

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри молекулярної біотехнології та біоінформатики
доцент Нипорко О. Ю.

Протокол № ____ засідання кафедри
від “ ____ ” _____ 2022 р.

**МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ *SCELIPHON CURVATUM* НА
ТЕРИТОРІЇ ЄВРОПИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ГІС**

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра
студента спеціальності 091 «Біологія»
ОП «Біологія (високі технології)»

Целікова Артема Павловича

Науковий керівник:
доцент кафедри молекулярної біотехнології та біоінформатики
к. б. н. Горобчишин Володимир Анатолійович

Оцінка захисту роботи

Київ – 2022 р.

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота бакалавра: сторінок 39, рисунків 10, джерел 37, сторінок додатків 9.

Целіков А.П. Моделювання поширення *Sceliphron curvatum* на території Європи із застосуванням технологій ГІС. – Випускна кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 091 Біологія ОП «Біологія (високі технології)».

У роботі проведено аналіз актуальних біокліматичних та інвазійних процесів на Землі, сучасні математичні та інформатичні методи аналізу та передбачення динаміки та наслідків цих процесів, розглянуто випадок інвазії азійського виду *Sceliphron curvatum* на території Європи. Для *S. curvatum* було створено модель поширення виду на території Європи, ґрунтуючись на восьми ключових біокліматичних показниках, та спроектовано на біокліматичні умови 2050 року за двома сценаріями розвитку клімату.

Отримані результати можуть бути використані для оцінки фундаментальної ніші *S. curvatum* на території Європи, планування польових експедицій, прогнозування поширення виду у майбутньому, розробки більш точних моделей поширення *S. curvatum*, оцінки ризиків поширення виду.

Ключові слова: інвазія; модель поширення видів; MaxEnt, ГІС, кліматичні зміни.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	4
1.1. Інвазії та біорізноманіття	5
1.2. Геоінформаційні системи та база даних GBIF	9
1.2.1. Визначення ГІС	10
1.2.2. QGIS як приклад open-source ПЗ	11
1.2.3. Відкрита електронна база даних GBIF	12
1.3. Клімат як ключовий екологічний фактор	14
1.4. Об'єкт дослідження <i>Sceliphron curvatum</i>	16
1.5. Розрахунок МПВ методом максимальної ентропії	18
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ	20
2.1. Вихідні дані спостережень <i>S. curvatum</i>	20
2.2. Вихідні дані біокліматичних показників	20
2.3. Розрахунок ENMevaluate та створення bias-файлу	21
2.4. Розрахунок МПВ методом максимальної ентропії	22
2.5. Оцінка моделі	23
2.6. Проектування моделі на геокліматичні умови майбутнього	23
РОЗДІЛ 3. Результати дослідження	24
РОЗДІЛ 4. Обговорення результатів дослідження	27
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29
ДОДАТКИ	33

ВСТУП

Біосфера Землі — динамічна система як на глобальному, так і на локальному рівнях. Це підтверджується сучасними уявленнями людства про геохронологічну історію нашої планети. Станом на сьогодні у світі спостерігаються тенденції до дестабілізації клімату та втрати біорізноманіття.

В таких умовах в середині ХХ ст. зароджується окремий напрям досліджень — екологія інвазій. Науковці цієї царини навчилися створювати моделі поширення видів (МПВ), які наглядно ілюструють паттерни поширення видів у просторі та дозволяють передбачати їх зміну в майбутньому, використовуючи здобутки у сфері сучасних геоінформаційних систем, кліматології, математичних методів моделювання, та розвиток інформаційних технологій.

Sceliphron curvatum — риюча оса з роду *Sceliphron* природним ареалом якої є Азія, яка, однак, була завезена та набула поширення на території Європи та Центральної Америки завдяки діяльності людини.

Метою нашої роботи було створення моделі поширення *S. curvatum* на території Європи ґрунтуючись на біокліматичних показниках і масивах даних про знахідки виду, а також передбачення можливих змін ареалу виду відповідно до спрогнозованих кліматичних змін в регіоні.

Відповідно, було поставлено наступні задачі:

1. Ознайомитися з сучасними уявленнями про інвазивні процеси, біокліматичні показники, їхній вплив на екосистеми та методи моделювання поширення видів.
2. Отримати масиви даних про поширення *S. curvatum* та біокліматичні показники на території Європи з відкритих баз даних.
3. Побудувати модель поширення *S. curvatum* на території Європи відповідно до біокліматичних показників.
4. Спрогнозувати зміну потенційних зон поширення виду відповідно до передбачених кліматичних змін станом на 2050 рік.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Інвазії та біорізноманіття

Біогеоценози та біосфера в цілому є динамічними формаціями, що зазнають постійних змін видового та кількісного складу організмів. Серед ключових екологічних факторів, що впливають на дані процеси виділяють: кліматичні показники, зміни хімічного складу середовища, фізичні процеси та біотичні взаємодії. Це підтверджено геологічними та палеонтологічними дослідженнями. Ми спостерігаємо ці процеси у реальному часі протягом людської історії: одні види витісняють інші, озера перетворюються на болота, степи на чагарники, ліси на пустелі, з відповідною зміною біоти.

З розвитком людської цивілізації та посиленням впливу антропогенного фактору біоценотичні трансформації вийшли на нові якісний та кількісний рівні. Окрім безпосереднього впливу на біогеоценози (вирубка/посадка лісу, створення агроценозів, створення каналів між морями, трансформація ландшафту, полювання), людство стало тим фактором розповсюдження популяцій організмів, який дозволив здолати до того неподоланні природні перешкоди: гірські хребти, тисячі кілометрів суші та океанів перестали бути є бар'єрами для видів, що мають харчову, господарську чи культурну цінність для людини, а також для видів, що тісно асоційовані з ними екологічно[1]. Багатьом відомі класичні приклади інтродукції людиною кроликів в Австралію, карпа *Syrprinus carpio* у прісних водоймах всіх материків окрім Антарктиди, розповсюдження агроценозних тандемів на кшталт «Пасльонові—колорадський жук». Окрім навмисної інтродукції людина заселяє біоценози видами-чужинцями і несвідомо: з баластними водами суден до Чорного моря з Далекого Сходу потрапили личинки молюска *Rapana venosa*, спори гриба *Clathrus archeri* з Тасманії опинилися у Карпатських лісах, колись необачно злиті у Середземне море залишки акваріумної *Caulerpa*

taxifolia перетворилася на екологічну загрозу природним екосистемам внаслідок масового розмноження.

1.1.1. З історії екології інвазій та сучасні погляди

Формальним початком розвитку інвазивної екології вважають вихід у світ книги Чарльза Елтона «Екологія інвазій тварин та рослин» [1]. Раніше екологи розглядали інвазії як аномалії. Елтон характеризував їх як симптоматику процесу, який може змінити біологічний ландшафт планети. «Ми спостерігаємо одну з великих історичних конвульсій світової фауни і флори», — писав він. Намагаючись перенести вивчення вторгнень за межі природних історичних рахунків, Елтон розробив узагальнення, які можна перевірити на основі різних дисциплін, включаючи біогеографію, епідеміологію та історію людства. Він також виявив широкомасштабні закономірності, серед яких: більша кількість інвазійних видів у помірних регіонах порівняно з тропічними, а також на островах порівняно з материковими районами еквівалентного розміру (обидва нещодавно підтвержені статистичним аналізом) [2]. Через півстоліття екологія інвазій вийшла далеко за рамки книги Елтона. Кілька тем, які зараз є вирішальними для нашого теперішнього розуміння, Елтон проігнорував або лише зачепив. Сюди входять: кількість інтродукцій або особин, необхідних популяції, щоб закріпитися; еволюційні наслідки інвазій; і взаємодія між чужорідними видами, які підвищують успіх один одного.

Ризики «втечі» ГМ-організмів додало новий аспект проблематики. Щоб спробувати передбачити інвазію, дослідники досліджують ознаки, які схиляють види до взаємодії з людьми та виживанню при транспортуванні. Екологія інвазій охоплює аналіз ризиків, економіку ресурсів, комп'ютерне моделювання та молекулярну генетику.

Показник цитування книги Елтона (червона лінія на Рис.1) різко зріс з початку 1990-х років після затримки у 30 років (ріст, який, до речі, можна порівняти з експоненційним ростом чисельності інвазивних видів) [2].

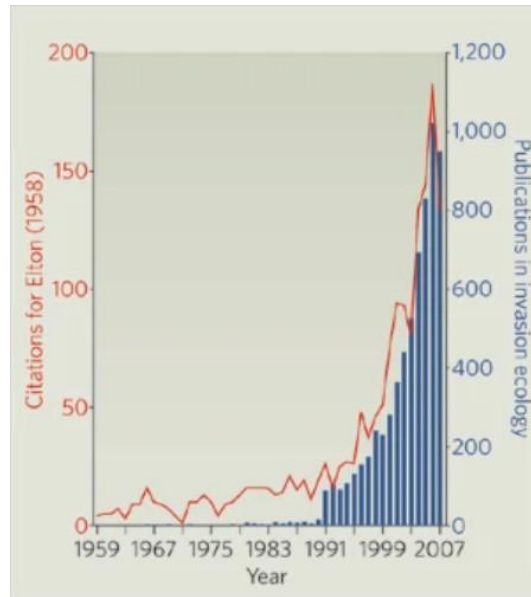


Рис. 1.1. Частота цитування роботи Чарльза Елтона з моменту публікації

Власне, такий стрімкий ріст кількості цитувань спричинений актуалізацією теми на фоні глобальних кліматичних змін та проблем, з яким стикнулось людство внаслідок агресивних інвазій.

1.1.2. Сучасні погляди та термінологія

Через такий негативний контекст ставлення до чужорідних видів навіть у науковому середовищі щодо їхнього впливу на екосистеми зазвичай носить негативний характер. Американські дослідники Гуіашу і Тиндаль у своїй оглядовій статті [3] визначають розповсюдженість презумпції винуватості або принципу «винний, поки не доведено невинуватість» щодо чужорідних видів в біоценозах, зазначаючи, що існує велика кількість видів, які не спричинили негативних наслідків у біоценозах після їх інтродукції або поширення. Вчені виділяють ряд неформальних логічних хиб, використання яких порушуює принцип неупередженості в науці. Наприклад, коли серед аргументів про негативний вплив інвазивних видів наводиться потенційне експоненційне збільшення кількості виду та колапс системи, не зазначається, що подібні ситуації виникають і з видами, які вважаються споконвічно місцевими.

Тематиці термінології, що використовується в даній сфері можна присвятити окремі роботи. Адвентивний, вид-прибулець, колонізуючий, криптогенетичний, інтродуцент, іммігрант, інвазивний тощо — все це означення, які використовують для підкреслення чужорідності певного виду тій чи іншій природній системі.

Дослідники Річардсон та ін. пропонують використовувати термін «інвазивний» без будь-якого висновку про їхній екологічний або економічний вплив [4]. Хоч такі терміни, як «шкідники» та «бур'яни», є відповідними ярликами для 50–80% загарбників, які мають шкідливий вплив. А близько 10% інвазивних рослин, які змінюють характер, стан, форму або природу екосистем на значних площах, доцільніше назвати «трансформаторами» [6]. Тому в даній роботі я використовую термін «інвазивний» з метою підкреслення чужорідності об'єкту дослідження на визначеній території, підкреслюючи антропологений фактор його поширення, без оціночних суджень про позитивність/негативність впливу об'єкта дослідження на екосистему, концентруючись описі динаміки його ареалу.

Інвазійна екологія накопичила вже достатньо даних, критеріїв та методик оцінки механізмів та наслідків інвазій для того, щоб класифікувати їх. На мою думку, найбільш повноцінну схему, яка пов'язує термінологію даного напрямку екології з етапами розвитку інвазії (Рис.1) запропонували Colauti et al., а саме: адвентивний — стадії I—V, прибулець — I—V, випадковий — II, колонізуючий — IVa, усталений — III—V, екзотичний — I—V, чужорідний — I—V, іммігрант — I—V, інтродуцент — I—V, інвазивний — IVa, IVb або V, натуралізований — III—V, неендемичний — I—V.

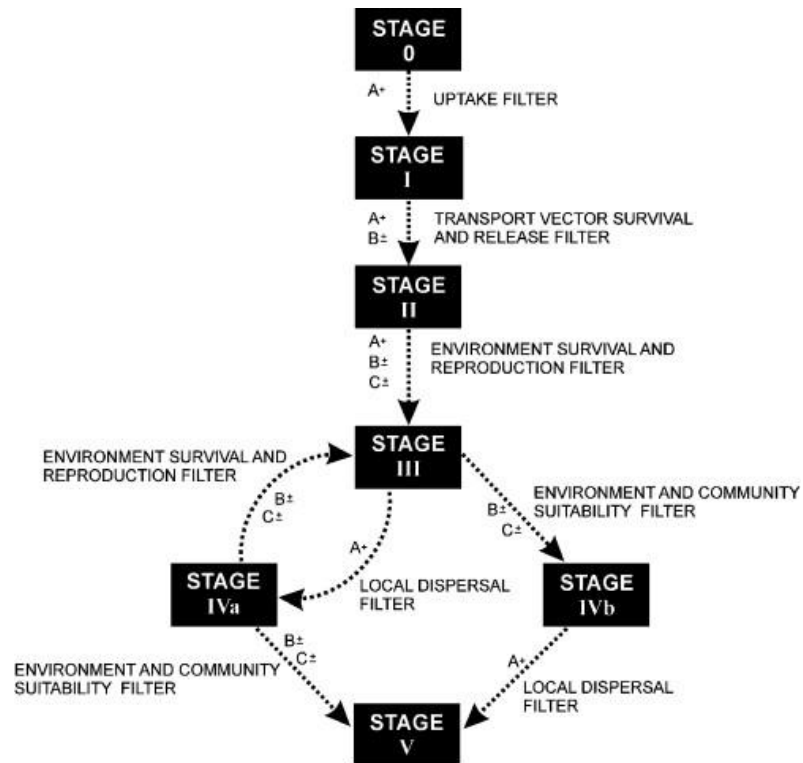


Рис. 1. Запропоновані структури для визначення операційних термінів у дослідженнях інвазій (Colautti et al., 2004) [5]

1.2. Геоінформаційні системи та база даних GBIF

З розвитком інформаційних технологій, залученням до збору даних осіб аматорів швидкість накопичення геоінформаційної інформації зросла на порядки. Виникає проблема зручного обліку, візуалізації та інтерпретації отриманих даних про розповсюдження видів та динаміку цих процесів.

На допомогу приходять геоінформаційні системи (ГІС) — сучасні технічні засоби об'єднання та аналізу різноманітної географічної інформації. Накопичення, редагування та обробка екологічної інформації в умовах сучасності неможливі без використання комп'ютерів та програмного забезпечення. За допомогою ГІС можна візуалізувати та оброблювати екологічні дані з урахуванням їх просторової прив'язки.

1.2.1. Визначення ГІС

Географічна інформаційна система (ГІС) — це тип бази даних, що містить географічні дані (тобто описи явищ, для яких є релевантним місце розташування), а також програмні засоби управління, аналізу та візуалізації цих даних. [6, 9]. У ширшому сенсі ГІС розглядають як системц, що також включає спільноту користувачів і допоміжний персонал, процедури та робочі процеси, сукупність знань про відповідні концепції та методи, інституційні організації.

Географічна інформаційна наука, академічна дисципліна, яка вивчає ці системи та їх основні географічні принципи, також може бути скорочено ГІС, але однозначна GISscience більш поширена [7].

Географічні інформаційні системи використовуються в багатьох сферах життя: від щоденного використання в навігаційних програмах у наших смартфонах до вузьких наукових, військових та фінансових задач [8]. З цієї причини ГІС та додатки для визначення місцезнаходження є основою послуг із підтримкою місцезнаходження, які покладаються на географічний аналіз та візуалізацію.

ГІС надає можливість зв'язувати раніше не пов'язану інформацію за допомогою використання розташування як "ключової змінної індексу". Розташування та екстенти, які знаходяться в просторі-часі Землі, можна записати за датою та часом виникнення разом із координатами x , y та z ; репрезентація, довгота (x), широта (y) і висота (z) [9]. Усі земні, просторово-часові посилання, місцеположення та протяжність мають бути пов'язаними один з одним і, в кінцевому підсумку, з «реальним» фізичним розташуванням або об'ємом. Ця ключова характеристика ГІС почала відкривати нові шляхи наукових досліджень і досліджень [10].

1.2.2. QGIS як приклад open-source ПЗ

QGIS – це географічна інформаційна система з відкритим вихідним кодом [11]. Проект зародився в травні 2002 року і був створений як проект на SourceForge в червні того ж року. Команда розробників першочергово працювала над тим, щоб зробити програмне забезпечення ГІС (яке традиційно дороге приватне програмне забезпечення) доступним кожному, хто має доступ до персонального комп'ютера [12]. Зараз QGIS працює на більшості платформ Unix, Windows і macOS. QGIS розроблено з використанням інструментарію Qt (<https://www.qt.io>) і C++. Це означає, що QGIS виглядає швидко і має приємний, простий у використанні графічний інтерфейс користувача (GUI).

Встановити дане ПЗ можна перейшовши за посиланням на офіційний сайт проекту: <https://www.qgis.org/en/site/>. Після встановлення ви потрапляєте в осовний інтерфейс програми, з переліком поточних проєктів, браузером файлової системи та меню шарів по лівий бік, налаштуванням стилю шарів по правий і панеллю інструментів у верхній частині вікна програми.

Серед типів файлів, які підтримує QGIS найбільш розповсюдженими є:

- shape-файли .shp — стандартний формат для векторного формату даних, що містить геометричну, атрибутивну та індексну інформацію про об'єкти
- .csv — файловий формат, в якому поля табличних даних відмежовуються комою
- SVG-формат — мова розмітки для опису та масштабування двомірної векторної графіки
- KML — мова розмітки та опису просторових даних для роботи з Google Earth
- растровий та векторні формати GRASS
- просторові таблиці PostgreSQL
- всі формати вектора та растра, що підтримуються GDAL(Geospatial Data Abstraction Library)

Окрім стандартного інструментарію користувача QGIS програма містить бібліотеку з понад 400 розширень (плагінів, модулів). Завдяки ним значно полегшується інтеграція з базами даних (наприклад, з GBIF) та власне візуалізація та аналіз даних [10].

Вся поточна інформація, яку ви використовуєте в роботі, включно з інформацією про налаштування шарів зберігається у форматі проєктів. Проєкти ви можете зберігати, редагувати та експортувати.

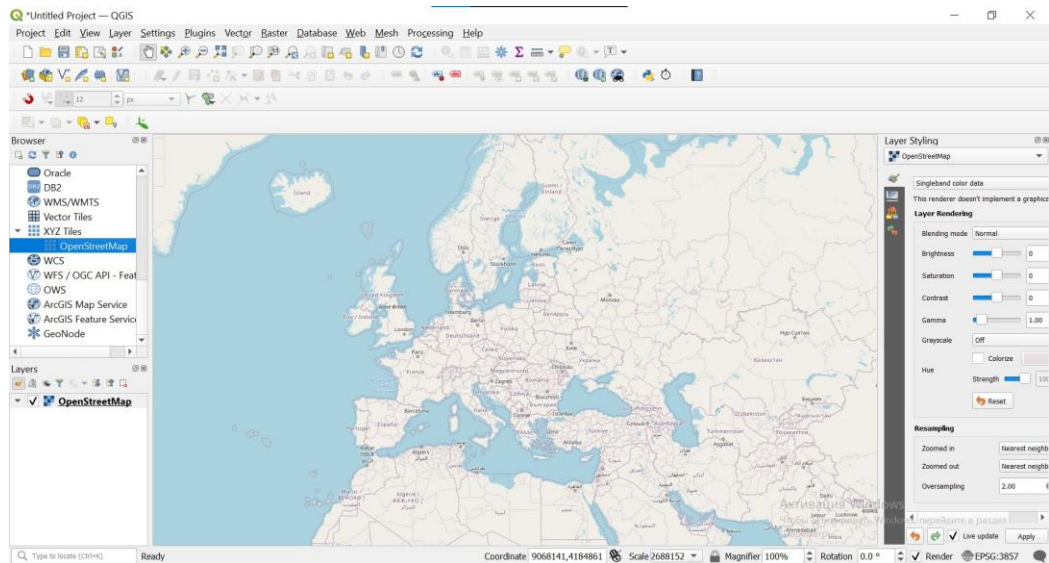


Рис. 1.2. Робоче вікно ПЗ QGIS

1.2.3. Відкрита електронна база даних GBIF

GBIF (Global Biodiversity Information Facility) — це міжнародна мережа та база даних, яка фінансується урядами світу та спрямована на надання будь-кому та будь-де відкритого доступу до даних про всі види життя на Землі[11].

Координована через свій Секретаріат у Копенгагені мережа країн-учасниць GBIF, яка працює через вузли-учасники, надає установам, що зберігають дані в усьому світі, загальні стандарти та інструменти з відкритим вихідним кодом, які дозволяють їм обмінюватися інформацією про те, де і коли було зафіксовано той чи інший вид. База даних поповнюється з багатьох джерел: від музейних зразків, зібраних у 18-му та 19-му століттях, до

фотографій зі смартфонів із географічними тегами, якими поділилися натуралісти-аматори в останні дні та тижні [12].

Мережа GBIF об'єднує всі ці джерела за допомогою стандартів даних, таких як Darwin Core, який є основою для основної частини індексу GBIF.org, що містить сотні мільйонів записів про знахідки видів. Видавці надають відкритий доступ до своїх наборів даних за допомогою машиночитаних ліцензій Creative Commons, що дозволяє вченим, дослідникам та іншим застосовувати дані в сотнях рецензованих публікацій і стратегічних документів щороку [11]. Багато з цих аналізів, які охоплюють теми від впливу зміни клімату та поширення інвазивних видів до пріоритетів збереження природозавповідних територій, продовольчої безпеки та здоров'я людей, були б неможливими без інформації та інструментів GBIF.

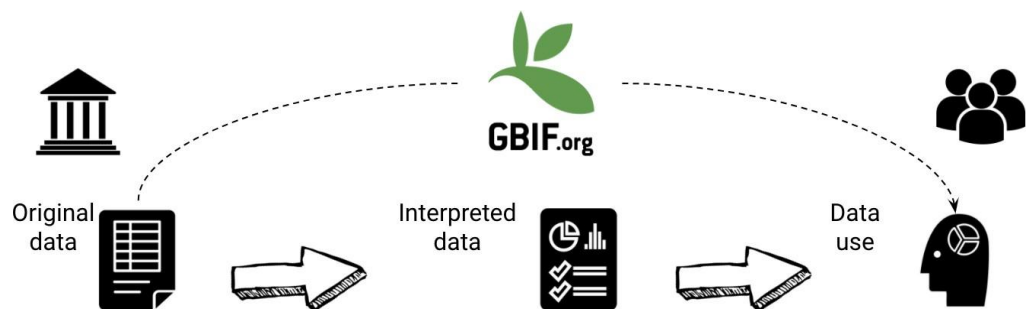


Рис. 1.3. Потік даних в GBIF [11]

Після інтеграції у GBIF баз даних проекту Каліфорнійської академії наук iNaturalist [13], натуралісти-аматори зі смартфонами та фотокамерами стали потужним джерелом інформації про біорізноманіття. У 2021 році di Sessa et al. опублікували статтю під назвою «Спостерігаючи за спостерігачами: Як учасники вносять дані до iNaturalist та наслідки для їх застосування у вивченні біорізноманіття» [12], в якій звернули увагу на особливості поведінки натуралістів-аматорів, які потрібно враховувати при дизайні власних досліджень. Зокрема, йдеться про тяжіння спостерігачів до зон населених пунктів та популярних місць відпочинку на природі, більша активність

спостережень у вихідні дні та в теплий період пори року, і один з найважливіших моментів — спостерігач/-ка майже ніколи не повертається на місце знахідки для повторної детекції виду, який колись вже був ним/нею в цьому місці зафіксований.

1.3. Клімат як ключовий екологічний фактор

Ще у 1858 р. видатний еколог Гумбольдт визначав клімат одним з ключових екологічних факторів [14]. Це комплексне поняття, що об'єднує в собі тепловий та водний баланси на певній ділянці поверхні Землі та приземних шарах атмосфери та характер зміни цих балансів з часом.

Хорологічний розподіл флори та фауни визначається кліматом. Водночас, так само як і екосистеми, клімат є динамічним і дуже багатоконпонентним. Геохронологічна історія Землі вказує нам значні коливання середньорічної температури як атмосфери в цілому (льодовикові періоди та періоди потепління), так і окремих ділянок планети.

Розподіл і чисельність популяції є результатом її темпів зростання, репродуктивної продуктивності, виживання до зрілості, смертності. Несприятливі зміни в будь-якій з цих складових через кліматичні та інші фактори призведуть до змін у поширенні та чисельності, в результаті чого вид більше не зможе підтримувати популяцію в районах, які постраждали. Сприятливі зміни дозволяють виду збільшити свою популяцію або колонізувати раніше непридатні території. Саме тому при аналізі та прогнозуванні поширення тих чи інших видів в першу чергу використовують прив'язку саме до кліматичного фактору [15].

Спеціалісти з області кліматології підтверджують, що ми переживаємо період глобального потепління, дестабілізації клімату та локальних флуктуацій кліматичних умов на нашій планеті [16]. Якись регіони від цього цього виграють, а якись зазнаватимуть втрат у аспектах стабільності екосистем та господарської діяльності. Можуть мати місце каскадні деструктивні процеси

всередині біосистем. Наприклад, якщо один з видів не встигає відреагувати на зміну клімату і зникає з системи, і це спричинює колапс всієї системи.

Завдяки зусиллям метеорологів та кліматологів у своєму розпорядженні ми маємо масиви даних про історичні кліматичні показники у період з 1970 по 2000 роки у зручних форматах для роботи з ним у ПЗ ГІС. Серед проєктів, які надають відкритий доступ до таких даних варто виділити WorldClim [17] та CliMond [18]. Крім того, на сайтах відповідних проєктів доступні відповідні дані про прогнозовані кліматичні показники, в залежності від різних сценаріїв.

Для екологічного моделювання доцільніше використовувати не первинні кліматичні показники, а спеціальні біокліматичні змінні, виводяться з місячних значень температури та кількості опадів, щоб отримати більш біологічно значущі змінні. Вони часто використовуються в моделюванні поширення видів і пов'язаних з ними техніках екологічного моделювання. Біокліматичні змінні представляють річні тенденції (наприклад, середня річна температура, річні опади), сезонність (наприклад, річний діапазон температури та опадів) та екстремальні або обмежуючі фактори навколишнього середовища (наприклад, температура найхолоднішого та найтеплішого місяця та опади вологих та сухі квартали).

Вони кодуються наступним чином (прим. — напівжирним шрифтом виділено змінні, що використовуються в нашій моделі):

BIO1 = середня річна температура

BIO2 = середньодобовий діапазон (середнє значення за місяць (максимальна температура - мінімальна температура)

BIO3 = ізотермічність (BIO2/BIO7) ($\times 100$)

BIO4 = температурна сезонність (стандартне відхилення $\times 100$)

BIO5 = максимальна температура найтеплішого місяця

BIO6 = мінімальна температура найхолоднішого місяця

BIO7 = річний діапазон температур (BIO5-BIO6)

BIO8 = середня температура найбільш вологого кварталу

BIO9 = середня температура найбільш сухого кварталу

ВІО10 = середня температура найтеплішого кварталу

ВІО11 = середня температура найхолоднішого кварталу

ВІО12 = річна кількість опадів

ВІО13 = опади найбільш вологого місяця

ВІО14 = опади найсухішого місяця

ВІО15 = сезонність опадів (коефіцієнт варіації)

ВІО16 = опади найбільш вологого кварталу

ВІО17 = опади найбільш сухого кварталу

ВІО18 = опади найтеплішого кварталу

ВІО19 = опади найхолоднішого кварталу

1.4. Об'єкт дослідження *Sceliphron curvatum*

Родина Sphecidae налічує 787 видів одиноких стебельчатих ос, 35 з яких належать до роду риючих ос *Sceliphron* [19]. В Європі присутні 8 видів цього роду [20]. Серед них окрему цікавість викликає пелопей вигнутий *Sceliphron curvatum* (F. Smith, 1870) — інвазивний вид з Азії, через його швидку експансію на території Європи з моменту першого зареєстрованого випадку інтродукції у 1984 в Австрії [21].

S. curvatum має від 15 до 25 мм тіло у довжину, з жовтими, чорними та червоними елементами забарвлення [21]. Дорослі самиці цього виду будують гнізда з вологої землі та глини, які складаються з кількох комірок характерної овальної форми, через що в народі їх називають «оси-гончарі». Форма гнізд та комірок є специфічними для виду [22]. В кожній з комірок знаходиться личинка та паралізовані павуки, якими ця личинка харчується [23]. Варто зазначити, що імаго харчуються виключно нектаром рослин, а впольована та паралізована здобич дістається личинкам. Власне, важливість аналізу впливу цього виду на екосистеми, зокрема, агроценози, спричинена якраз характером здобичі *S. curvatum*.

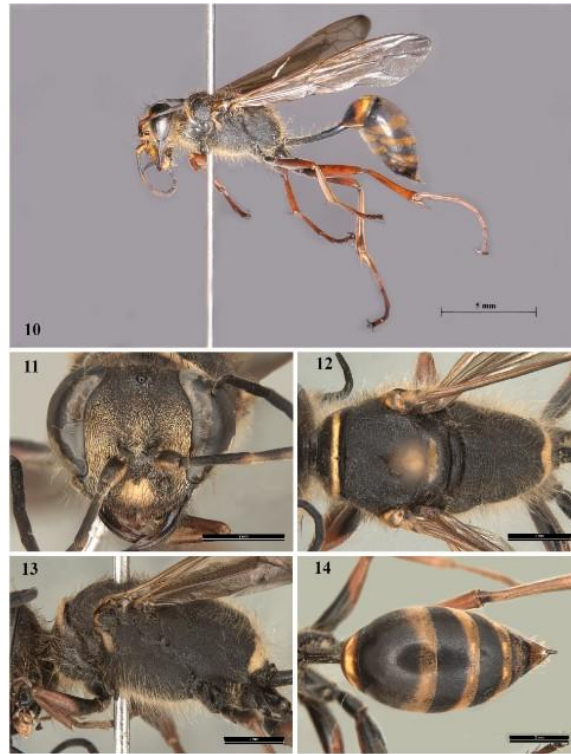


Рис. 1.4. *Sceliphron curvatum* (F. Smith), ♀, (Anagha, S.;Kumar, P. Girish;Binoy, C.;Mazumdar, P. C.;Sureshan, P. M, 2021) [21].

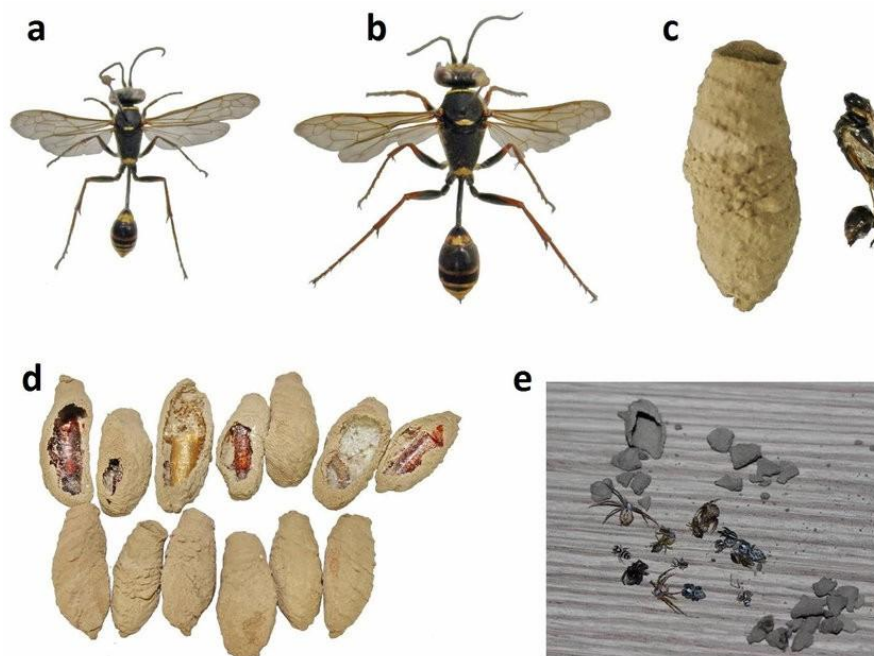


Рис. 1.5. (a) Самец *S. curvatum*, (b) Самка *S. curvatum*, (c) Мертва лялечка та її гніздо, (d) Грязьові гнізда *S. curvatum*, (e) Павуки з гнізд *S. curvatum*. (Gülmez, Yaşar, Can, Piyas, 2015) [22].

Вид належить до синантропних, оскільки в зоні населених пунктів для нього комфортні умови для побудови гнізда та полювання [24]. Відомі знахідки гнізд на шторах, книжкових стопках, стінах сараїв та будинків тощо. Для наступних поколінь характерне повернення для розмноження у місце народження.

Окрім Азії та Європи вид був зареєстрований також в Центральній Америці. Цілісний аналіз [25] поширення виду демонструє нам впевнену ескпансію *S. curvatum* в різних регіонах світу. Однак, досі не було представлено досліджень, предметом яких була б оцінка потенційно придатних місць проживання та факторів в Європі, які визначають межі зони цих місць. Так само недостатня кількість досліджень присвячених оцінці ролі пелопея вигнутого навіть в нативних для нього ареалах на території Азії.

1.5. Розрахунок МПВ методом максимальної ентропії

Великої популярності та визнання в екології здобули моделі поширення видів (далі — МПВ) англ. — Species distribution models (SDMs) [27]. Моделі поширення видів — це числові інструменти, які поєднують спостереження за наявністю або чисельністю видів з оцінками навколишнього середовища. Вони використовуються для отримання екологічних та еволюційних уявлень і для прогнозування розподілу по ландшафтах, іноді вимагаючи екстраполяції в просторі та часі. МПВ зараз широко використовуються в наземних, прісноводних і морських сферах досліджень. Відмінності в методах між дисциплінами відображають відмінності як у рухливості видів, так і в усталених традиціях використання тих чи інших методів [28]. Реалістичність і надійність моделі залежить від вибору відповідних факторів прогнозів та методу моделювання, врахування масштабу, й того, як обробляється взаємодія між екологічними та географічними факторами. Також важливу роль відіграє ступінь екстраполяції. Сучасні зв'язки між практикою МПВ та екологічною теорією часто слабкі, що заважає прогресу в цій царині [29].

Серед різних видів МПВ метод максимальної ентропії (Maxent) став одним із найпопулярніших підходів. Це є наслідком його простоти та доступності безкоштовних програмних пакетів для проведення моделювання. Цей метод легко застосовувати до даних типу «присутність/відсутність» [30]. Метод машинного навчання використовує принцип максимальної ентропії, апроксимуючи невідомий розподіл ймовірностей виду на основі даних про присутність [30].

Завантажити програмне забезпечення Maxent можна на сайті Американського Музею Історії Природи: https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Варто зазначити, що для запуску цього ПЗ на вашому пристрої має бути встановлена віртуальна машина Java для виконання байт-коду Java. Як і QGIS, Maxent є ресурсом з відкритим доступом [31].

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

2.1. Вихідні дані спостережень *S. curvatum*

Для побудови моделі розповсюдження *S. curvatum* я використав набір даних про розповсюдження виду з Глобальної інформаційної системи з біорізноманіття (GBIF) [Додаток 1].

На етапі формування масиву даних про поширення застосував наступні фільтри: наукова назва — *Sceliphron curvatum*; основа знахідки — спостереження людиною, знахідка; адміністративний поділ — країни Європи; рік — з 1985 по 2022. Таким чином я відфільтрував 109 записів нерелевантних до теми дослідження (спостереження поза межами Європи, зразки з колекцій та музеїв, записи, що не містять координат).

В результаті отримав масив даних з 918 записів [32], який я завантажив на свій ПК у форматі .csv [Додаток 2].

На наступному етапі для подальшої роботи за використання ПЗ Microsoft Excel були видалені всі метадані записів за виключенням species, longitude та latitude і файл було збережено з назвою oss.csv, а точки візуалізовано в якості шару у QGIS [Додатки 3, 4].

2.2. Вихідні дані біокліматичних показників

Біокліматичні показники історичних кліматичних даних з 1970 по 2000 були отримані з сайту www.worldclim.org у форматі .tif [33]. Для масштабів нашого дослідження найбільш оптимальним розділенням чарунок було обрано 5' (9,25 км). Для передбачення зміни кліматичної ніші станом на 2050 рік з сервісу www.climond.org було завантажено два пакети передбачених біокліматичних показників для A1B та A2 сценаріїв змін клімату [34].

З урахуванням екології *S. curvatum* та за аналогією з іншими подібними дослідженнями серед 19 запропонованих біокліматичних показників були обрані 8, а саме: bio1 — середня річна температура, bio5 — максимальна температура найтеплішого місяця, bio6 — мінімальна температура найхолоднішого місяця, bio7 — річний температурний діапазон, bio8 — середня температура найвологішого кварталу, bio12 — кількість річних опадів, bio16 — кількість опадів найвологішого кварталу, bio17 — кількість опадів найсухішого кварталу. Завдяки цьому ми уникаємо потенційної мультиколінеарності у подальших розрахунках та можемо більш детально проаналізувати вплив кожного з факторів.

Після цього обрані файли з відповідними біокліматичними показниками були відкриті за допомогою ПЗ QGIS в якості шарів [Додаток 3]. Завдяки інструменту Translate (Convert format) для растрових шарів файли було переведено з формату .tif у формат .asc, щоб в подальшому мати можливість працювати з файлами у середовищі R та програмі Maxent.

На фінал, за допомогою інструмента Clip Raster by Extent... для растрових шарів, я відсік дані про біокліматичні показники тих зон поверхні Землі, які мене не цікавлять, залишивши лише територію Європи.

2.3. Розрахунок ENMevaluate та створення bias-файлу

Перед безпосереднім розрахунком моделі поширення виду необхідно визначити оптимальні параметри для проведення моделювання. Для цього я використав методітку оцінки моделі екологічної ніші ENMevaluate (Evaluation of the ecological niche model) [35].

Для проведення оцінки за допомогою мови програмування R попередньо на ПК необхідно встановити середовище роботи RStudio [36]. Далі, використовуючи скрипт [Додаток 5] люб'язно опублікованим Джошем Бантою на сайті своєї лабораторії [37] та вхідні дані з файлів oss.csv та bio1.asc...bio17.asc, ми отримаємо файл enmaval_results.csv [Додаток 6], в

якому шукаємо нульове значення ΔAIC_c . — інформаційний критерій Акаїке. Відповідно до нульового значення цього критерію визначаємо оптимальні налаштування для побудови моделі в ПЗ Maxent: в нашому випадку це L — linear features, Q — quadratic features, H — hinge features, regularization multiplier = 1.

Також під час виконання команд даного скрипту формується biasfile.asc, який ми також використаємо в подальшому моделюванні.

2.4. Розрахунок МПВ методом максимальної ентропії

На даному етапі переходимо до безпосереднього створення МПВ методом максимальної ентропії за використання ПЗ Maxent, що розповсюджуються на правах вільного доступу [31].

Попередньо встановлюємо на ПК віртуальну машину Java. Після цього встановлюємо ПЗ Maxent з сайту https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/ та запускаємо її.

У Додатку 7 продемонстровано робоче вікно ПЗ Maxent. У поле Samples завантажуюємо файл з нашими геоточками occ.csv, в поле Environmental layers завантажуюємо наші шари bio1.asc...bio17.asc. В меню Settings встановлюємо налаштування так, як показано у Додатках 8. Завантажуємо biasfile.asc, отриманий на попередньому етапі. Встановлюємо параметри моделювання по `linear features`, `quadratic features` та `hinge features`, обираємо папку завантаження результатів моделювання у пункті Output directory. Запускаємо моделювання натиснувши кнопку Run, і після кількох хвилин моделювання відкриваємо файли з результатами моделювання (див. Розділ 3 Результати дослідження).

2.5. Оцінка моделі

Серед результатів моделювання ПЗ Maxent також знаходимо результати оцінки відповідності (див. Розділ 3 Результати дослідження). Існує два загальні типи показників оцінки — ті, які в основному покладаються на ROC AUC (без порогових значень) і ті, які покладаються на визначення граничного значення (він же поріг).

У нашому випадку використовуємо оцінку лише за AUC.

2.6. Проектування моделі на геокліматичні умови майбутнього

Після проведення моделювання отримана модель була спроектована на шари біокліматичних показників за використання все того ж ПЗ Maxent. Для цього була створена папка з відповідними шарами «шаріhot1» та «шаріhot2» для сценаріїв кліматичних змін A1B та A2 відповідно. Шлях до цієї папки в ПЗ Maxent було встановлено в полі ‘Projections layers directory/file’.

РОЗДІЛ 3. Результати дослідження

В процесі створення МПВ для інвазивного виду *S. curvatum* на території Європи відповідно до ключових біокліматичних показників за допомогою методу максимальної ентропії у ПЗ Maxent я отримав модель, яка візуально відображається наступним чином:

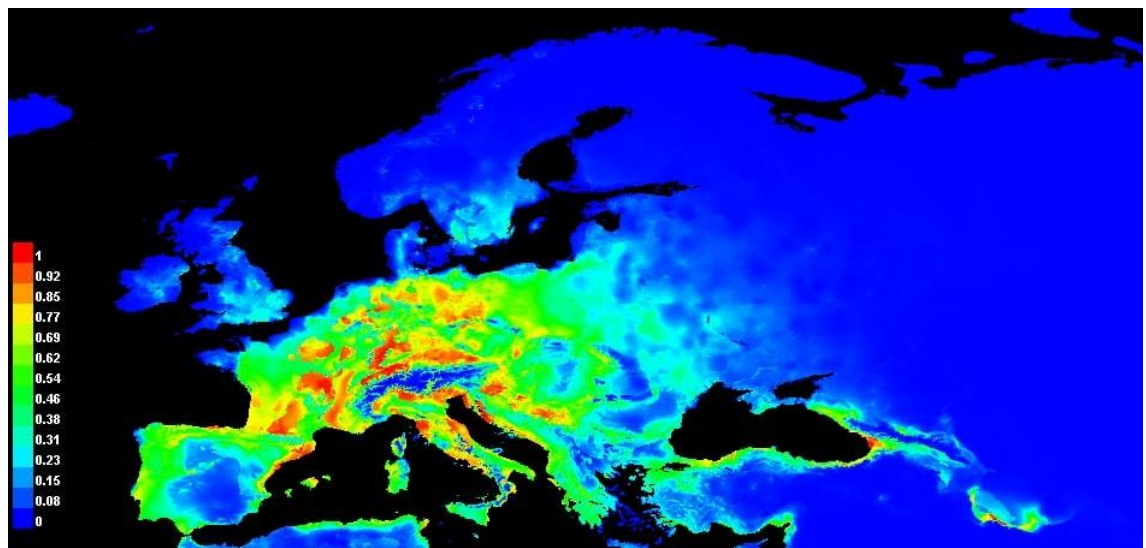


Рис. 3.1. Модель поширення *S. curvatum* відповідно до ключових біокліматичних показників

У таблиці 3.1. наведено оцінки відносного внеску змінних середовища в модель. Відповідно до якого основним біокліматичним фактором, що впливає на поширення виду є ВІО6 — мінімальна температура найхолоднішого місяця.

Variable	Percent contribution	Permutation importance
bio6	40.2	14.5
bio7	26.6	44.4
bio1	11.3	10.5
bio17	9	9
bio8	6.9	9.2
bio5	3.9	9.3
bio16	2.1	3.1
bio12	0	0

Табл. 3.1. Відносний внесок біокліматичних факторів на модель поширення *S. curvatum* на території Європи

У Додатку 9 проілюстровано графіки відгуку моделі поширення *S. curvatum* на кожний з факторів окремо.

Відповідно до оцінки $AUC = 0.906$, вважаємо нашу модель як таку, до якої можна ставитися з максимальним рівнем довіри.

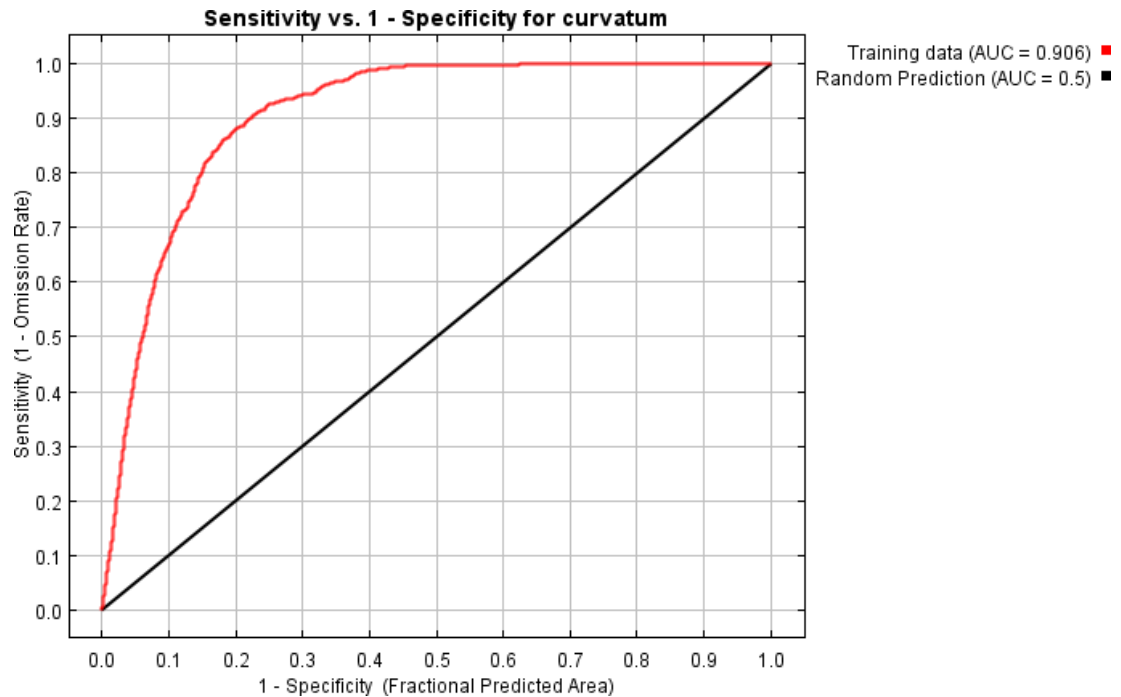


Рис. 3.2. Крива відгуку ROC AUC (без порогових значень), що оцінює нашу модель як таку, до якої можна ставитися з максимальним рівнем довіри.

Результати проєкції моделі на спрогнозовані біокліматичні показники станом на 2050 рік для A1B та A2 сценаріїв:

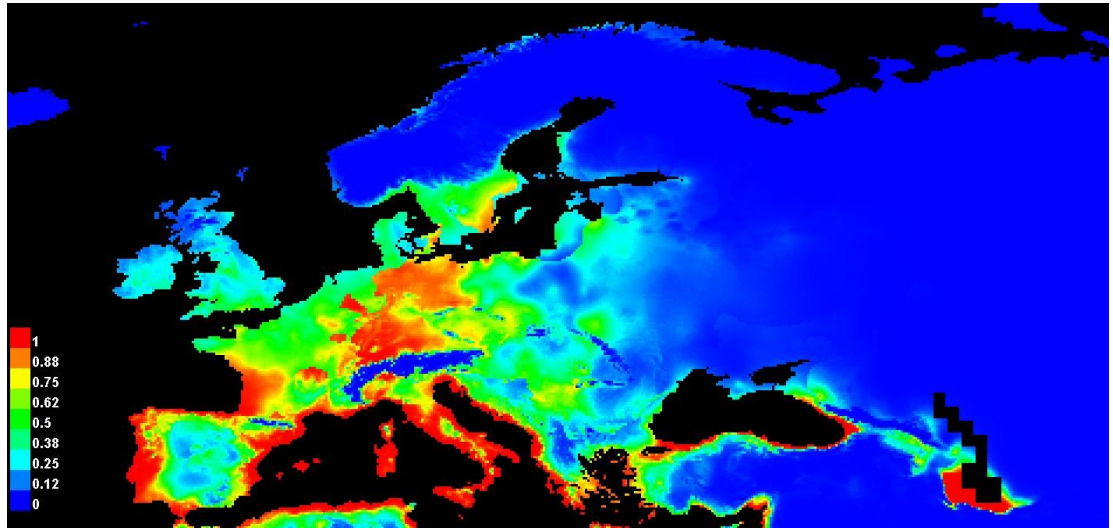


Рис. 3.3. Візуальне зображення проєкції моделі поширення *S. curvatum* на спрогнозовані кліматичні умови 2050 за A1B сценарієм

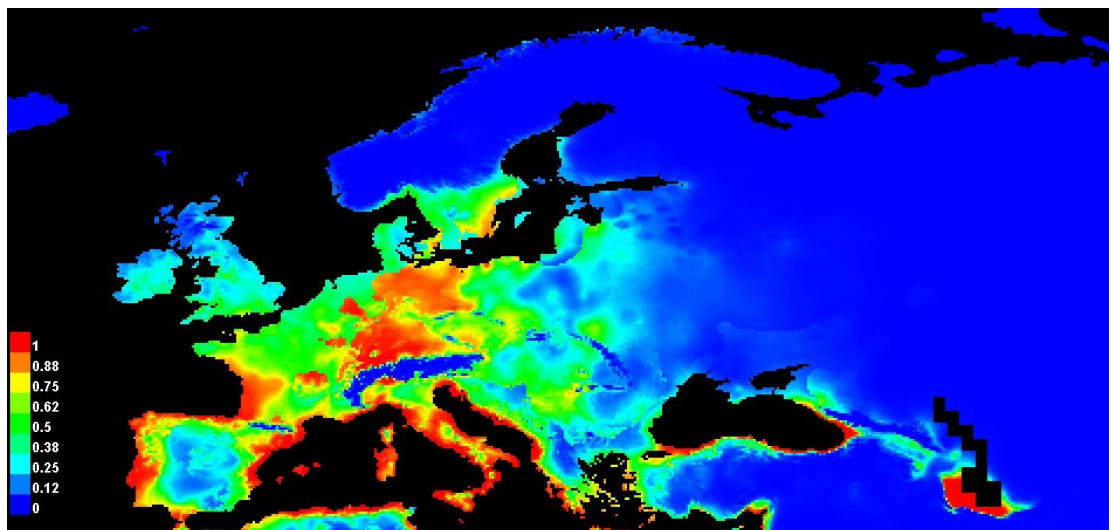


Рис. 3.4. Візуальне зображення проєкції моделі поширення *S. curvatum* на спрогнозовані кліматичні умови 2050 за A2 сценарієм

РОЗДІЛ 4. Обговорення результатів дослідження

В результаті проведення дослідження нам вдалося вперше отримати модель поширення *S. curvatum* на території Європи використовуючи метод максимальної ентропії з високим ступенем відповідності (AUC = 0.906). Чи можемо ми сказати, що ця модель відповідає дійсності? Візуальний аналіз демонструє, що модель дійсно відповідає актуальним відомим точкам поширення *S. curvatum* за даними GBIF. Слід підкреслити, що ми використовували лише 8 ключових, на нашу думку, біокліматичних показників. Точність моделі можна збільшити використовуючи, наприклад, фактори синантропності виду, складу ґрунтів, забруднення, взаємодії всередині системи тощо.

Проте, наявна модель вже демонструє нам зони, де ймовірність знаходження виду мінімальна/максимальна відповідно до фундаментального кліматичного фактору — клімату. Отримані результати можуть бути використані для оцінки фундаментальної ніші *S. curvatum* на території Європи, планування польових експедицій, прогнозування поширення виду у майбутньому, розробки більш точних моделей поширення *S. curvatum*, оцінки ризиків поширення виду.

Судячи по даних GBIF *S. curvatum* можна припустити, що станом на 2022 рік вид вже досягнув меж свого потенційного ареалу на території Європи. Однак, це припущення потребує більш глибокого аналізу.

ВИСНОВКИ

В умовах глобальних геокліматичних змін та інвазивних процесів у біогеоценозах геоінформаційні системи стали потужним інструментом аналізу, візуалізації та прогнозування подальших локальних та глобальних змін екосистем.

В процесі дослідження було отримано модель поширення інвазивного *Sceliphron curvatum* на території Європи ґрунтуючись на інформації про поширення виду з бази даних GBIF та 8 ключових історичних біокліматичних показниках, отриманих з бази даних WorldClim, використовуючи метод максимальної ентропії.

Під час оцінки точності моделі було отримано значення AUC = 0.906. Що говорить про високий ступінь довіри до моделі.

Ґрунтуючись на передбачених показниках клімату СМІР6 спрогнозовано ймовірні зміни потенційного ареалу *S. curvatum* на території Європи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Elton, Charles S. 1958. *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. N.p.: Springer US.
2. Ricciardi, A., MacIsaac, H. The book that began invasion ecology. *Nature* 452, 34 (2008). <https://doi.org/10.1038/452034a>
3. Guiaşu, R. C., & Tindale, C. W. (2018). Logical fallacies and invasion biology. *Biology & Philosophy*, 33(5).
4. Richardson, D.M., Pyšek, P., Rejmánek, M., Barbour, M.G., Panetta, F.D. and West, C.J. (2000), Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distributions*, 6: 93-107.
5. Colautti, R. I., & MacIsaac, H. J. (2004). A neutral terminology to define ‘invasive’ species. *Diversity and Distributions*, 10(2), 135–141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2004.00061.x>
6. Некрасова О.Д., Титар В.М., Куйбіда В.В. (2019). ГІС-моделювання поширення вразливих до змін клімату земноводних та плазунів України. — НАН України, Інститут зоології ім. І.І. Шмальгаузена : Київ, 2019. – 204 с. ISBN 978-966-02-8956-7
7. Gold, C.M. (2006), What is GIS and What is Not?. *Transactions in GIS*, 10: 505-519. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2006.01009.x>
8. Leempoel, K., Duruz, S., Rochat, E., Widmer, I., Orozco-terWengel, P., & Joost, S. (2017). Simple Rules for an Efficient Use of Geographic Information Systems in Molecular Ecology. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5.
9. Мокін, Крижановський (2014). Навчальний посібник Геоінформаційні системи в екології. Вінницький національний технічний університет.
10. Steiniger S., Weibel R. (2009). GIS software — a description in 1000 words.
11. GBIF. (n.d.). Retrieved May 25, 2022, from https://web.archive.org/web/20201209155653mp_/https://www.gbif.org/

12. di Cecco, G. J., Barve, V., Belitz, M. W., Stucky, B. J., Guralnick, R. P., & Hurlbert, A. H. (2021). Observing the Observers: How Participants Contribute Data to iNaturalist and Implications for Biodiversity Science. *BioScience*, 71(11), 1179–1188. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab093>
13. *iNaturalist*. iNaturalist. (n.d.). Retrieved June 25, 2022, from <https://www.inaturalist.org/>
14. Humboldt, A. von, Varnhagen von Ense, K. A., Kapp, F., & Assing, L. (1860). *Letters of Alexander von Humboldt written between the years 1827 and 1858 to Varnhagen von Ense together with extracts from Varnhagen's diaries, and letters of Varnhagen and others to Humboldt* ([3rd ed.]). Trübner. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/78470>
15. Milanesi, P., della Rocca, F., & Robinson, R. A. (2020). Integrating dynamic environmental predictors and species occurrences: Toward true dynamic species distribution models. *Ecology and Evolution*, 10(2), 1087–1092. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ece3.5938>
16. King, A.D., Sniderman, J.M.K., Dittus, A.J. et al. Studying climate stabilization at Paris Agreement levels. *Nat. Clim. Chang.* 11, 1010–1013 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01225-0>
17. *WorldClim*. (n.d.). Retrieved June 25, 2022, from <https://www.worldclim.org/data/index.html>
18. *Global climatologies for Bioclimatic modelling*. CliMond. (n.d.). Retrieved June 25, 2022, from <https://www.climond.org/Default.aspx>
19. *Integrated Taxonomic Information System - Report*. ITIS. (n.d.). Retrieved June 25, 2022, from https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=768289#null
20. Казенас В.Л. 2001. Фауна и биология роющих ос (Hymenoptera, Sphecidae) Казахстана и Средней Азии. Алматы: КазгосИНТИ. 334 с.

21. Van der Vecht J. Die orientalische Mauerwespe *Sceliphron curvatum* (Smith) in der Steiermark, Österreich (Hymenoptera: Sphecidae) // Entomofauna. 1984. Bd. 5. H. 17. S. 213–219
22. Anagha, S., Kumar, P. Girish, Binoy, C., Mazumdar, P. C., Sureshan, P. M. (2021): A review of the mud-dauber wasps of genus *Sceliphron* Klug (Hymenoptera Sphecidae) from India. *Zootaxa* 4969 (1): 61-85, DOI: <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4969.1.3>
23. Gülmez, Yaşar & Can, Ilyas. (2015). First record of *Sceliphron* (*Hensenia*) *curvatum* (Hymenoptera: Sphecidae) from Turkey with notes on its morphology and biology. *North-Western Journal of Zoology*. 11. 174-177.
24. Тимків І., Назарук К., Шидловський І., Царик Й. Експансія пелопея вигнутого *Sceliphron curvatum* (F. Smith, 1870) у центральній та східній Європі // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. - 2015. - 70. - С. 181–187.
25. Bogusch, P., Liska, P., Lukas, J., & Dudich, A. (2005). *Spreading and summary of the knowledge of the invasive sphecid wasp Sceliphron curvatum (SMITH 1870) in the Czech Republic and Slovakia (Hymenoptera: 7.*
26. Skytman, I., Nazaruk, K., Shydlovskyy, I., & Josyf, T. (2015). Експансія пелопея вигнутого *Sceliphron curvatum* (F. Smith, 1870) у Центральній та Східній Європі (EXPANSION OF MUD DAUBER WASP SCELIPHON CURVATUM (F. SMITH, 1870) IN CENTRAL AND EASTERN EUROPE). *Visnyk of the Lviv University. Series Biology*, 70, 181–187.
27. Steiniger, Hay (2009). Free and open-source geographic information tools for landscape ecology. *Ecological Informatics*, 4, 183-195.
28. Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40(1), 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>

29. Rapacciuolo, G., & Blois, J. L. (2019). Understanding ecological change across large spatial, temporal and taxonomic scales: integrating data and methods in light of theory. *Ecography*, 42(7), 1247–1266. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ecog.04616>
30. E. T. Jaynes, "On the rationale of maximum-entropy methods," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, no. 9, pp. 939-952, Sept. 1982, doi: 10.1109/PROC.1982.12425.
31. Steven J. Phillips, Miroslav Dudík, Robert E. Schapire. [Internet] Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Available from url: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/.
32. GBIF.org (22 June 2022) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.fv7gkz>
33. Fick, S.E. and R.J. Hijmans, 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.
34. Kriticos, D.J., Webber, B.L., Leriche, A., Ota, N., Macadam, I., Bathols, J. & Scott, J.K. (2012) CliMond: global high resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. *Methods in Ecology & Evolution* 3: 53-64. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2011.00134.x
35. Ishihama Fumiko AND Takenaka, A. A. N. D. Y. H. A. N. D. K. T. (2019). Evaluation of the ecological niche model approach in spatial conservation prioritization. *PLOS ONE*, 14(12), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226971>
36. RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>
37. *The banta lab*. The Banta Lab. (n.d.). Retrieved June 25, 2022, from <https://sites.google.com/site/thebantalab/home>

ДОДАТКИ

Додаток 1.

Меню сервісу GBIF

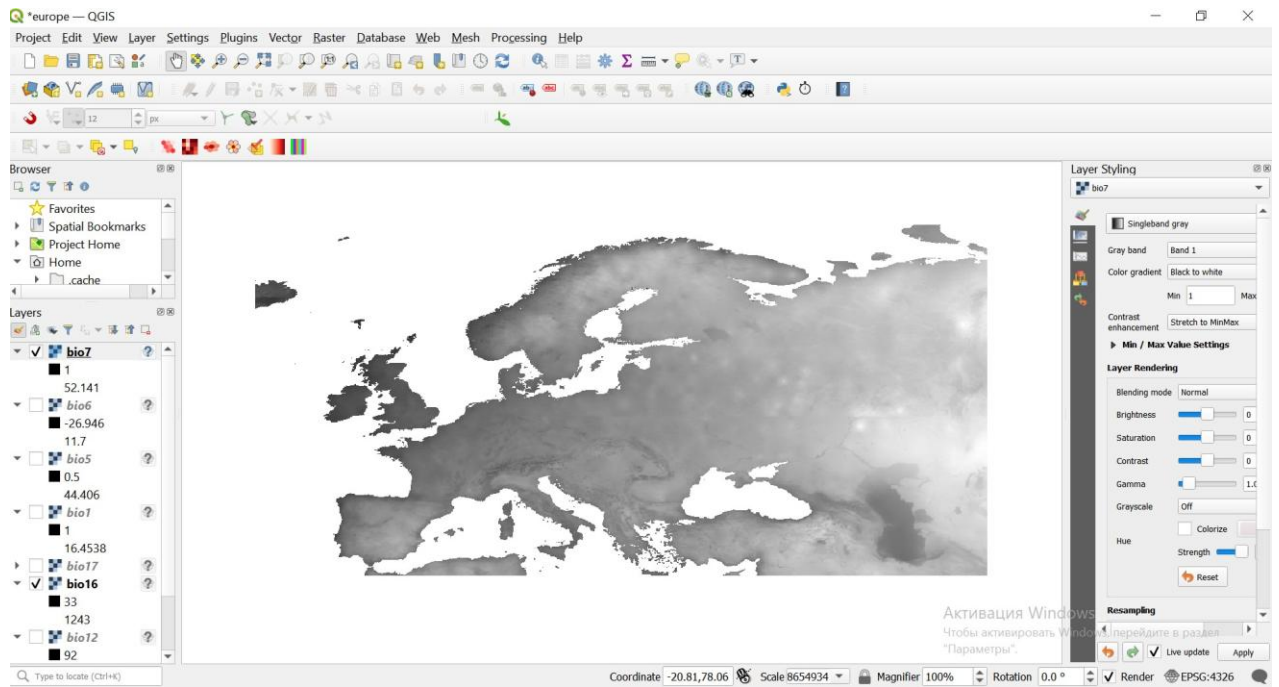
The screenshot displays the GBIF Occurrences search results for the species *Sceliphron curvatum*. The interface includes a top navigation bar with links for 'Get data', 'How-to', 'Tools', 'Community', and 'About'. A search bar on the right contains the text 'artemonus'. The main content area shows a list of search results with columns for 'Scientific name', 'Country or area', 'Coordinates', 'Month & year', and 'Occurrence status'. A left sidebar contains filters for 'Occurrence status' (Present), 'Licence', 'Scientific name' (Sceliphron curvatum), and 'Basis of record' (Human observation, Occurrence). The search results table shows multiple entries for *Sceliphron curvatum* from various countries including Lithuania, Germany, France, Austria, and Ukraine, with coordinates and occurrence dates ranging from January to February 2022.

Додаток 2.

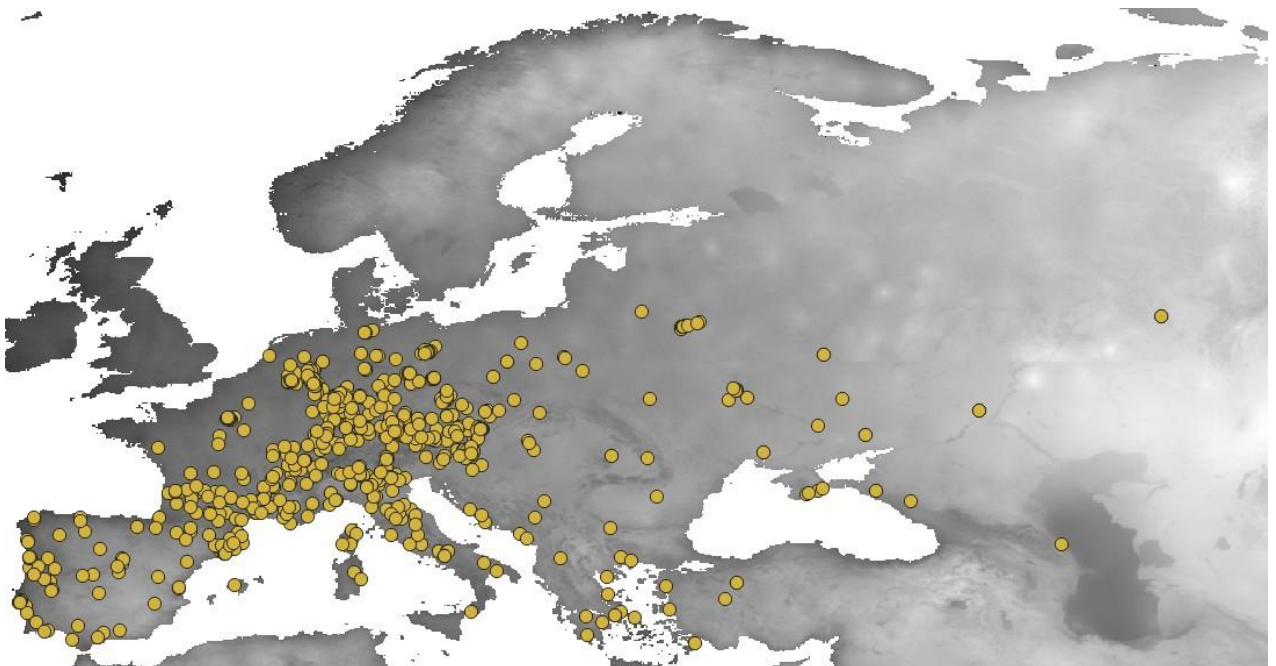
Масив даних по S. curvatum, отриманий з GBIF

The screenshot shows a spreadsheet application displaying a large data table for *Sceliphron curvatum*. The spreadsheet interface includes a top menu bar with options like 'File', 'Edit', 'View', 'Insert', 'Format', 'Data', 'Tools', 'Extensions', and 'Help'. The data table is titled 'Sceliphron curvatum' and contains numerous rows of occurrence records. The columns include occurrence ID, date, location, and status. The data is organized in a grid format, with the first few columns containing occurrence IDs and dates, and the remaining columns containing location details and occurrence status.

Додаток 3. Робоче вікно програми QGIS



Додаток 4. Візуалізації поширення *S. curvatum* за даними GBIF у QGIS



Додаток 5.

Скрипт для розрахунку ENMevaluate в R

```
#install.packages("devtools", dependencies = TRUE)
#library(devtools)
#install_github("jamiemkass/ENMeval", force = TRUE)
#install.packages("MASS", dependencies = TRUE)
#install.packages("usethis")
#install.packages("Rcpp", dependencies = TRUE)
library(ENMeval)
library(raster)
library(MASS)
#put here the names of your environmental layers, following the pattern below:
bio1 <- raster("bio1.asc")
bio5 <- raster("bio5.asc")
bio6 <- raster("bio6.asc")
bio7 <- raster("bio7.asc")
bio8 <- raster("bio8.asc")
bio12 <- raster("bio12.asc")
bio16 <- raster("bio16.asc")
bio17 <- raster("bio17.asc")
#Do what's called "stacking" the rasters together into a single r object
env <- stack(bio1, bio5, bio6, bio7, bio8, bio12, bio16, bio17)
#Display the stacked environment layer. Make a note of the position in the list
#of any categorical variables (do that by hand)
env
#in this example, the categorical variables are #s 9 and 10 in the list. But know your
own data!
#load in your occurrence points
occ <- read.csv("occ.csv")[,-1]
```

```

#make a bias file
occur.ras <- rasterize(occ, env, 1)
plot(occur.ras)
presences <- which(values(occur.ras) == 1)
pres.locs <- coordinates(occur.ras)[presences, ]
dens <- kde2d(pres.locs[,1], pres.locs[,2], n = c(nrow(occur.ras), ncol(occur.ras)),
lims = c(extent(env)[1], extent(env)[2], extent(env)[3], extent(env)[4]))
dens.ras <- raster(dens, env)
dens.ras2 <- resample(dens.ras, env)
#plot(dens.ras2)
writeRaster(dens.ras2, "biasfile.asc", overwrite = TRUE)
#check how many potential background points you have available
length(which(!is.na(values(subset(env, 1)))))
#If this number is far in excess of 10,000, then use 10,000 background points.
#If this number is comprable to, or smaller than 10,000, then use 5,000, 1,000, 500,
#or even 100 background points. The number of available non-NA spaces should
#be well in excess of the number of background points used.
#For the evaluation below, we need to convert the bias object into another format.
#The code is set up to sample 5,000 background points. It would be better if we
#could sample 10,000 background points, but there are not enough places available.
#If we could change it to 10,000 background points we would change the ", 5000,"
to ",10000,"
bg <- xyFromCell(dens.ras2, sample(which(!is.na(values(subset(env, 1)))), 10000,
prob=values(dens.ras2)[!is.na(values(subset(env, 1)))]))
colnames(bg) <- colnames(occ)
##run the evaluation
##This run uses the "randomkfold" method of cross-validation, with a set of
background points
##sampled based on the bias file, and 10 cross-validation folds. There are two
categorical

```

##variables: they are numbers 9 and 10 in the list of environmental variables from the stacked

##raster object.

```
enmeval_results <- ENMevaluate(occ, env, bg, tune.args = list(fc = c("L","LQ","H",
"LQH", "LQHP", "LQHPT"), rm = 1:5), partitions = "randomkfold",
partition.settings = list(kfolds = 10), algorithm = "maxnet")
```

```
enmeval_results@results
```

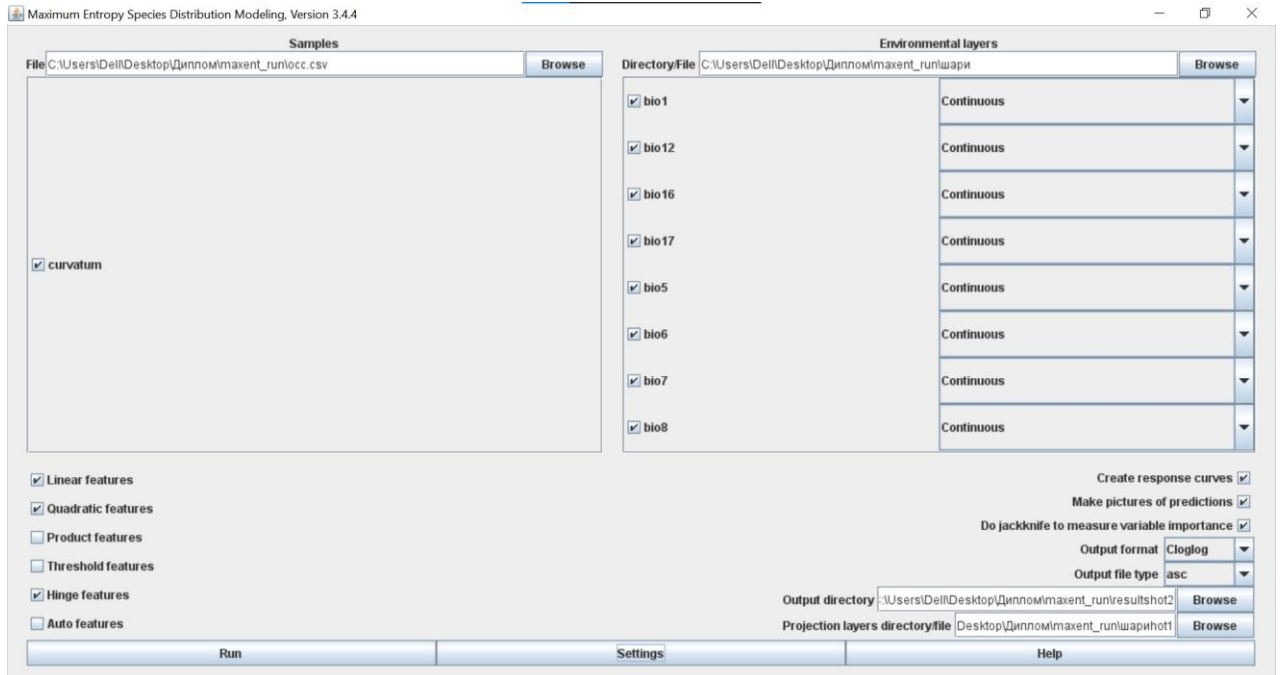
```
write.csv(enmeval_results@results, "enmeval_results.csv")
```

Додаток 6.

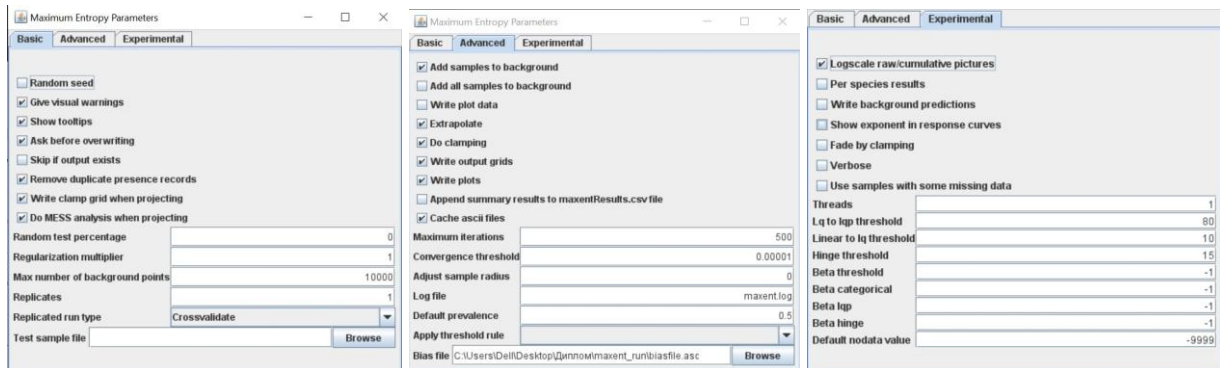
Результати розрахунку ENMevaluate

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	fc	rm	tune.args	auc.train	cbi.train	auc.diff.av	auc.diff.sc	auc.val.av	auc.val.sd	cbi.val.av	cbi.val.sd	or.10p.av	or.10p.sd	or.mtp.av	or.mtp.sd	AICc	delta.AICc	w.AIC	nc	
2	1 L		1 fc.L_rm.1	0.646396	NA	0.01937	0.014677	0.642137	0.021862	NA	NA	0.100922	0.048951	0.001587	0.005019	14944	483.4265	#####		
3	2 LQ		1 fc.LQ_rm.1	0.657927	NA	0.024224	0.013886	0.651717	0.024915	NA	NA	0.10576	0.047375	0.001587	0.005019	14720.04	259.4649	4.01E-57		
4	3 H		1 fc.H_rm.1	0.701575	NA	0.029514	0.020781	0.684436	0.028595	NA	NA	0.115182	0.055862	0.001613	0.0051	14464.6	4.027067	0.117789		
5	4 LQH		1 fc.LQH_rm	0.701383	NA	0.029954	0.020505	0.684933	0.029509	NA	NA	0.11682	0.056182	0.001613	0.0051	14460.58	0	0.882209		
6	5 LQHP		1 fc.LQHP_r	0.706014	NA	0.030051	0.019558	0.689332	0.028722	NA	NA	0.123297	0.054083	0.001613	0.0051	14592.37	131.7955	2.12E-29		
7	6 LQHPT		1 fc.LQHPT	0.718252	NA	0.035975	0.026361	0.689765	0.029862	NA	NA	0.12171	0.042545	0.001613	0.0051	14486.6	26.02132	1.97E-06		
8	7 L		2 fc.L_rm.2	0.645866	NA	0.019861	0.014312	0.641447	0.022076	NA	NA	0.104147	0.04912	0.001587	0.005019	14938.73	478.1534	#####		
9	8 LQ		2 fc.LQ_rm.1	0.647803	NA	0.022722	0.014766	0.643503	0.024041	NA	NA	0.104122	0.050188	0.001587	0.005019	14823.92	363.3426	1.11E-79		
10	9 H		2 fc.H_rm.2	0.695849	NA	0.028131	0.016479	0.686183	0.029186	NA	NA	0.108807	0.045309	0.001613	0.0051	14567.37	106.7971	5.69E-24		
11	10 LQH		2 fc.LQH_rm	0.691868	NA	0.029783	0.013272	0.683809	0.029608	NA	NA	0.107296	0.04521	0.001613	0.0051	14522.08	61.50606	3.89E-14		
12	11 LQHP		2 fc.LQHP_r	0.694019	NA	0.030153	0.013653	0.685418	0.029866	NA	NA	0.110471	0.049623	0.001613	0.0051	14547.63	87.05294	1.10E-19		
13	12 LQHPT		2 fc.LQHPT	0.697107	NA	0.030725	0.01499	0.685483	0.029642	NA	NA	0.113646	0.055048	0.001613	0.0051	14541.76	81.17978	2.08E-18		
14	13 L		3 fc.L_rm.3	0.644843	NA	0.020319	0.013825	0.640538	0.02227	NA	NA	0.104147	0.048546	0.001587	0.005019	14931.76	471.1785	#####		
15	14 LQ		3 fc.LQ_rm.3	0.645737	NA	0.022729	0.013153	0.641825	0.024075	NA	NA	0.104122	0.052989	0.001587	0.005019	14852.13	391.5492	8.35E-86		
16	15 H		3 fc.H_rm.3	0.690107	NA	0.028209	0.015258	0.681883	0.029133	NA	NA	0.108909	0.048738	0.001613	0.0051	14710.94	250.3632	3.80E-55		
17	16 LQH		3 fc.LQH_rm	0.688568	NA	0.029093	0.013056	0.682008	0.029451	NA	NA	0.104147	0.052084	0.001613	0.0051	14604.96	144.383	3.92E-32		
18	17 LQHP		3 fc.LQHP_r	0.690053	NA	0.030265	0.012899	0.683651	0.030283	NA	NA	0.108884	0.053675	0.001613	0.0051	14609.24	148.6587	4.62E-33		
19	18 LQHPT		3 fc.LQHPT	0.690053	NA	0.03028	0.012969	0.683646	0.030281	NA	NA	0.108884	0.053675	0.001613	0.0051	14609.24	148.6587	4.62E-33		
20	19 L		4 fc.L_rm.4	0.643011	NA	0.020447	0.013414	0.638986	0.022272	NA	NA	0.10256	0.047386	0.001587	0.005019	14914.76	454.1808	2.10E-99		
21	20 LQ		4 fc.LQ_rm	0.643008	NA	0.020007	0.013057	0.640183	0.023804	NA	NA	0.102500	0.051824	0.001587	0.005019	14861.24	400.663	8.77E-98		

Додаток 7. Меню ПЗ Maxent



Додаток 8. Налаштування ПЗ Maxent, що використовувалися



Додаток 9.

Відгук моделі на вплив кожного з факторів

