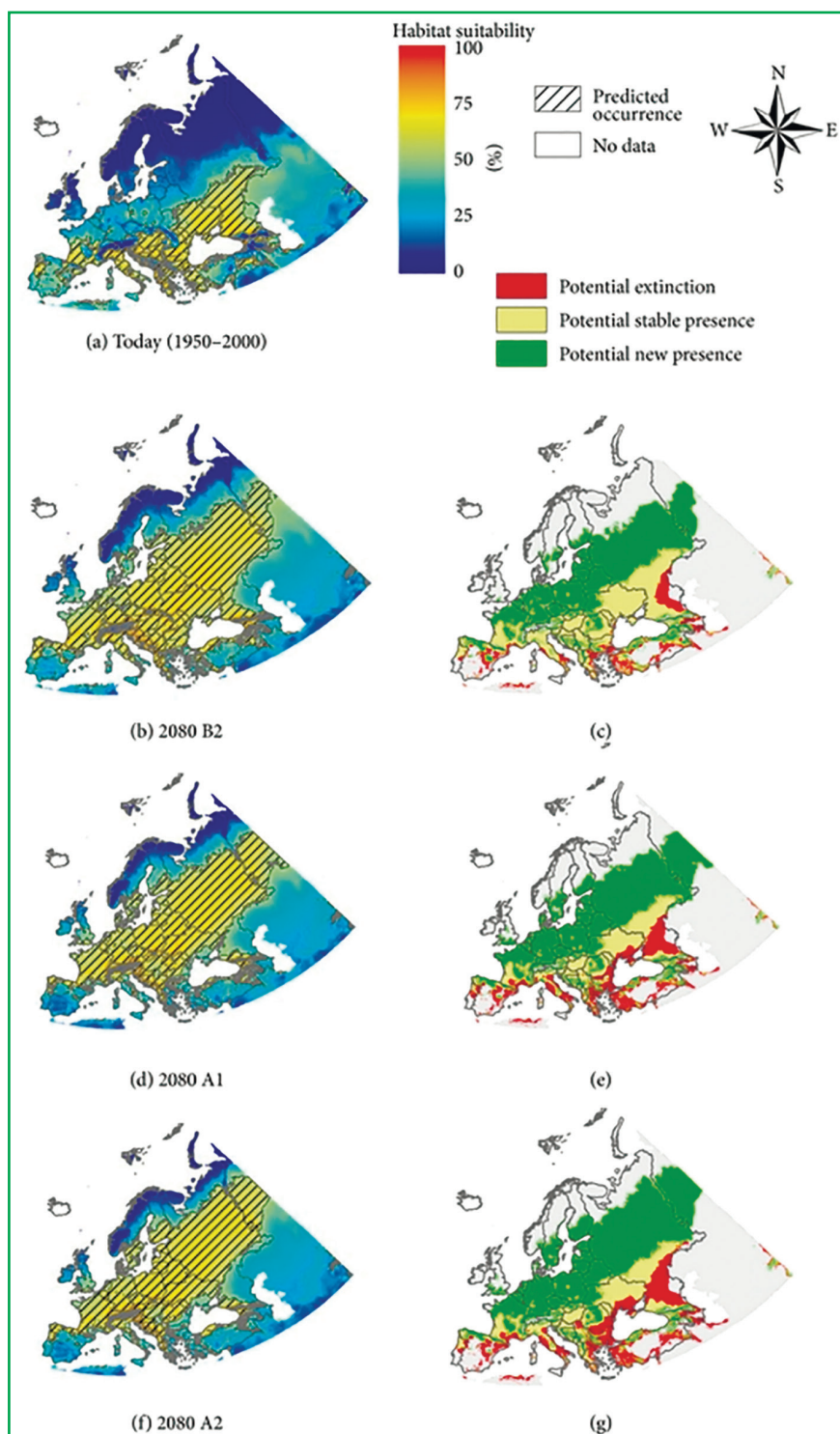


Рис. 2. Прогнозована придатність середовища поширення для *Ambrosia artemisiifolia* (a) за сучасних кліматичних умов (b) та (c) на 2080 рік, враховуючи сценарій B2 (d) та (e) IP IPCC на 2080 рік, враховуючи сценарій A1 IPCC та (f) та (g) для 2080, враховуючи сценарій A2 IPCC. Показані результати моделювання на основі даних північноамериканських GBIF. Карти консенсусу з десяти «найкращих» алгоритмів (ANN, CTA, FDA, GAM, GBM, GLM, MARS, ME, RF, SVM), вибрані за їх значеннями AUC values. Для майбутніх сценаріїв консенсусні карти включали результати моделювання трьох різних GCMs (CCCMA, CSIRO, HADCM3). Поріг для двійкових результатів (справедливо = 0,645 — мінімізація різниці між чутливістю та специфічністю) базується на оцінці консенсусної карти десяти «найкращих» алгоритмів, спроектованих на Північну Америку з використанням тестових даних GBIF (30% записів GBIF у Північній Америці для *A. artemisiifolia* вибрані навмання та не використані як базові). Projection: Europe Albers Equal Area Conic [35]

відображали належним чином фактичне поширення виду. Наприклад, не було даних про випадки GBIF для Угорщини, долини Рона (Франція) або долини По (Італія) (рис. 1, а). За даними Makra et al [38] це три основні регіони, в які в Європі вторглася *A. Artemisiifolia*, що підтверджено картами рознесення її пилку.

На відміну від недостатньої кількості фактів у регіонах, де *A. artemisiifolia* є дуже поширеним явищем, майже кожна поява *A. artemisiifolia* у Німеччині та Північній Європі оприлюднюється у GBIF завдяки високому інтересу громадськості у цих країнах, незалежно від того, випадки — це усталені популяції або лише поодинокі вегетативні особини, які, можливо, не зможуть успішно поширюватися, а замість цього залишаться не натуралізованими. Насіння *A. artemisiifolia*, інтродуковані, наприклад, забрудненим послідом птахів, можливо, можуть проростати в Скандинавії, оскільки вид має здатність проростати в широкому діапазоні температур, включаючи також дуже низькі температури [13]. Однак для встановлення стабільних популяцій однорічні види повинні пройти свій життєвий цикл, щоб отримати дозріле насіння. *A. artemisiifolia* в середньому потребує накопиченої суми температури 1400 °C (власні дані дослідників, неопубліковані) для досягнення цієї фенологічної фази. Однак така кількість накопиченої температури відбувається в Північній Європі за реальних кліматичних умов лише в окремі надзвичайно теплі роки. Тому загалом *A. artemisiifolia* все ще недовговічна у Скандинавії, за невеликими винятками, але це може змінитися в Південній Скандинавії через глобальне потепління, як свідчать результати досліджень. Очевидно надмірне поширення *A. artemisiifolia* в Центральній та Північній Європі в

базі даних GBIF надзвичайно відрізняється від загальноприйнятого припущення, що інвазійні види можуть частіше бути переоціненіми у базах даних їхнього ареалу.

У північно-західній Європі (наприклад, у Франції та Німеччині) потенційне розповсюдження *A. Artemisiifolia* може бути недооціненом. Однією з причин цього може бути те, що кліматичні зміни, що використовувалися для моделювання, відображали середні кліматичні умови за 1950—2000 рр. **Однак, глобальне потепління вже відбулося.** Результати моделювання з використанням цих даних оцінюють потенційне розповсюдження за минулих кліматичних умов, і, отже, потенційне поширення за нинішніх (підвищення температури повітря) умов може бути недооціненом. Щодо результату моделювання (консенсусна карта) для місцевого ареалу, дослідники відзначили, що передбачуваний діапазон охоплює лише щільно скупчену область на сході. Розкидані запаси на заході не включені. Результат моделювання відображає лише основний діапазон і, отже, є консервативною оцінкою власного діапазону. Отже, прогноз на Європу також дає консервативну оцінку.

На відміну від досить низької придатності середовища існування, прогнозованої для північно-західної Європи, результати моделювання можуть переоцінити появу *A. artemisiifolia* у середземноморському регіоні. Можлива причина відсутності *Ambrosia* в Середземноморському регіоні, незважаючи на місця, які передбачені придатними до засмічення. Північноамериканські популяції, адаптуючись до середземноморських кліматичних умов, ще не досягають адвентивних діапазонів (Європа). Оскільки змодельовані відносини між видами та середовищем базуються на всіх популяціях (корінних ареалах), які

еволюціонували протягом часу, змодельована ніша може бути ширшою, ніж кліматична ніша цих популяцій, що зустрічається в Європі. У деяких випадках реалізовані ніші виду можуть варіювати залежно від природних та інтродукованих ареалів [39]. Це може ускладнити міжконтинентальне перенесення моделей [40]. Але в цілому у випадку з *A. artemisiifolia* результати моделювання з використанням аборигенного ареалу добре відображають спостережувану модель поширення *A. artemisiifolia* в Європі.

Високі значення AUC для «десяти найефективніших» алгоритмів і консенсусні карти з використанням незалежних даних для оцінки виправдовують прогноз на майбутні кліматичні умови. Прогнозоване збільшення території, передбачене як придатне для поширення *A. artemisiifolia* за майбутніх кліматичних умов, та передбачуваний зсув ареалу на північ і на схід відповідає загальним очікуванням [15]. Це підтверджує припущення, що прояву інвазійного потенціалу *A. artemisiifolia* у Центральній та Північній Європі сприяє потепління клімату. Essl та ін. [41] заявляють, що глобальне потепління посилить інвазійний потенціал *A. artemisiifolia* в Австрії на основі тісного взаємозв'язку поширення *A. Artemisiifolia* до температури в узагальненій лінійній моделі. Дослідники підтвердили цю тенденцію для широких регіонів Європи та підтвердили припущення, що *A. artemisiifolia* буде активно поширюватися в результаті потепління клімату, застосовуючи кілька алгоритмів.

Тому у висновку науковці зазначили, що величезним територіям (особливо Північна Франція, Німеччина, Бенілюкс, Чехія, Польща, країни Балтії, Білорусь, Україна та широкі частини Росії) потенційно загрожує вторгнення цього виду, особливо в умовах зміни клімату. Оскільки *A. artemisiifolia* в основному підтримується та поширюється завдяки діяльності людини [42], вид може поширюватися на великій відстані за короткий проміжок часу. Також зазначено, що кілька вступних заходів все ще відбуваються в різних європейських країнах. Що стосується ймовірного розширення ареалу видів у Євро-

Площа та координати територій, які за прогнозом будуть придатними для поширення *Ambrosia artemisiifolia* згідно з картами консенсусу (рис. 2)

Назва карти	Площа (10° км ²)	Довгота (°)	Широта (°)
Карта консенсусу для сучасних умов (1950—2000)	3,47	27,82	45,34
Карта консенсусу на 2080 р. (B2)	7,08	31,16	51,31
Карта консенсусу на 2080 р. (A1)	7,10	33,01	52,56
Карта консенсусу на 2080 р. (A2)	7,08	32,96	53,35



Зелений жіночий кошик в пазухах листків та жовтуваті чоловічі кошики на верхівках гілок Амброзії полинолистої у фазі початку дозрівання (фото — Масенький Р.Є.)

пі, то, як показали результати, у недалекому майбутньому виникне серйозна загроза для здоров'я людей. На час досліджень у різних країнах через *A. artemisiifolia* витрати становили кілька мільйонів євро на рік для лікування алергій (наприклад, 110 млн євро на рік в Угорщині [43]). З огляду на шкоду, заподіяну здоров'ю населення, та високі витрати на охорону здоров'я, спричинені інвазійним потенціалом, існує гостра необхідність заходів контролю, щоб мінімізувати подальше поширення цього виду.

ВИСНОВКИ

Глобальне потепління сприятиме подальшому поширенню та прояву інвазійного потенціалу *A. artemisiifolia* в Європі згідно з результатами моделювання. Дослідженнями встановлено, що розширення ареалу виду *A. artemisiifolia* додатково відбуватиметься внаслідок подовження вегетаційного періоду амброзії в умовах зміни (потепління) клімату, відповідно більш пізньому її цвітінню та визріванню насіння (листопад включно), що сприятиме потенційному зміщенню її ареалу на північ і схід. Сільськогосподарським виробничникам необхідно враховувати цей факт, оскільки бур'ян, маючи високу продукуючу здатність до утворення великої кількості насіння, чисельність яких може досягати 200 млн штук на 1 га, буде також засмічувати посівний матеріал. Як доведено, основним фактором розповсюдження насіння *A. artemisiifolia* буде використання для сівби посівного матеріалу, яке замінене насінням амброзії.

Рекомендовано здійснювати планові заходи зі знищення цього бур'яну до масового цвітіння, щоб не допустити утворення насіння і повторного засмічення ґрунту. Дослідники наполегливо рекомендують застосовувати своєчасні стратегії управління цим видом, зокрема і міжнародні. Як правило, заходи стримування інвазійних видів ефективні лише на початку їх розповсюдження [5]. Після поширення виду заходи можуть стати надзвичайно дорогими та дедалі неефективними [44]. Заходи з моніторингу та управління є надзвичайно необхідними та своєчасними в умовах впливу потепління, спричиненого зміною клімату. Для успішного ведення господарства це можна поєднати з методом ENM, щоб краще зрозуміти екологічні вимоги та динаміку ареалу виду.

Дану інформацію можна використовувати під час складання прогнозів ймовірного поширення бур'яну для зосередження уваги на більш проблемних регіонах країни з урахуванням того, що клімат змінюється та сприяє зміщенню ареалу виду.

ЛІТЕРАТУРА

1. T.C.G. Rich. (1994). Ragweeds (*Ambrosia* L.) in Britain. *GRANA*, vol. 33, no. 1, pp. 38—43.
2. G. Vogl, M. Smolik, L. M. Stadler et al. (2008). Modelling the spread of ragweed: effects of habitat, climate change and diffusion. *European Physical Journal*. vol. 161, no. 1, pp. 167—173.

3. P. Taramarcas, C. Lambelet, B. Clot, C. Keimer, and C. Hauser. (2005). Ragweed (*Ambrosia*) progression and its health risks: will Switzerland resist this invasion? *Swiss Medical Weekly*, vol. 135, no. 37—38, pp. 538—548.

4. B. Chauvel, F. Dessaint, C. Cardinal-Legrand, and F. Bretagnolle. (2006). The historical spread of *Ambrosia artemisiifolia* L. in France from herbarium records. *Journal of Biogeography*, vol. 33, no. 4, pp. 665—673.

5. B. Alberternst, S. Nawrath, and F. Klingenstein. (2006). Biologie, Verbreitung und Einschleppungswege von *Ambrosia artemisiifolia* in Deutschland und Bewertung aus Naturschutzsicht, Biology, distribution and pathways of introduction of *Ambrosia artemisiifolia* in Germany and assessment from a nature conservation point of view. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, vol. 58, pp. 1—7.

6. S. Pompe, J. Hanspach, F. Badeck, S. Klotz, W. Thuiller, and I. Kühn. (2008). Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany. *Ecology Letters*, vol. 4, pp. 564—567.

7. O. Bossdorf, H. Auge, L. Lafuma, W.E. Rogers, E. Siemann, and D. Prati. (2005). Phenotypic and genetic differentiation between native and introduced plant populations. *Oecologia*, vol. 144, no. 1, pp. 1—11.

8. W. Thuiller, D. M. Richardson, and G. F. Midgley. (2007). Will climate change promote alien invasions? in *Biological Invasions*, W. Nentwig, Ed., vol. 193, pp. 197—211, Springer, Berlin, Germany.

9. J.J. Hellmann, J.E. Byers, B.G. Bierwagen, and J.S. Dukes. (2008). Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conservation Biology*, vol. 22, no. 3, pp. 534—543.

10. V. Hermoso, M. Clavero, F. Blanco-Garrido, and J. Prenda. (2011). Invasive species and habitat degradation in Iberian streams: an analysis of their role in freshwater fish diversity loss. *Ecological Applications*, vol. 21, no. 1, pp. 175—188.

11. P.J. Prentis, J.R.U. Wilson, E.E. Dormontt, D.M. Richardson, and A.J. Lowe. (2008). Adaptive evolution in invasive species. *Trends in Plant Science*, vol. 13, no. 6, pp. 288—294.

12. G. Schröder. (2004). Risikoanalyse von gebietsfremden Pflanzen? Das neue Konzept der EPP0. *Gesunde Pflanzen*, vol. 56, no. 3, pp. 75—79.

13. P. Steinbauer and B. Grigsby. (1957). Interaction of temperature, light, and moistening agent in the germination of weed seeds. *Weeds*, vol. 5, pp. 175—182.

14. M.C. Leiblein and R. Lösch. (2011). Biomass development and CO₂ gas exchange of *Ambrosia artemisiifolia* L. under different soil moisture conditions. *Flora*, vol. 206, no. 5, pp. 511—516.

15. E. Martinez-Meyer. (2005). Climate change and biodiversity: some considerations in forecasting shifts in species' potential distribution. *Biodiversity Informatics*, vol. 2, pp. 42—55.

16. A. Guisan and W. Thuiller. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, vol. 8, no. 9, pp. 993—1009.

17. W. Thuiller, D.M. Richardson, P. Pyssek, G.F. Midgley, G.O. Hughes, and M. Rouget. (2005). Niche-based modelling as a tool for pre-

dicting the risk of alien plant invasions at a global scale. *Global Change Biology*, vol. 11, no. 12, pp. 2234–2250.

18. A. Jiménez-Valverde, J. M. Lobo, and J. Hortal. (2008). Not as good as they seem: the importance of concepts in species distribution modelling. *Diversity and Distributions*, vol. 14, no. 6, pp. 885–890.

19. M.P. Austin. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, vol. 157, no. 2–3, pp. 101–118.

20. C.F. Randin et al. (2006). Are niche-based species distribution models transferable in space? *Journal of Biogeography*, vol. 33, pp. 1689–1703.

21. P. Flemons, R. Guralnick, J. Krieger, A. Ranipeta, and D. Neufeld. (2007). A web-based GIS tool for exploring the world's biodiversity: the Global Biodiversity Information Facility Mapping and Analysis Portal Application (GBIF-MAPA). *Ecological Informatics*, vol. 2, no. 1, pp. 49–60.

22. R.J. Hijmans, S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones, and A. Jarvis. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, vol. 25, no. 15, pp. 1965–1978.

23. R.G. Pearson and T.P. Dawson. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, vol. 12, no. 5, pp. 361–371.

24. IPCC, Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2007.

25. G.M. Flato, G.J. Boer, W.G. Lee et al. (2000). The Canadian centre for climate modelling and analysis global coupled model and its climate. *Climate Dynamics*, vol. 16, no. 6, pp. 451–467.

26. A.C. Hirst, H.B. Gordon, and S.P. O'Farrell. (1996). Global warming in a coupled climate model including oceanic eddy-induced advection. *Geophysical Research Letters*, vol. 23, no. 23, pp. 3361–3364.

27. C. Gordon, C. Cooper, C.A. Senior et al. (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, vol. 16, no. 2–3, pp. 147–168.

28. V.D. Pope, M.L. Gallani, P.R. Rowntree, and R.A. Stratton. (2000). The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Climate Dynamics*, vol. 16, no. 2–3, pp. 123–146.

29. J. Elith, C.H. Graham, R.P. Anderson et al. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, vol. 29, pp. 129–151.

30. A.T. Peterson, M. Papes, and D.A. Kluza. (2003). Predicting the potential invasive distributions of four alien plant species in North America. *Weed Science*, vol. 51, no. 6, pp. 863–868.

31. A.H. Fielding and J.F. Bell. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, vol. 24, no. 1, pp. 38–49.

32. J. Elith and J.R. Leathwick. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 40, no. 1, pp. 677–697.

33. B. Schröder and O. Richter. (1999).

Are habitat models transferable in space and time? *Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz*, vol. 8, no. 4, pp. 195–205.

34. M. Marmion, M. Parviainen, M. Luoto, R.K. Heikkinen, and W. Thuiller. (2009). Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions*, vol. 15, no. 1, pp. 59–69.

35. D.W. Hosmer and S. Lemeshow. (2000). *Applied Logistic Regression*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.

36. J.S. Clark. (2001). Ecological forecasts: an emerging imperative. *Science*, vol. 293, no. 5530, pp. 657–660.

37. C. Perrings, K. Dehnen-Schmutz, J. Touza, and M. Williamson. (2005). How to manage biological invasions under globalization. *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 20, no. 5, pp. 212–215.

38. L. Makra, M. Juhász, R. Béczi, and E. Borsos. (2005). The history and impacts of airborne Ambrosia (Asteraceae) pollen in Hungary. *GRANA*, vol. 44, no. 1, pp. 57–64.

39. O. Broennimann, U.A. Treier, H. Müller-Schärer, W. Thuiller, A.T. Peterson, and A. Guisan. (2007). Evidence of climatic niche shift during biological invasion. *Ecology Letters*, vol. 10, no. 8, pp. 701–709.

40. S. Dullinger, I. Kleinbauer, J. Peterseil, M. Smolik, and F. Essl. (2009). Niche based distribution modelling of an invasive alien plant: effects of population status, propagule pressure and invasion history. *Biological Invasions*, vol. 11, no. 10, pp. 2401–2414.

41. F. Essl, S. Dullinger, and I. Kleinbauer. (2009). Changes in the spatio-temporal patterns and habitat preferences of *Ambrosia artemisiifolia* during its invasion of Austria. *Preslia*, vol. 81, no. 2, pp. 119–133.

42. G. Kazinczi, I. Béres, R. Novák, K. Bíró, and Z. Pathy. (2008). Common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.): a review with special regards to the results in Hungary. Taxonomy, origin and distribution, morphology, life cycle and reproduction strategy. *Herbologia*, vol. 9, pp. 55–91.

43. Á. Tóth, P.Z. Hoffmanné, and L. Szentey. (2004). Ambrosia situation in Hungary in 2003. Difficulties of pollen reduction in the air. In *Proceedings of the 10th Plant Protection Days*, Budapest, Hungary.

44. D. Pimentel, R. Zuniga, and D. Morrison. (2005). Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*, vol. 52, no. 3, pp. 273–288.

Сторчоус И.Н.

Институт защиты растений НААН, ул. Васильковская, 33, г. Киев, Украина, 03022, e-mail: igor_storchous@ukr.net

Изменение климата и его влияние на расширение ареала *Ambrosia artemisiifolia* в Европе

Цель. Анализ и обобщение результатов исследований проблемы глобального характера расширения ареала вида *Ambrosia artemisiifolia* L. в результате воздействия изменения климата. **Методы.** Системно-аналитический, абстрактно-логический, эмпирический. **Результаты.** По результатам исследований ученые предположили, что *A. artemisiifolia* сместится на северо-восток и расширит свой потенциальный ареал в Европе из-за климатических изменений. Установлено, что распространению *A. artemisiifolia* способствует потепление климата в Европе, которое приводит к

проявлению высокого инвазивного потенциала вида в широких диапазонах в пределах Европы. Используя ENM, ученые четко определили регионы, которые подпадают под угрозу распространения и воздействия негативных изменений. **Выводы.** Глобальное потепление, которое уже произошло, продолжает способствовать дальнейшему распространению и проявлению инвазивного потенциала *A. artemisiifolia* в Европе согласно результатам моделирования. Многосторонние исследования иностранных ученых влияния климатических изменений на распространение амброзии обосновали, что Украина принадлежит к странам, на территории которых будет распространяться этот злобный вид сорняка. Такие результаты исследований способствуют эффективности решений, от принятия которых зависит защита и сохранение урожая сельскохозяйственных культур, сохранения биоразнообразия страны, а также возможность учитывать эти результаты при восстановлении его влияния на здоровье населения. При таких условиях меры по мониторингу и управлению видом становятся чрезвычайно актуальными.

амброзия полыннистая, ареал, инвазивный вид, изменение климата, образование жизнеспособных семян

Storchous I.

Institute of Plant Protection of NAAS of Ukraine, 33, Vasylkivska str., Kyiv, Ukraine, 03022, e-mail: igor_storchous@ukr.net

Climat change and its impact on the expansion of the area *Ambrosia artemisiifolia* in Europe

Goal. Analysis and generalization of the results of research on the problem of a global nature regarding the expansion of the range of the species *Ambrosia artemisiifolia* L. as a result of the impact of climate change. **Methods.** System-analytical, abstract-logical, empirical. **Research results.** According to research, scientists have predicted that *A. artemisiifolia* will shift to the northeast and expand its potential range in Europe due to climate change. It has been established that the spread of *A. artemisiifolia* is facilitated by global warming in Europe, which leads to the manifestation of high invasive potential of the species in wide ranges within Europe. Using ENM, scientists have clearly identified areas that are at risk of spreading and undergoing negative changes. **Conclusions.** Global warming, which has already taken place, continues to contribute to the further spread and manifestation of the invasive potential of *A. artemisiifolia* in Europe, according to the simulation results. Multilateral studies by foreign scientists on the impact of climate change on the spread of ragweed have shown that Ukraine is one of the countries in which this vicious species of weed will spread. Such research contributes to the effectiveness of decisions that depend on the protection and preservation of crops, the preservation of the country's biodiversity, as well as the ability to take into account its impact on public health. Under such conditions, measures for monitoring and management of the species are extremely relevant.

ragweed, range, invasive species, climate change, production of viable seeds

Надійшла 26.11.2020 р.