

ІНДИКАТОРИ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ

Т.В. Ільєнко, Д.М. Шерстюк

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5406-5449

e-mail: volaf666@gmail.com; ORCID: 0009-0001-1687-5974

*У статті досліджено прояви кліматичних змін на території України та їхній вплив на стан екосистем із використанням сучасних методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і супутникових даних. Основною метою дослідження було виявлення наслідків впливу кліматичних змін на докілья із залученням передових технологій дистанційного зондування Землі, зокрема, виявлення взаємозв'язку між підвищенням температури поверхні землі, змінами вегетаційного покриву, станом водних об'єктів та поширенням інвазійних видів. Дослідження проведено з використанням ГІС-технологій, супутникових засобів спостереження та збору даних у вигляді баз даних Giovanni, Copernicus та EO BROWSER. Аналіз температурних змін здійснено за допомогою супутника AIRS і платформи Giovanni на основі даних за 2010–2025 рр. Вегетаційні параметри оцінювалися за індексами NDVI, NDWI та NDMI із застосуванням супутників Sentinel-2. Результати показали стійку тенденцію до зростання температурних показників, пом'якшення зимових умов із підвищенням мінімальних температурних значень, скорочення періоду снігового покриву та зростання інтенсивності літніх теплових хвиль. Спостерігалось прогресивне підвищення показників NDVI, а також подовження вегетаційного періоду, зокрема в Рівненській обл., де початок вегетації змістився на три тижні раніше, що свідчить про адаптацію рослинного покриву до нових кліматичних умов. У роботі встановлено також зв'язок між кліматичним потеплінням та активним поширенням інвазійного виду *Potamogeton amplipodatus* у Волинській та Одеській обл. Крім того, у регіонах із підвищеною температурою, особливо в Одеській обл., зафіксовано зменшення площі водної поверхні озер та зниження вологозабезпечення рослинності. Використання даних супутникового моніторингу дало можливість виявити просторово-часові закономірності змін і підтвердити чутливість природних і агроєкологічних систем до кліматичних чинників. Результати дослідження акцентують на необхідності подальшого спостереження за динамікою екосистем для розробки адаптивних природоохоронних та агроєкологічних стратегій, що є критично важливим для забезпечення сталого розвитку України в умовах глобальних кліматичних викликів.*

Ключові слова: *дистанційне зондування Землі, NDVI, NDMI, NDWI, стан рослинного покриву, інвазійні види, посухи.*

ВСТУП

Глобальні зміни клімату спричиняють комплексний вплив на екосистеми через складну взаємодію природних процесів. Клімат, як один із ключових регулювальних чинників довкілля, зумовлює каскадні зміни в екосистемах, що можна виявити та кількісно оцінити за допомогою методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Важливим індикатором кліматичних змін є динаміка вегетаційних індексів, оскільки рослинність безпосередньо реагує на зміни температурного режиму та кіль-

кості опадів. Сучасні дослідження демонструють загальносвітову тенденцію до підвищення значень вегетаційного індексу, що свідчить про істотні трансформації в екосистемах під впливом кліматичних змін [1].

Додатковим біоіндикатором кліматичних змін є динаміка популяцій комах, особливо в агроєкосистемах. Спостерігається розширення ареалів шкідників сільськогосподарських культур та поява нових видів на територіях, де вони раніше не зустрічалися, що вказує на формування сприятливих умов для їх життєдіяльності внаслідок кліматичних змін.

Метеорологічні параметри, включаючи режим опадів та температурні показники, також зазнають істотних змін. Сучасні методи ДЗЗ допомагають здійснювати комплексний моніторинг цих параметрів у просторово-часовому вимірі, доповнюючи та верифікуючи дані наземних спостережень.

Тому, використання методів ДЗЗ забезпечує ефективний інструментарій для виявлення, кількісної оцінки та просторового аналізу наслідків кліматичних змін у різних компонентах довкілля.

Мета даної роботи — виявлення наслідків впливу кліматичних змін на довкілля із залученням передових технологій ДЗЗ.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Екологічна ситуація в Україні істотно погіршилася внаслідок широкомасштабного вторгнення Росії. Простежується деградація екосистем, негативний вплив на біорізноманіття, забруднення природних ресурсів. Через ці чинники підвищується вразливість України до кліматичних змін, які істотно діють на глобальну продовольчу безпеку. Спричинена людиною зміна клімату вже призвела до широкомасштабних перетворень у системах Землі з негативними наслідками для природи та людей. Як відмічається у 6-му звіті Міжурядової групи експертів зі зміни клімату ризику та прогнозовані негативні наслідки зміни клімату та пов'язані з ними втрати й збитки зростатимуть із кожним приростом глобального потепління. Вони будуть вищі за глобального потепління на 1,5°C, ніж зараз, і ще вищі на 2°C [2]. За науковими дослідженнями встановлено, що багато наземних і прісноводних видів вже змінили свої географічні ареали, сезонну діяльність, моделі міграції, чисельність і взаємодію видів у відповідь на триваючі зміни клімату. А за підвищення температури на планеті на 1,5°C втратять більше половини свого кліматично зумовленого ареалу існування 105 000 вивчених видів, 6% комах, 8 рослин і 4% хребетних тварин. Якщо температура зросте на 2°C, наслідки будуть значно гіршими: 18% комах,

16 рослин, 8% хребетних тварин втратять свої природні ареали [2]. Також відбуватиметься збільшення кількості лісових пожеж і поширення шкідливих інвазивних видів. Як наголошується у звіті, критичною межею підвищення середньорічної температури є 2–2,5°C. Подальше збільшення температури призведе до катастрофічного стану біосфери. Жоден із регіонів планети не уникне цих негативних наслідків впливу змін клімату [2].

Впливу змін клімату та визначенню їх відповідних ризиків на сільськогосподарське виробництво та екосистеми, з використанням сучасних технологій, присвячено численні наукові дослідження. У праці Arfasa зі співавт. [3] проаналізовано вплив змін клімату на окремі регіональні метеофактори. Перетворення агрокліматичних умов та врожайності сільськогосподарських культур за змін клімату було висвітлено в роботах Шевченко, Балабух [4] та Польового і співавт. [5], відповідно. Комплексний аналіз взаємовпливу скорочення лісистості площ і кліматичних змін представлено в дослідженні Райчук, Швиденко, Кучми (2024) [6]. У праці Zhong et al. (2022) визначено потенційні кліматичні зміни в екосистемах водно-болотних угідь із використанням оптимізованих моделей машинного навчання. Результати дослідження свідчать, що місцеві види водно-болотних угідь, особливо в Північно-Східному Китаї, ймовірно, зазнають скорочення ареалу існування внаслідок кліматичних змін, що супроводжуватиметься потенційною інвазією неаборигенних видів [7].

Дослідники й винахідники багатьох країн розробляють методи і способи щодо виявлення наслідків впливу змін клімату на навколишнє середовище. Впродовж 2016–2017 рр. китайський вчений Wu Jianguo розробив інноваційну технологію визначення комплексного впливу кліматичних змін та антропогенних чинників на біологічне різноманіття (Detection technology separately detecting biological diversity influence by climate change factor and mankind activity factor Patent № CN105893785A.), яка ґрунтується на

міждисциплінарному підході, що інтегрує методи екології, кліматології, математичного моделювання та ГІС-технологій. Метод прогнозування регіонального індексу рослинності за різними сценаріями кліматичних змін розроблено в 2020 р. (Method for estimating future vegetation index of region under climate change scene. Patent № CN111639803A). У 2021 р. запропоновано комплексний метод і систему оцінки екологічних ризиків територій за трьома основними параметрами: вразливість території (чутливість природного середовища регіону до різних екологічних загроз), рівень загрози (оцінка наявних екологічних ризиків, їх поширення та інтенсивності) та адаптаційна здатність (спроможність регіону пристосовуватися до екологічних викликів з урахуванням антропогенного впливу). Результатом застосування цієї системи є ідентифікація ключових екологічних загроз, формування загальної оцінки екологічних ризиків території, створення карти просторового розподілу ризиків та розробка детального опису екологічного стану досліджуваної території (Regional ecological environment risk evaluation method and system Patent № CN113191691A).

Започаткування низки програм із визначення стану агроєкосистем і впливу на них змін клімату із залученням космічних, агрометеорологічних та наземних спостережень, стало наступним етапом в оцінюванні цих змін на довші терміни. Дослідження, які були зосереджені, зокрема, на аналізі взаємодії між змінами ґрунтового покриву та глобальними перетвореннями загалом (зміна клімату, втрата біорізноманіття, вплив на природні ресурси, були розроблені в рамках міжнародних дослідницьких програм LULCC (Land Use and Land Cover Change) [8], GLP (Global Land Project) [9] і більш сучасної Copernicus Land Monitoring Service [10]. Вплив кліматичних змін на рослинний покрив досліджувався шляхом аналізу багатодесятирічних часових рядів даних дистанційного зондування. За допомогою сезонних показників NDVI було здійснено оцінку довгострокової динаміки рослинності в Європі та Північній Африці.

Результати аналізу виявили чіткі закономірності з диференційованими трендами NDVI у весняний, літній та осінній періоди, причому для значних територій Європи характерні позитивні тенденції, що свідчить про посилення вегетаційної активності протягом досліджуваного періоду [11].

Тому, супутниковий моніторинг Землі став критично важливим інструментом для відстеження екологічних змін та обґрунтування управлінських рішень у контексті кліматичних трансформацій. Цей підхід забезпечує комплексне вимірювання численних екологічних параметрів і процесів у глобальному масштабі, що дає можливість формувати цілісну картину змін навколишнього середовища та розробляти ефективні стратегії адаптації.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для визначення змін клімату на наслідків їх впливу на екосистеми було використано супутникові дані та результати попередніх наукових досліджень. Методика досліджень полягала у виявленні зв'язку такого фактора впливу змін клімату, як температурні зміни із станом вегетаційного покриву, водних об'єктів, поширення інвазійних видів. Визначення температури наземного покриву проводилось за часовими серіями даних із супутника AIRS (The Atmospheric Infrared Sounder), який застосовується для кліматичних досліджень і прогнозування погоди [12]. Корисне навантаження супутника AIRS складається з гіперспектрального приладу AIRS з 2378 інфрачервоними каналами та 4 каналами видимого/ближнього інфрачервоного діапазону та приладу AMSU-A з 15 мікрохвильовими каналами [13]. За даними цього супутника за 10-річний період (2015–2025 рр.) [14] з використанням застосунку Giovanni [15] були побудовані графіки, що відображають щоденну динаміку змін температури земної поверхні.

Для визначення стану вегетаційного покриву та водних об'єктів було використано дані супутників мережі Sentinel на платформі EO Browser [16; 17], зокрема

супутника Sentinel-2, який надає знімки з високим просторовим розрізненням у видимому та інфрачервоному діапазоні для моніторингу рослинності, ґрунту та водних поверхонь, внутрішніх водних шляхів і прибережних територій. Для досліджень було застосовано індекси: нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI [18], нормалізований диференційний водний індекс NDWI [19] та нормалізований диференційний індекс вологості NDMI [18]. Вегетаційний індекс NDVI є простим, але ефективним показником для кількісної оцінки зеленої біомаси. Це показник стану здоров'я рослинності, який базується на відбитті рослинами хвилі світла певної довжини, отриманого за допомогою бази даних EO Browser за формулою:

$$NDVI = (B08 - B04) / (B08 + B04), \quad (1)$$

де $B8$ (ближній інфрачервоний діапазон спектра, 842 нм), $B4$ (червоний, 665 нм) – спектральні канали супутника Sentinel-2.

Діапазон значень NDVI становить від -1 до 1 . Від'ємні значення NDVI (значення, що наближаються до -1) відповідають водним об'єктам. Значення, близькі до нуля (від $-0,1$ до $0,1$), зазвичай означають оголені ділянки скель, піску або снігу. Низькі додатні значення (приблизно від $0,2$ до $0,4$) – характерні для рідкої рослинності, тоді як високі значення характерні для густої рослинності (значення наближені до 1 – відповідає лісовому покриву) [18].

Для визначення об'єктів відкритих водних просторів та їх виділення на супутниковому знімку на тлі ґрунту та рослинності, а також аналізу їх стану використовувався індекс NDWI, який розраховується за формулою [19]:

$$NDWI = (B03 - B08) / (B03 + B08), \quad (2)$$

де $B03$ – зелений канал (560 нм); $B08$ – ближній інфрачервоний канал.

NDWI використовується для виявлення та моніторингу найменших змін у вмісті водних об'єктах. Застосовуючи переваги спектральних діапазонів ближнього інфрачервоного ($B08$) та видимого зеленого ($B03$).

Для виявлення вмісту вологи в рослинності та моніторингу посухи використовується індекс NDMI як ближній інфрачервоний ($B08$) та короткохвильовий інфрачервоний ($B11$, 1610 нм) діапазони для відображення вмісту вологи та отриманий за формулою:

$$NDMI = (B08 - B11) / (B08 + B11). \quad (3)$$

Діапазон значень NDMI становить від -1 до 1 . Від'ємні значення NDMI (значення, що наближаються до -1) відповідають відкритому ґрунту. Значення близькі до нуля (від $-0,2$ до $0,4$) зазвичай позначають водний стрес. Високі додатні значення відповідають густому рослинному покриву, що не зазнає водного стресу (приблизно від $0,4$ до 1) [18].

Інформація щодо кількості та поширення інвазійних видів була визначена за аналізом досліджень вітчизняних науковців, опублікованих у каталозі «Знахідки чужорідних видів рослин і тварин в Україні» (2023) [20].

Дослідження наслідків змін клімату охоплювало території двох адміністративних областей України, які репрезентують різні фізико-географічні зони та характеризуються контрастними ландшафтно-кліматичними умовами. Моніторинг змін вегетаційного покриву проводився в північно-західному регіоні країни, де клімат є помірно континентальним із достатнім зволоженням. Річна кількість опадів становить у середньому 600 – 700 мм, з відносно рівномірним розподілом упродовж року. Температурний режим окреслено вираженою сезонною варіабельністю, що істотно впливає на динаміку розвитку рослинності. Аналіз змін у стані водних об'єктів здійснювався в південному регіоні України, де кліматичні умови також мають помірно континентальний характер, однак із більш чітким впливом морської акваторії. Цей чинник зумовлює специфічний гідротермічний режим із загальною тенденцією до дефіциту атмосферних опадів, які переважно припадають на літній період і не перевищують 340 – 470 мм на рік.

Така комплексна характеристика території дослідження відображає різноманітність фізико-географічних умов досліджуваних регіонів, що є важливим підґрунтям для подальшого аналізу наслідків впливу кліматичних змін.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Одним із ключових індикаторів кліматичних змін є динаміка температурних показників, що безпосередньо відображає трансформацію кліматичних умов навколишнього середовища. Температура поверхні ґрунтового покриву є одним із найбільш репрезентативних супутникових індикаторів кліматичних змін. Для комплексного дослідження цих змін було використано базу даних Giovanni [15], на основі якої сформовано температурні графіки поверхні Землі, що дають змогу ідентифікувати та проаналізувати температурні коливання.

Аналіз динаміки середньомісячної температури на території України з 2010 по 2025 рр. свідчить про загальну тенденцію до підвищення температури на глобальному рівні протягом досліджуваного періоду (рис. 1).

Графік побудовано за супутниковими даними AIRS температури поверхні суші в денний період упродовж 15-річного періоду спостережень, осередненими за місяць та інтегрованими у систему Giovanni. Характерною особливістю температурної динаміки є диференційований характер змін у різні сезони: скорочення періоду з низькими температурами взимку та подовження періоду з високими температурами влітку. У зимовий період зафіксовано статистично значуще зменшення кількості днів із низькими температурними показниками та підвищення мінімальних температурних значень, тоді як літні сезони відзначаються зростанням екстремальних максимумів та їх тривалості.

Аналогічно було проведено регіональний температурний аналіз на прикладі Київської обл. Аналіз температурного режиму Київської обл. підтверджує загальну тенденцію до потепління, зокрема через частіші екстремальні температурні показники, та вказує на інтенсифікацію теплових хвиль у літній період та пом'якшення зимових умов (рис. 2).

Закономірним наслідком цих змін є скорочення тривалості снігового покриву та зменшення кількості снігових опадів, що

Часовий ряд. Усереднена по площі приземна температура (денний час, AIRS) помісячно, 1 град. [AIRS AIRS3STM v006], С, за період січень 2010 – січень 2025, територія України

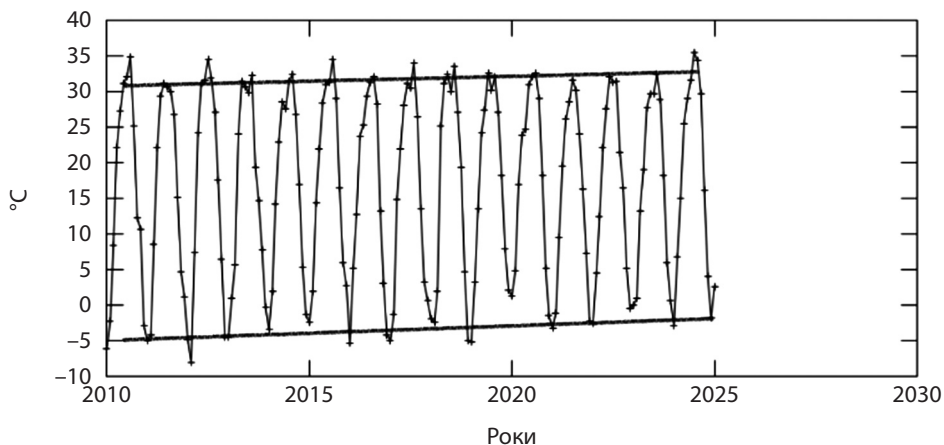


Рис. 1. Графік температури поверхні по Україні

Примітка: створено авторами за допомогою програми Giovanni [15].

Часовий ряд. Усереднена по площі приземна температура (денний час, тільки AIRS) щомісячно, 1 град. [AIRS AIRS3STM v006], С, за період січень 2010 – січень 2025, регіон 29,485 сх.д., 48,6567 пн.ш., 31,9459 сх.д., 51,5351 пн.ш.

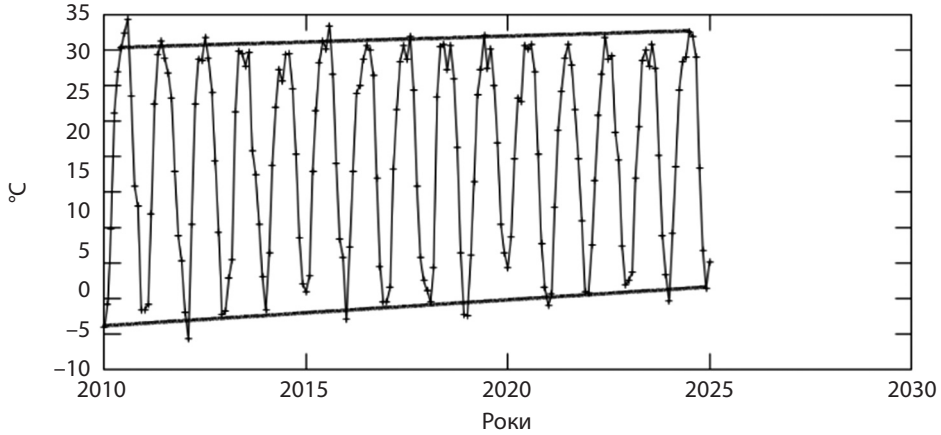


Рис. 2. Графік температури поверхні в Київській обл.

Примітка: створено авторами за допомогою програми Giovanni [15].

спостерігається протягом останніх 25 років (рис. 3). Про це свідчить аналіз графіка динаміки снігових опадів для території всієї України, сформованого за допомогою програмного комплексу Giovanni [15].

Зменшення кількості снігових опадів упродовж 25-річного періоду є додатко-

вим підтвердженням кліматичних змін, які впливають на характеристики зимового періоду в Україні.

Надійним показником змін клімату слугує характер вегетаційного періоду — його тривалість та інтенсивність, які можна відстежувати за допомогою вегетаційного індексу NDVI.

Часовий ряд. Усереднена по площі кількість снігу, щомісячно, $0,5 \times 0,625$ град. [MERRA-2 Reanalysis M2TMNXFLX v5.12.4], $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, за період січень 2000 – січень 2025, територія України

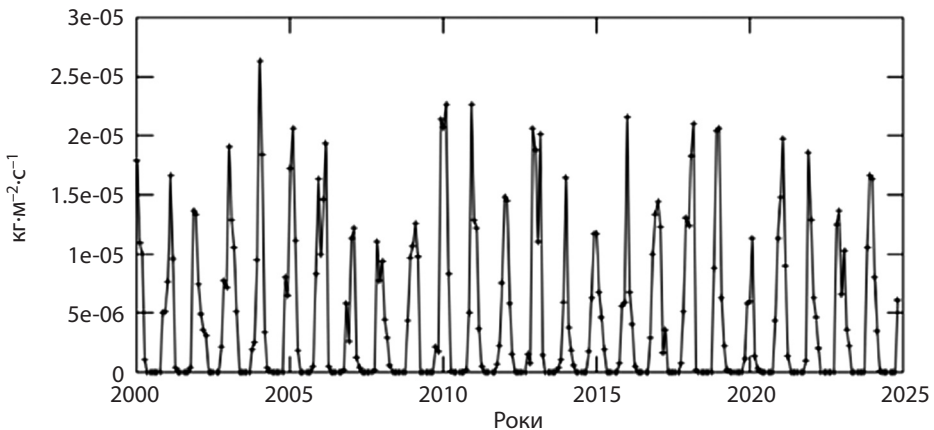


Рис. 3. Кількість снігових опадів за період з 2000–2025 рр.

Примітка: створено авторами за допомогою програми Giovanni [15].

Визначення ключових часових меж вегетаційного періоду — початку (SOS — Start of Season) та завершення (EOS — End of Season) — базується на моменті перетину вегетаційним індексом NDVI встановлених порогових значень.

Для українського Полісся з його специфічними ґрунтово-кліматичними умовами притаманні такі особливості: на початковій стадії вегетації показники NDVI зазвичай сягають лише 0,2, що відображає стан поверхні землі без рослинного покриву або з першими сходами. З розвитком рослинності цей показник поступово зростає до 0,3–0,8, а під час завершення вегетаційного циклу знову знижується до 0,2. Тому моментом перетину кривою NDVI позначки 0,2 визначаються часові точки SOS та EOS [22]. Зокрема для всієї Рівненської обл. чітко спостерігається зміна тривалості вегетаційного циклу: початок змістився з 24 березня на 3 березня, а завершення продовжилось від 3 до 17 листопада (рис. 4).

Моніторинг змін стану вегетаційного покриву здійснювався на території Гоцанського р-ну Рівненської обл., що належить до зони Полісся. Аналіз динаміки вегетаційного індексу NDVI на спостережуваній ділянці демонструє чіткі та закономірні зміни протягом п'ятирічного періоду спос-

тережень (2020–2024 рр.) з помітними коливаннями, зумовленими як кліматичними умовами, так і особливостями сільськогосподарської діяльності (рис. 5). Впродовж досліджуваного періоду виявлена загальна тенденція до прогресивного зростання його показників. Винятком став 2022 р., коли показник різко знизився в середньому до 0,63, що може бути пов'язано не лише кліматичними чинниками, але й зміною сільськогосподарських практик, зокрема, впровадженням сівозміни (кукурудза/соє), що демонструє комплексну взаємодію антропогенних та природних чинників у формуванні вегетаційного профілю території. В 2023 р. індекс підвищився в середньому до 0,76, а в 2024 р. досяг 0,79, що вказує на поступове збільшення інтенсивності вегетаційного періоду. Коливання вегетаційного індексу безпосередньо залежать від типу рослин, кліматичних умов та агротехнічних заходів. Аналіз динаміки показників NDVI за п'ять років фіксує не лише зростання його значень, а й зміщення дат початку вегетації, що може бути індикатором впливу кліматичних змін на процеси рослинного розвитку. На досліджуваній території структура посівів включає кукурудзу та соє, що істотно впливає на динаміку вегетаційного індексу. Графічне представлення даних, незважаючи на наяв-

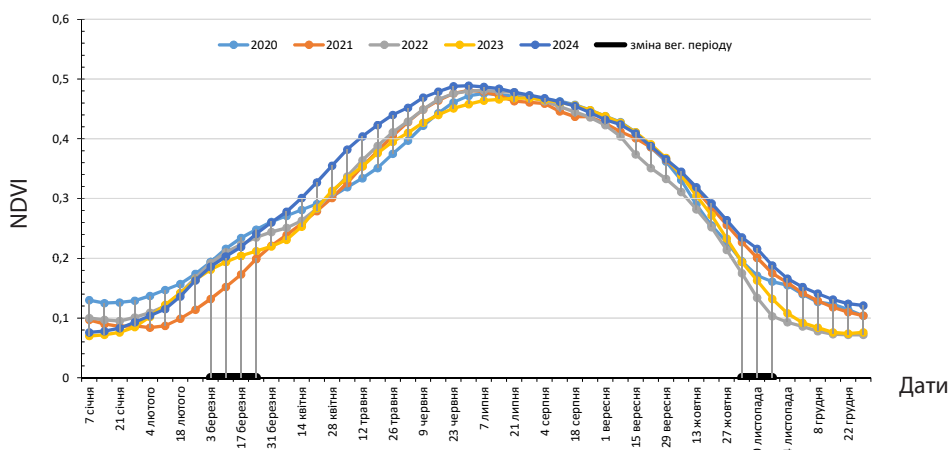


Рис. 4. Динаміка NDVI по Рівненській обл. (2020–2024 рр.)

Примітка: розроблено авторами за даними Satellite Applications and Research of NOAA's [21].

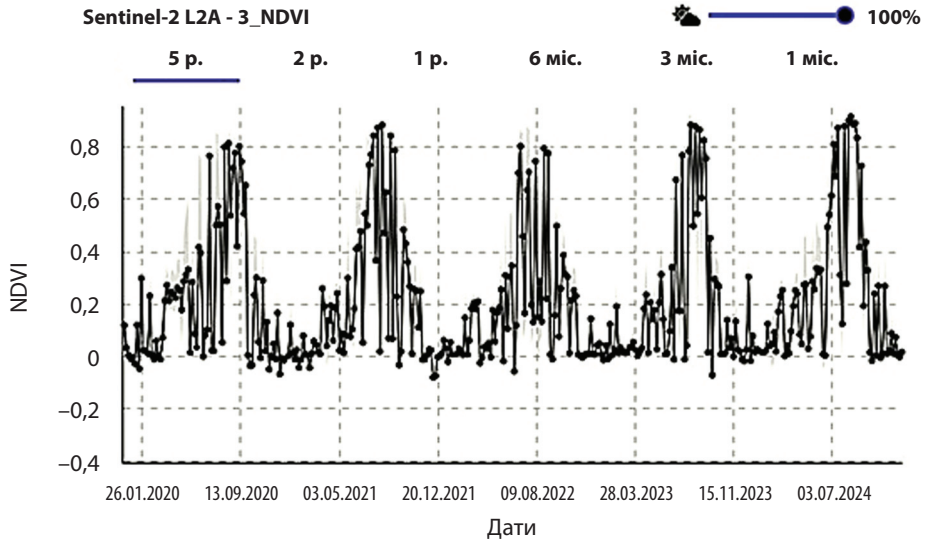


Рис. 5. Динаміка значень NDVI за період з 2020 по 2024 рр.

Примітка: розроблено авторами за даними EO Browser [16].

ність флуктуацій, чітко ілюструє загальну позитивну динаміку розвитку рослинності в досліджуваному регіоні (див. *рис. 5*).

На основі проаналізованого графіка (див. *рис. 5*) були відібрані репрезентативні дати знімків супутника Sentinel-2 для поля сої, що перебувало на стадії дозрівання. За допомогою геоінформаційної програми QGIS [23] було побудовано просторовий розподіл індексу NDVI за 2021 та 2024 рр. (*рис. 6*), який демонструє вищі значення

в 2024 р., а також карту їх різниці (*рис. 7*). Шкала різниці NDVI в діапазоні від -2 до 2 дає змогу детально оцінити просторово-часові зміни рослинного покриву та стану сільськогосподарських угідь. Такий методологічний підхід створює передумови для більш раціонального управління земельними ресурсами, сприяючи збереженню та підвищенню родючості ґрунту шляхом точної оцінки динаміки рослинності.

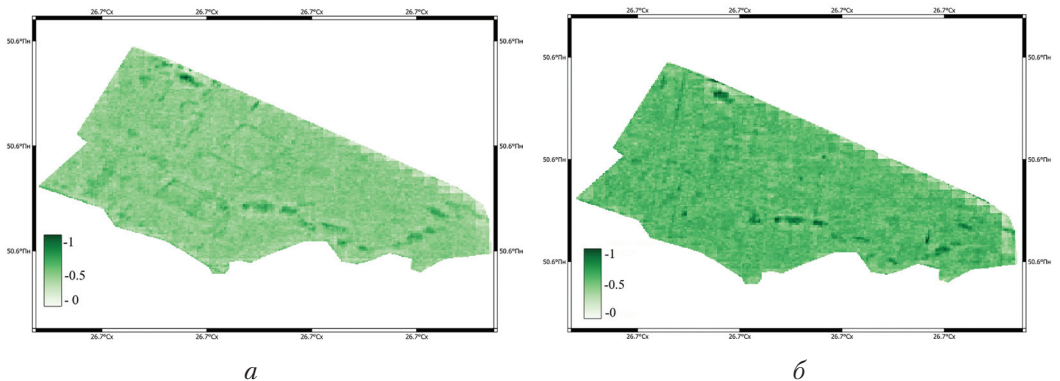


Рис. 6. NDVI: *a* – Sentinel-2, 11.08.2021 р.; *б* – Sentinel-2, 15.08.2024 р.

Примітка: побудовано авторами за даними Copernicus Browser [16].

Ще одним з аспектів впливу змін клімату на екосистеми є поширення інвазійних видів. Унаслідок глобальних змін клімату на території України спостерігається збільшення кількості теплих сезонів, що сприяє розширенню ареалів поширення нових видів. Інформація щодо кількості та поширення інвазійних видів була отримана з опублікованого каталогу «Знахідки чужорідних видів рослин і тварин в Україні» [20].

На основі каталогу було обрано види, які стрімко поширилися територією України за останній період та характеризуються чутливістю до температурних змін. Основним об'єктом дослідження став *Potamopyrgus antipodarum* (Gray, 1843) — інвазійний вид прісноводних черевоногих молюсків родом із Нової Зеландії. Вперше в Україні *P. antipodarum* було виявлено в 1951 р. Ю.М. Марковським у Дніпровсько-Бузькому лимані [24]. На сьогодні цей вид активно поширюється територією України через загальні кліматичні зміни, які стають дедалі сприятливішими для його розповсюдження. Впродовж 1969–1970 рр. у тимчасово пересихаючих та заплавної водоймах Прип'ятського Полісся поселення молюсків цього виду вперше було відмічено В.В. Поліщуком. У вересні 2015 р. зареєстровано першу колонію *P. antipodarum* в озерах Шацької групи: на одній з чотирьох станцій на оз. Люцимер (51°28'14.7" N, 23°56'34.6" E). Щільність поселення молюсків становила 80 екз./м². У вересні 2019 р. поселення *P. antipodarum* були виявлені ще й на оз. Пісочне, Чорне Велике. На оз. Люцимер спостерігалася найвища щільність популяції молюсків (>5500 екз./м²), а на інших озерах показники коливалися від 10 до 650 екз./м² [24–26].

P. antipodarum характеризується високою толерантністю до несприятливих умов середовища, включаючи підвищений рівень солоності, висихання та коливання температури. Експериментальні дослідження показали позитивний вплив температури на життєвий цикл виду [26]. За даними публікацій, вид було зафіксовано ще й в інших областях України: Одеська, Київська,

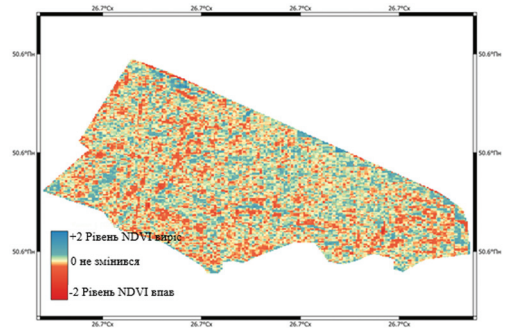


Рис. 7. Зміни NDVI між 2021 та 2024 рр.

Примітка: побудовано авторами з використанням програми QGIS [23].

Волинська, Миколаївська, Житомирська та Тернопільська. Однак найчисельніші колонії були помічені у Волинській та Одеській обл.

Відповідно до вище наведених даних, інвазійний вид *P. antipodarum* вперше виявлено у Волинській обл. у 2015 р. Аналіз значень денної температури за період 2005–2025 рр., отриманих за допомогою програми Giovanni [15], показав стійку тенденцію їх підвищення (рис. 8).

Примітно, що 2015 р. характеризувався одними з найвищих температурних показників у досліджуваному періоді, що створило термічні умови, сприятливі для встановлення та виживання даного теплолюбного виду.

За даними NOAA Center for Satellite Applications and Research (STAR), отриманими за період 2000–2024 рр., було проаналізовано осереднену за тиждень температуру земної поверхні та розраховано її середнє, мінімальне й максимальне значення за періоди 2000–2014 та 2015–2024 рр. Аналіз отриманих даних показав, що за однакових максимальних значення період 2015–2024 рр. був теплішим за рахунок підвищення зимових температур — середня температура була вищою на 0,73°C. Отже, спостерігалися більш рівномірні кліматичні умови, які були сприятливими для життєдіяльності *P. antipodarum*, що призвело до значного росту колонії з подальшим поширенням по території (понад

Часовий ряд. Усереднена по площі приземна температура (денний час, AIRS) щомісячно, 1 град. [AIRS AIRS3STM v006], С, за період січень 2005 – січень 2025, територія України, регіон 23,5851 сх.д., 50,3539 пн.ш., 26,1779 сх.д., 51,848 пн.ш.

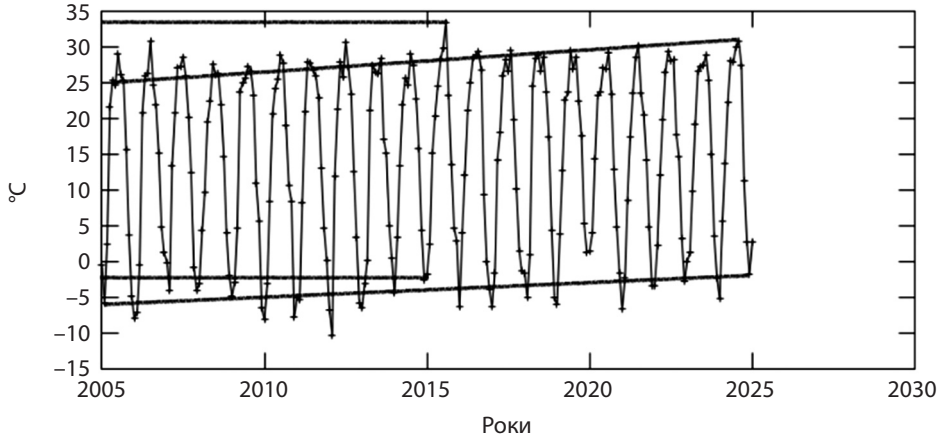


Рис. 8. Динаміка температури земної поверхні Волинської обл.

Примітка: створено авторами за використання програми Giovanni [15].

5000 екз./м²). Саме ці кліматичні зміни, ймовірно, стали ключовим чинником, який забезпечив успішну колонізацію території *P. antipodarum*. У наступні роки, на фоні збереження підвищених температурних режимів, відбувався поступовий ріст чисельності колонії з подальшим територіальним поширенням виду, що підтверджує прямий зв'язок між потеплінням клімату та експансією інвазійних видів у регіоні.

Для підтвердження одержаних результатів було також проаналізовано температурні дані для Одеської обл., де також фіксувалися значні за розміром колонії *P. Antipodarum* [20]. Аналогічно до Волинської обл., в Одеському регіоні спостерігається виражена тенденція до загального потепління, що безпосередньо корелює з успішним встановленням інвазійного виду. Відповідно до проаналізованих даних NOAA Center for Satellite Applications and Research (STAR), середня температура земної поверхні Одеської обл. в період 2008–2024 рр. була вищою за температуру попереднього періоду (1990–2007 рр.) на 1,8°C і становила 15,61°C. Особливо важливим є той факт, що максимальна температура знизилася від 35,9°C до 34,5°C, а мінімальна підвищилася від –23,5°C до

–20,5°C. Це вирівнювання температурних екстремумів призвело до формування більш стабільного і м'якого кліматичного режиму, який усунув температурні стреси, що раніше обмежували виживання *P. antipodarum*. Саме зменшення амплітуди коливань температур створило термічну нішу, оптимальну для життєдіяльності цього виду, що пояснює формування великих за розміром колоній у регіоні.

Ще одним із ключових індикаторів кліматичних змін, що характеризуються зменшенням кількості опадів та збільшенням експлуатації водних об'єктів у сільськогосподарських цілях є посухи.

Динаміку опадів з 2000 по 2024 рр. визначали за даними ERA5 ECMWF/ Copernicus Climate Change Service [27]. На *рис. 9* наведено середньомісячна кількість опадів в Одеській обл. за період з 2000 по 2024 рр. На графіку видно, що загальний об'єм і кількість опадів зменшилися, однак спостерігається збільшення критичних опадів, коли за короткий проміжок часу випадає велика кількість опадів.

Стан водних об'єктів визначався за вище наведеним індексом NDWI. Цей індекс використовується для виявлення водних об'єктів та може демонструвати проце-

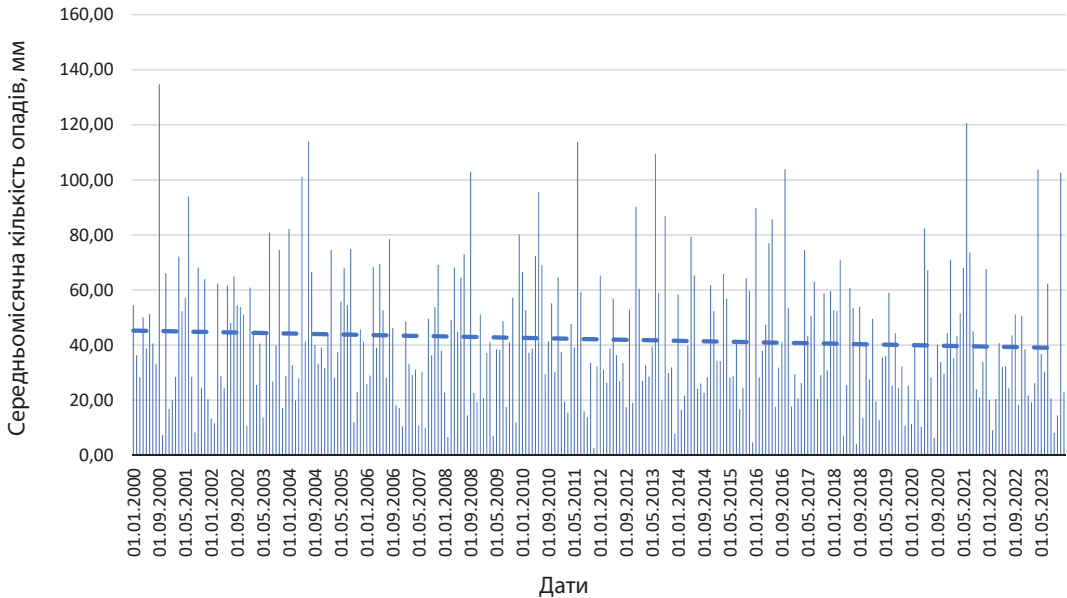


Рис. 9. Графік опадів в Одеській обл.

Примітка: створено авторами за даними ERA5 ECMWF [27].

си евтрофікації водних об'єктів, внаслідок чого їхня поверхня може відобразитися зеленим кольором.

Вищі значення індексу відповідають більш насиченому синьому кольору, що демонструє кращий стан водного об'єкта та його глибину.

Об'єктом дослідження було обрано оз. Путрене, розташоване в Одеській обл., регіоні, де фіксується загальне підвищення температури (рис. 10), що може впливати на стан водних об'єктів.

Для більш точного визначення водних об'єктів було сформовано два взаємодоповнювані шари: трьохканальний знімок True color, який фіксує поверхню в звичному для людини вигляді, та шар класифікації сцен Scene Classification Layer (SCL), що забезпечує автоматизовану ідентифікацію об'єктів на поверхні. Завдяки використанню алгоритму машинного навчання SCL дає можливість точно класифікувати пікселі на основі їхніх спектральних та просторових характеристик [28], що призводить до значно чіткішого відображення берегової лінії порівняно з візуальним аналізом.

За результатами аналізу супутникових знімків Sentinel-2 встановлено значні зміни параметрів оз. Путрене за період 2016–2024 рр. Оскільки високі літні температури інтенсифікують процеси евтрофікації, які маскують справжні контури водного дзеркала, для точного визначення параметрів озера було стратегічно обрано знімки в холодний період року. Додатковим підтвердженням необхідності такого підходу стали температурні дані STAR NOAA NESDIS: температура поверхні в період 3–9 листопада становила 5,6°C (2017 р.) та 11,3°C (2024 р.), що свідчить про мінімальну біологічну активність у водоймі. Враховуючи ці критерії, для аналізу динаміки змін водної поверхні було обрано доступні безхмарні супутникові знімки Sentinel-2 за 4 листопада 2016 р. (рис. 11, а) та 7 листопада 2024 р. (рис. 11, б).

Використовуючи принцип, що насиченість синього кольору корелює з глибиною водного об'єкта, встановлено зміни морфометричних параметрів озера. У 2016 р. (рис. 11, а) озеро характеризувалося більшою глибиною та площею водної



Рис. 10. Графік температури земної поверхні Одеської обл.

Примітка: створено авторами за допомогою програми Giovanni [15].

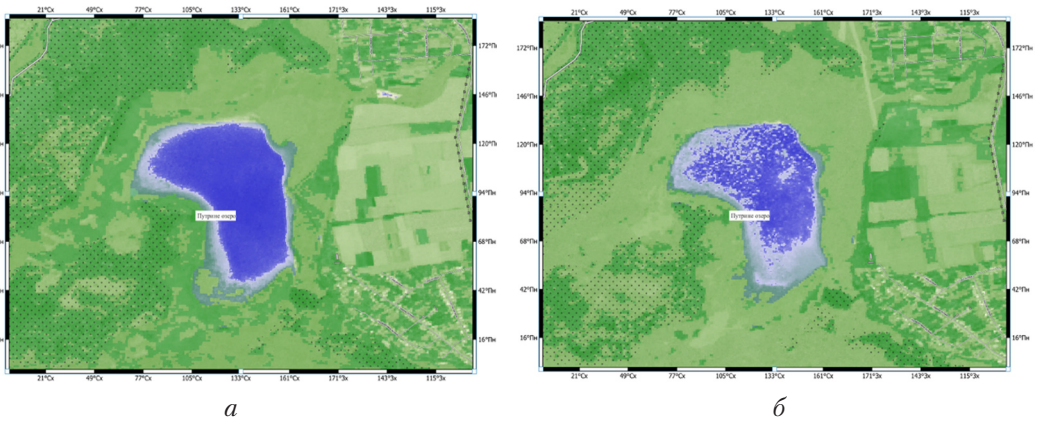


Рис. 11. Просторовий розподіл значень NDWI (оз. Путрене) 2016 р.:
a – 4 листопада 2016 р.; *б* – 7 листопада 2024 р.

Примітка: побудовано авторами за допомогою програми QGIS [23] за даними супутника Sentinel-2.

поверхні 1,5 км². Протягом восьмирічного періоду відбулися критичні зміни: у 2024 р. (рис. 11, б) спостерігається значне зменшення загальної глибини озера, внаслідок чого площа водної поверхні скоротилася до 1,3 км² (зменшення на 13,3%). Такі масштабні зміни водної поверхні є прямим індикатором загального обміління водойми, спричиненого, ймовірно, комбінацією

кліматичних змін та антропогенного впливу за досліджуваний період.

Процеси посухи обумовлені синергетичним впливом трьох ключових чинників: загального потепління клімату, інтенсифікації експлуатації водних ресурсів у промисловості та сільському господарстві, а також зростання споживчих потреб унаслідок технологічного розвитку. Ці

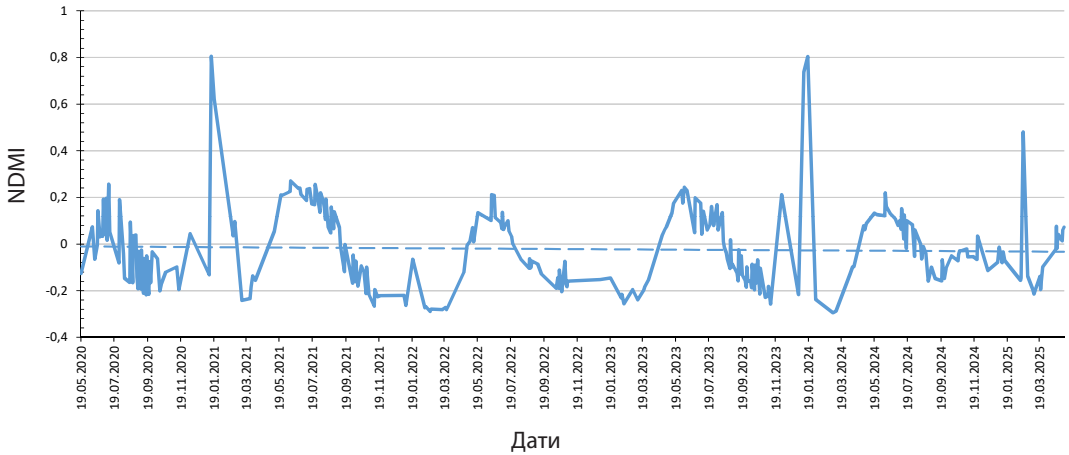


Рис. 12. Динаміка індексу NDMI впродовж 5 років (2020–2025 рр.) на території Одеської обл.

Примітка: створено авторами за допомогою платформи EO Browser за даними супутника Sentinel-2.

взаємопов’язані чинники створюють каскадний ефект, який призводить до критичного дефіциту водних ресурсів для забезпечення сталого розвитку.

Індикатором кліматичного впливу на агроландшафти постає динаміка вологозабезпечення рослинного покриву, яка може бути кількісно оцінена через аналіз індексу NDMI. Дослідження проводилось на основі даних супутника Sentinel-2 за період 2020–2025 рр. в Одеській обл. з використанням QGIS та платформи EO Browser. П’ятирічний аналіз динаміки індексу

NDMI (*рис. 12*) виявив стійку негативну тенденцію зниження вологозабезпечення рослинного покриву. Це прямий наслідок зростання температури поверхні в Одеській обл. впродовж 2005–2025 рр. (*див. рис. 10*).

Порівняльний аналіз супутникових знімків сільськогосподарських угідь Ширяївського району за 06.06.2021 р. (*рис. 13, а*) та 10.06.2024 р. (*рис. 13, б*) демонструє візуальне підтвердження загального зменшення вологості в сільськогосподарських рослинах.

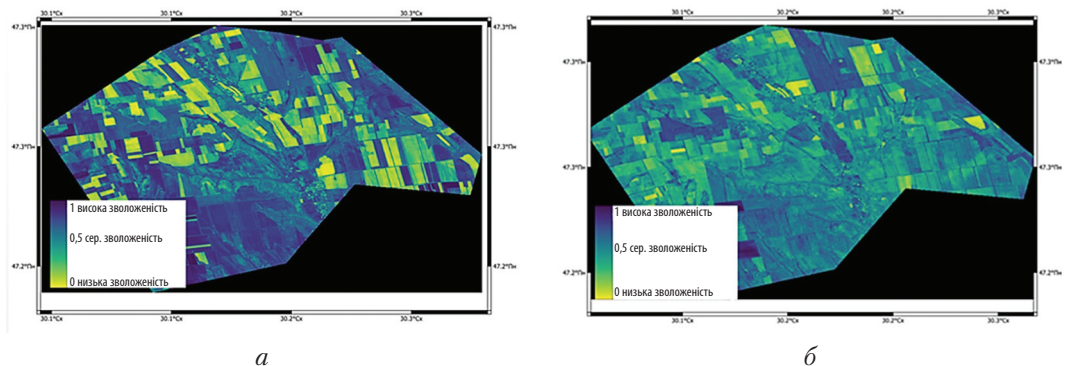


Рис. 13. Просторовий розподіл NDMI пілоїтної території Ширяївського р-ну Одеської обл. за знімками супутника Sentinel-2: *а* – за 06.06.2021 р.; *б* – за 10.06.2024 р.

Примітка: створено на основі даних, отриманих за допомогою бази даних Copernicus Browser [16].

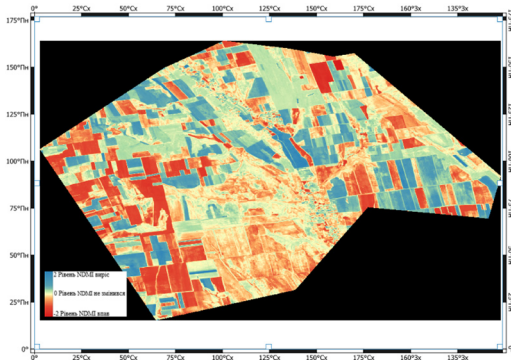


Рис. 14. Просторовий розподіл змін вмісту вологи в рослинах за індексом NDMI пілотної території Ширяївського р-ну Одеської обл. за 2021–2024 рр.

Примітка: отримано з використанням програми QGIS [23].

Картографічне представлення різниці рівнів NDMI за 2021–2024 рр. (рис. 14) просторово верифікує посилення посушливих умов, що корелює зі зменшенням середньомісячної кількості опадів (див. рис. 9).

Тому, встановлено комплексний механізм деградації вологозабезпечення: кліматичні зміни ініціюють підвищення температури, що призводить до інтенсифікації випаровування та результує у зниженні вологовмісту рослинного покриву, підтверженому супутниковими даними NDMI.

ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень із використанням супутникових даних та ГІС-технологій можна зробити висновок щодо наявності на території України ознак кліматичних змін, які відображаються на природних об'єктах, сільськогосподарському секторі та екосистемах.

Аналіз супутникових даних AIRS за період 2010–2025 рр. виявив стійку тенденцію до підвищення температури поверхні землі. Характерними особливостями температурної динаміки є зростання частоти та інтенсивності екстремальних температурних явищ, пом'якшення зимових умов із підвищенням мінімальних температур-

них значень, зменшення амплітуди температурних коливань.

Дослідження динаміки вегетаційного індексу NDVI на території Рівненської обл. за 2020–2024 рр. засвідчило прогресивне збільшення показників NDVI від 0,63 у 2022 р. до 0,79 у 2024 р., загальне подовження вегетаційного циклу за рахунок більш раннього початку вегетаційного циклу і більш пізнього завершення вегетації, що свідчить про адаптацію рослинного покриву до нових кліматичних умов зміщення.

Продемонстровано прямий зв'язок між кліматичними змінами, які виявляються у вирівнюванні кліматичних умов внаслідок підвищення зимових температур та розширенням ареалів інвазійних видів на прикладі динаміки розповсюдження *Potamopyrgus antipodarum*.

Визначено ознаки посилення посушливих умов, які впливають на стан водних об'єктів і рослинного покриву за аналізом динаміки водних індексів NDWI та NDMI. Показано загальне обміління водних об'єктів, стійку тенденцію до зниження вологозабезпечення рослинного покриву, зменшення середньомісячної кількості опадів за збільшення частоти екстремальних опадів.

Дослідження проведено з використанням ГІС-технологій, супутникових засобів спостереження та збору даних у вигляді баз даних Giovanni, Copernicus та EO BROWSER, що демонструє можливості активного залучення засобів ДЗЗ для вивчення кліматичних змін та наслідків їх впливу на довкілля.

Комплексний аналіз супутникових даних за період 2010–2025 рр. неспростовно підтверджує наявність значущих кліматичних змін на території України. Виявлені тенденції – підвищення температури, трансформація вегетаційних циклів, поширення інвазійних видів та деградація водних ресурсів – вимагають негайного впровадження адаптаційних заходів та комплексної стратегії управління природними ресурсами. Застосування технологій дистанційного зондування Землі відкриває нові можливості для ефективного моніто-

рингу та прогнозування екологічних змін, що є критично важливим для забезпечення

сталого розвитку України в умовах глобальних кліматичних викликів.

ЛІТЕРАТУРА

- Liu, Y., Tian, J., Liu, R., & Ding, L. (2021). Influences of Climate Change and Human Activities on NDVI Changes in China. *Remote Sensing*, 13(21), 4326. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13214326>.
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis report. Summary for policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.
- Arfasa, G., Owusu-Sekyere, E., & Doke, D. (2023). Climate Change Projections and Impacts on Future Temperature, Precipitation, and Stream flow in the Vea Catchment, Ghana. *Environmental Challenges*, 14, 100813. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envc.2023.100813>.
- Шевченко, О. В., & Балабук, В. О. (2024). Вплив зміни клімату на природно-сільськогосподарське районування території України. *Екологічні науки*, 5(56), 222–231. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.34>.
- Polevoy, A., Kostiukeyevych, T., Tolmachova, A., & Zhygailo, O. (2021). The impact of climatic changes on forming the corn productivity in the western forest-steppe of Ukraine. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 25(1), 29–36. DOI: [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1\(109\)-4](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1(109)-4).
- Raichuk, L., Shvydenko, I., & Kuchma, T. (2024). Climatic risks and forest ecosystems: the interaction between deforestation and climate change. *Збалансоване природокористування*, 2, 56–62. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2024.309922>.
- Zhong, Y., Xue, Z., Davis, C. C., Moreno-Mateos, D., Jiang, M., Liu, B., & Wang, G. (2022). Shrinking habitats and native species loss under climate change: A multifactorial risk assessment of China's inland wetlands. *Earth's Future*, 10, e2021EF002630. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021EF002630>.
- Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Turubanova, S., ... Komareddy, A. (2022). The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results. *Frontiers in Remote Sensing*. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903>.
- Global Land Project: Science Plan and Implementation Strategy. *UNT Digital Library*. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12009>.
- Copernicus Land Monitoring Service. *Copernicus Land Monitoring Service*. URL: <https://land.copernicus.eu/en>.
- Eisfelder, C., Asam, S., Hirner, A., Reiners, P., Holzwarth, S., Bachmann, M., ... Kuenzer, C. (2023). Seasonal Vegetation Trends for Europe over 30 Years from a Novel Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) Time-Series-The TIMELINE NDVI Product. *Remote Sensing*, 15(14), 3616. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15143616>.
- Rani, S., Singh, S., & Purohit, S. (2024). Evaluating Daytime and Nighttime Land Surface Temperature Pattern and Trends in India: A Comparative Analysis of Satellite and Reanalysis Data. *Earth Systems and Environment*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00555-1>.
- NASA. *AIRS Project: AIRS Instrument Suite overview*. NASA Jet Propulsion Laboratory. URL: <https://airs.jpl.nasa.gov/>.
- Barnet, C. (2019). *Sounder SIPS: AQUA AIRS IR-only Level 3 CLIMCAPS: Comprehensive Quality Control Gridded Daily V2*, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). DOI: <https://doi.org/10.5067/BZBZA32DWAPN>.
- NASA. *Giovanni: NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center*. URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
- European Space Agency. (2025). *EO Browser. Copernicus Open Access Hub*. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>
- Jutz, S., & Milagro-Pérez, M. P. (2018). 1.06 — Copernicus Program, Editor(s): Shunlin Liang, *Comprehensive Remote Sensing, Elsevier*, 150–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10317-3>.
- Olmos-Trujillo, E., González-Trinidad, J., Júnez-Ferreira, H., Pacheco-Guerrero, A., Bautista-Capetillo, C., Avila-Sandoval, C., & Galván-Tejada, E. (2020). Spatio-Temporal Response of Vegetation Indices to Rainfall and Temperature in A Semiarid Region. *Sustainability*, 12(5), 1939. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12051939>.
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, 8(4), 354. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8040354>.
- Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні. Сер.: Conservation Biology in Ukraine*. (2023). (Вип. 29). Київ–Чернівці: Друк Арт. URL: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2023/06/2_Chuzhoridni_20.06_compressed.pdf.
- Satellite Applications and Research of NOAA's National Environmental Satellite Data Information Services. URL: <http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/>.
- Tarariko, O. H., Cruse, R. M., Iliencko, T. V., Kuchma, T. L., Kozlova, A. O., Anderiev, A. A., ... Velychko, V. A. (2024). Impact of climate changes on agrosources of Ukrainian Polissia based on geospatial data. *Agricultural Science and Practice*, 11(2), 3–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/agrisp11.02.003>.
- QGIS Development Team. (n.d.). *QGIS Geographic Information System* (Ver. 3.34) [Computer software]. Open Source Geospatial Foundation.

24. Аністратенко, О. Ю., Дегтяренко, О. В., Аністратенко, В. В., & Фурик, Ю. І. (2023). Чужорідні види молюсків в континентальних водоймах України: від першої реєстрації до теперішнього часу. *Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні. Сер.: Conservation Biology in Ukraine*, 29, 15–25. URL: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2023/06/2_Chuzhoridni_20.06_compressed.pdf.
25. Дегтяренко, О., Антоновський, О., & Аністратенко, В. (2019). Нові дані щодо видового складу молюсків Шацьких озер. У *Фауна України на межі ХХ–ХХІ ст. Стан і біорізноманіття екосистем природоохоронних територій: Матеріали Міжнарод. зоологічної конф., присвяченої 220 річниці від дня народження О. Завадського* (с. 64–66). Львів: СПОЛОМ. URL: https://bioweb.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/09/Zbirnyk-SHats-k-2019_-1.pdf.
26. Дегтяренко, О. В., Антоновський, О. Г., & Аністратенко, В. В. (2021). «Пандемія» червоногого молюска *Potamopyrgus antipodarum* (Gray, 1843) в Українському Поліссі. У *Зоологія в сучасному світі: виклики ХХІ століття* (с. 71). Київ. URL: <http://mail.izan.kiev.ua/IZAN90-abstracts.pdf>.
27. ERA5 ECMWF/Copernicus Climate Change Service. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_MONTHLY#description.
28. Sanchez, C., Mena, F., Charfuelan, M., Nuske, M., & Dengel, A. (2024). Assessment of Sentinel-2 Spatial and Temporal Coverage Based on the Scene Classification Layer, *IGARSS 2024 — 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 4099–4103). Athens, Greece, DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10642213>.

Стаття надійшла до редакції журналу 10.06.2025
