



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.258>

УДК 528.8:551.58

Моделювання вразливості степової ландшафтно-кліматичної зони України до кліматичних змін на основі даних космічного знімання

М. С. Лубський, А. В. Хижняк*, Т. А. Орленко

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Зараз весь світ, і також Україна, стикається з однією зі складних екологічних проблем – кліматичними змінами. Степова ландшафтно-кліматична зона є однією з територій, які вважаються найбільш чутливими до поточних і майбутніх загроз зміни клімату на території України. Вивчення вразливості до зміни клімату степової зони України на основі даних космічного знімання потребує аналізу великої кількості об’єктивних даних, а саме продуктів обробки даних дистанційного зондування. У статті викладено результати, які об’єднують методи дистанційного зондування, геоінформаційної системи та багатокритеріальний аналіз рішень для виявлення вразливих територій від впливу зміни клімату в степовій ландшафтно-кліматичній зоні, щоб рекомендувати системи адаптації до сучасних умов та зменшити вплив негативних кліматичних змін. Запропонована структура ухвалення рішень була розроблена в три етапи: 1) збір і обробка доступних даних космічних знімків; 2) розробка моделі вразливості до зміни клімату степової ландшафтно-кліматичної зони України на основі методу аналізу ієрархій; 3) побудова результуючої карти, яка включає ступені вразливості до змін клімату досліджуваної території. Сучасні засоби хмарної обробки даних космічного знімання надають доступ до великої кількості геоінформаційних продуктів, серед яких як характеристики земної поверхні, так і просторовий розподіл кліматичних показників, накопичених за тривалий період часу, та можливість оперативно реалізувати обробку цих даних для великих територій.

Ця методика дає змогу на основі експертних оцінок оцінити сукупний вплив найбільш значущих характеристик земної поверхні та регіонального клімату, пріоритизувати їх вплив на вразливість досліджуваної території до кліматичних змін та реалізувати її кількісну багатокритеріальну оцінку.

Ключові слова: геопросторове моделювання, космічне знімання, вразливість до змін клімату, багатокритеріальний аналіз, метод аналізу ієрархій, степова зона.

© М. С. Лубський, А. В. Хижняк, Т. А. Орленко. 2024

Вступ

Степова ландшафтно-кліматична зона є обширною рівнинною ділянкою на півдні та сході України, що охоплює приблизно 40% території держави. Степову зону України поділяють на три великі підзони: північностепова, середньостепова та південностепова, які, своєю чергою, поділяються на менші підзони: Дністровсько-Дніпровська, Лівобережно-Дніпровська, Приазовська, Донецька, Степовий Крим. Кожна підзона виділяється регіональними особливостями, обумовленими місцевим кліматом, рельєфом, близькістю до морського узбережжя, річковою мережею і тощо (Baitsar, 2012).

Фізико-географічні та кліматичні умови регіону створили сприятливі умови для біо- та ландшафтного різноманіття. В межах Українського степу розташована велика кількість об’єктів природно-заповідного фонду, серед яких національний природний парк “Олешківські піски”, Нижньодніпровський національний природний парк, три з п’яти українських біосферних заповідників: Асканія-Нова, Чорноморський, Дунайський та десятки

природних парків та заказників. Це обумовлено великим різноманіттям цінних та ендемічних видів флори та фауни, а також ландшафтних утворень, які потребують законодавчого захисту та бережливого ставлення.

При цьому степова зона України є дуже вразливою для різних природних та антропогенних викликів, які порушують стійкість, підвищують вразливість екосистем регіону та призводять до їх деградації або повного знищення.

Основні загрози для екосистем степової ландшафтно-кліматичної зони України:

сільське господарство – більше 80% степової зони припадають на сільськогосподарські угіддя (Baitsar, 2012), в межах степової зони розвинена розгалужена система меліоративних каналів, пов’язаних із дніпровськими водосховищами, збудованих для забезпечення потреб сільського господарства, у зв’язку з тим, що кліматичними умовами не забезпечено достатню кількість вологи території;

кліматичні зміни – кліматичні спостереження вказують на стійку тенденцію підвищення глобальних середньорічних температур повітря, що

*E-mail: avsokolovska@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8637-3822>

найбільше впливає на вразливі ландшафтно-кліматичної зони, до яких належать степи;

воєнні дії – повномасштабне російське вторгнення серед багатьох інших воєнних злочинів призвело до катастрофічних наслідків для степових екосистем та об'єктів природно-заповідного фонду, зокрема, руйнування греблі Каховської ГЕС призвело до повного затоплення Нижньодніпровського національного природного парку та двох біосферних заповідників Чорноморський та Асканія-Нова, які знаходяться на окупованих територіях.

Оцінка вразливості землі до деградації відіграє вирішальну роль у визначенні пріоритетів і плануванні політики нейтральності деградації землі (Feng et al., 2022). Для моделювання деградації землі та оцінювання території необхідно визначити різні важливі фактори, такі як рельєф, клімат, ґрунт і моделі землекористування. Для оцінювання деградації землі було розроблено кілька методів, але геопросторові методи замінили трудомісткі та дорогі традиційні дослідження, насамперед в місцях, стан яких важко оцінити (Wang et al., 2008).

Отже, метою статті є висвітлення результатів моделювання вразливості до зміни клімату степової ландшафтно-кліматичної зони України на основі даних космічного знімання.

Супутникові зображення високої просторової розрізненості можуть забезпечити надійне та послідовне оцінювання впливу типів деградації земель, їх темпи та несприятливі наслідки, що виникають, за допомогою економічних розрахунків (De Oliveira et al., 2022, Uchida, 2015). Багаторічне накопичення даних дистанційного зондування земної поверхні та їх інтерпретація у вигляді фізично обґрунтованих характеристик земного покриття в сукупності з кліматичними даними дає змогу виявити динаміку негативних процесів (опустелювання, осушення, зниження рівня зволоження ґрунту) на земній поверхні та реалізувати геопросторову оцінку ризиків їх посилення, застосовуючи одну з багатьох методик комплексування відібраних геопросторових даних. Існуючі бази даних та хмарні сервіси обробки дають змогу оперативно обробляти гетерогенні дані з різними просторовими та спектральними характеристиками, що значно спрощує та пришвидшує виконання геопросторового моделювання.

Деградація земель на певному рівні вивчається за допомогою багатьох методів, таких як моделі машинного навчання (Kruschke, 2014, Odum & Odum, 2000), просторовий аналіз за допомогою ГІС (AbdelRahman, 2019), аналіз часових рядів і тенденцій (Asgari, & Soleimany, 2023, Zhou et al., 2023), тощо.

Одним із найбільш можливих варіантів оцінювання та картографування деградованих земель є інтеграція методу багатокритеріального аналізу рішень (БКАР) з геопросторовими методами. Це дає змогу розбити складну проблему на розділи з подальшим вирішенням, а потім інтегрувати кожен розділ для отримання остаточного результату/рішення. Метод аналізу ієрархій (MAI), вперше розроблений Сааті (Saaty, 1980), є одним із методів

БКАР, який використовується для відображення геоекологічної вразливості територій (Kılıc, et al., 2022, Singh et al., 2024). MAI є добре структурованою та загальноприйнятою технікою прийняття рішень. Багато дослідників використовували MAI та геопросторові методи для оцінювання та картографування вразливості земель до деградації (Wei-dong, 2009).

Реалізація геопросторового моделювання стану степової зони України є важливою для виявлення найбільш уражених деградаційними процесами територій та ключових індикаторів деградаційних процесів. Це дасть змогу розробляти ефективні заходи щодо відновлення екосистем та ландшафтів для конкретних територій та регіональні стратегії сталого землекористування.

1. Опис досліджуваної території

Степова зона України розташована на південному заході країни, займаючи 25 млн га або 39% території. Вона простягається з північного заходу на північний схід на 1100 км та з півночі на південь до 500 км. Охоплює відразу кілька областей та АР Крим. Ця зона поділяється на північностепову, середньостепову та південностепову підзони, залежно від інсоляції та вологості ґрунтів.

Сільськогосподарські угіддя степу займають 16.4 млн га, з яких 13.3 млн га – рілля. Для цієї зони характерною є нестача опадів, яких випадає менше ніж випаровується, що призводить до масштабних посух. Статистика 2019 року показує різницю в показниках між північним та південним степами.

Територія степу майже рівнинна, а ґрунти складаються переважно з лесових порід та суглинків. Лісова площа в цій зоні невелика – близько 0,6%. Клімат в степу визначається західними морськими повітряними масами з Атлантики та сухими континентальними повітряними масами. Температури змінюються залежно від широти, а річкова мережа степу бідна через нестачу опадів.

Лісистість та рослинність степу змінюються від півночі до півдня, з переважанням різнотравного степу на півночі до сухих степів на півдні. Наразі сільськогосподарські угіддя займають 82% степової зони, що призвело до значної втрати площ природного рослинного покриття.

Вразливість степової ландшафтно-кліматичної зони пояснюється загальною чутливістю аридних ландшафтів до кліматичних та антропогенних впливів (Laity, 2008). Протягом останніх десятиліть проблема деградації природних екосистем поглиблюється через глобальні кліматичні зміни, які мають відчутний вплив на території України. Наслідки кліматичних змін проявляються через фізико-кліматичні показники, такі як середня глобальна температура повітря, кількість опадів, об'єм річкового стоку та випаровуваність. Ці показники напряму впливають на аридизацію ландшафтів та інші деградаційні процеси (UNEP, 1994).

Температура атмосферного повітря є основним показником, що визначає глобальний клімат. 2023 рік став найтеплішим за всю історію

метеоспостережень, із середньою температурою на 1,43°C вище середнього значення доіндустріального періоду (Cuff, 2023). Глобальне потепління, спричинене антропогенною діяльністю, призвело до підвищення глобальної температури земної поверхні на 1,1°C (Core Writing Team et al, 2023). Продовжуючи зростати, викиди парникових газів спричиняють глобальне потепління, що призводить до нерівномірного розподілу опадів та вологості ґрунтового покриву. Згідно з кліматичними моделями, підвищення температури на 1,5°C може призвести до збільшення кількості опадів у деяких зонах та різкого зменшення в інших (Masson-Delmotte et al, 2021).

Таким чином, проблема змін клімату має складний характер та призводить до негативних соціальних та економічних наслідків, таких як зростання рівня моря, зниження біорізноманіття, посилення посухи, змін водного балансу та інші. Український степ, як вразлива ландшафтно-кліматична зона, дуже піддається впливу цих процесів.

Сумісна дія антропогенних та природних факторів вже призвела до значних змін в Українському степу, таких як зникнення природних ландшафтів та їх заміщення сільськогосподарськими. Дослідження та моделювання таких територій потребують багаторічних даних із просторового розподілу різних характеристик земної поверхні.

Територія дослідження, в межах якої реалізовано моделювання, охоплює області, які повністю або частково належать до зони степу: Одеська, Кіровоградська, Миколаївська, Дніпропетровська, Запорізька, Донецька, Луганська та Автономна Республіка Крим (Рис. 1).



Рис. 1. Межі території дослідження

2. Матеріали та методи

2.1. Збір та обробка даних

Під час комплексних геоінформаційних досліджень потребується залучення багатьох типів даних різного походження з відмінними геопросторовими характеристиками. Тому виникає потреба в роботі з багатьма геоінформаційними сервісами-постачальниками даних, довготривалому відборі та завантаженні даних, їх попередній обробці та приведенні до єдиних геопросторових характеристик (просторова розрізненість, фізичні величини та ін.)

З розвитком інформаційних технологій були розроблені системи агрегування великої кількості

різномірних геоінформаційних даних у комплексі з документацією за їх ключовими характеристиками та метаданими в сукупності з інструментарієм для їх обробки, огляду, завантаження та інтерпретації. Хмарна реалізація таких систем не потребує спеціалізованого програмного забезпечення для обробки геоданих, внутрішньої пам'яті для збереження даних та обчислювальної потужності комп'ютера для здійснення обчислювальних операцій. Такі платформи дають змогу оперативної обробляти великі масиви даних для великих територій без обмежень, притаманних типовим програмним середовищам обробки геоданих (Asgari & Soleimany, 2023, Gorelick et al, 2017).

У контексті моделювання стану степової ландшафтно-кліматичної зони розглянуто дві ключові групи даних: зміна земної поверхні та кліматичні показники.

У світовій практиці кількісна оцінка негативних змін земного покриву у вигляді деградації землі, що потребує просторово розподілених цифрових індикаторів деградації, специфічних для досліджуваного регіону. “2030 Agenda for Sustainable Development” (“Порядок денний сталого розвитку до 2030 року”) (Giuliani et al, 2020) встановив кілька субіндикаторів деградації земель, що стосуються цілей сталого розвитку, якими є (Thomas, 2023):

типи земного покриву та землекористування (описує та класифікує різні способи використання землі та типи поверхневого покриву, що наявні в певній місцевості);

продуктивність рослинності (представлена специфічними спектральними індексами рослинності); ґрунтовий органічний вуглець (одна з ключових властивостей ґрунтів у контексті біопродуктивності).

У цьому дослідженні було використано шість геоінформаційних продуктів для оцінювання вразливості території степової зони до змін клімату, їх опис наведений в Табл. 1.

Таблиця 1. Перелік геоінформаційних продуктів, використаних у дослідженні

Продукт	Назва продукту	Період отримання / просторова розрізненість (м)
Температура земної поверхні	MOD21C2.061 Terra Land Surface Temperature and 3-Band Emissivity 8-Day L3 Global 0.05 Deg CMG (та відповідний продукт супутника Aqua)	2001 р. – дотепер / 1000 м
Індекс вологості земної поверхні	SPL3SMP_E.005 SMAP L3 Radiometer Global Daily 9 km Soil Moisture	2015 р. – дотепер / 9000 м
Вегетаційний індекс NDVI	MOD13Q1.061 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m (та відповідний продукт супутника Aqua)	2015 р. – дотепер / 250 м
Класифікація земної поверхні	MCD12Q1.061 MODIS Land Cover Type Yearly Global 500m	2001 р. – дотепер / 250 м
Сумарні опади	ERA5-Land Monthly Averaged by Hour of Day – ECMWF Climate Reanalysis	1950 р – дотепер / 11132 м
Рівень сонячної радіації	ERA5-Land Monthly Averaged by Hour of Day – ECMWF Climate Reanalysis	1950 р – дотепер / 11132 м

Дослідження проводилось на основі даних за 2022 рік, оскільки на момент роботи з даними не було даних класифікації земної поверхні за 2023 рік. Температура земної поверхні, вологість земного покриву та вегетаційний індекс NDVI обчислені за вегетаційний період (травень–вересень), інші показники (дані класифікації, опадів та рівень сонячної радіації – середньорічні).

Для оцінювання вразливості території до кліматичних змін дані всіх геоінформаційних продуктів були розділені на 5 рівнів (від 1 – низький рівень вразливості до 5 – дуже високий рівень вразливості) залежно від відхилення від сезонної норми показника (для рівня сонячної радіації – норма 1250–1450 Вт/м², температури земної поверхні

– норма 22–29 °С, рівня кількості опадів – норма 400–700 мм на рік. При зниженні показника опадів відносно встановленої норми та перевищенні показників температури земної поверхні та рівня сонячної радіації відносно норми підвищується рівень вразливості. Для коефіцієнта NDVI та показника вологості ґрунту при їх зниженні рівень вразливості підвищується. Для даних класифікації відібрані класи земної поверхні, розподілені за їх вразливістю (наприклад, ліси, водні поверхні мають найнижчий рівень вразливості, оголені, еродовані ґрунти – найвищий). Детальний опис розподілу кожного класу вразливості наведений в Табл. 2.

Таблиця 2. Співвідношення значень кожного із геоінформаційних продуктів та відповідних рівнів вразливості земної поверхні до кліматичних змін

Назва параметра	Класи параметра	Значення класів
Температура земної поверхні	1. Норма 2. Незначне відхилення від норми 3. Перевищення норми 4. Суттєве перевищення норми 5. Сильне перевищення норми	1. 22–29 °С 2. до 20 °С та 29–32 °С 3. 32–35 °С 4. 35–38 °С 5. Більше 38 °С
Індекс вологості земної поверхні	1. Достатній рівень зволоженості 2. Помірно низький рівень вологості 3. Низький рівень вологості 4. Дуже низький рівень вологості 5. Критично низький рівень вологості	1. Більше 0,25 2. 0,15–0,25 3. 0,1–0,15 4. 0,05–0,1 5. Менше 0,05
Веgetаційний індекс NDVI	1. Густа рослинність, ліси, водна поверхня 2. Густий рослинний покрив 3. Помірний рослинний покрив 4. Відкритий ґрунт 5. Штучні матеріали, водні об'єкти	1. Більше 0,65 або водна поверхня 2. 0,55–0,65 3. 0,45–0,55 4. 0,4–0,45 5. Менше 0,3
Класифікація земної поверхні	Залежно від класу	1. Ліси, водна поверхня, постійні водно-болотні угіддя 2. Густі луки 3. Розріджені луки, чагарники 4. Урбанізовані території, сільськогосподарські угіддя 5. Відкриті ґрунти та оголені породи
Сумарні опади	1. Достатня кількість опадів 2. Незначне відхилення від норми 3. Слабкий прояв посушливості 4. Посуха 5. Сильна посуха	1. 400–700 мм 2. 320–400 мм та 700–850 мм 3. 270–320 мм та більше 850 мм 4. 240–270 мм 5. Менше 240 мм
Рівень сонячної радіації	1. Достатній рівень радіації 2. Незначне відхилення від норми 3. Відхилення від норми 4. Сильне відхилення від норми 5. Дуже сильне відхилення від норми	1. 1250–1450 Вт/ м ² 2. Менше 1250 Вт/ м ² та 1450–1500 Вт/ м ² 3. 1500–1550 Вт/ м ² 4. 1550–1600 Вт/ м ² 5. більше 1600 Вт/ м ²

2.2. Метод аналізу ієрархії

Моделювання процесів виявлення територій, вразливих до впливу змін клімату, досі є не лише технологічною, але й концептуальною та методологічною проблемою. Процеси часто є динамічними та просторово розподіленими, взаємодіють у різних просторових та часових межах, включно з впливом антропогенної діяльності.

Метод багатокритеріального аналізу рішень за допомогою техніки аналітичного ієрархічного процесу є найбільш популярним і відомим способом

визначення вразливості ґрунтів до деградації (Kilic et al., 2023). МАІ є теорією оцінювання попарних порівнянь, де для порівняння параметрів між собою використовується шкала відносної важливості за Сааті (Табл. 3) (Masson-Delmotte et al., 2021). Нам потрібні порівняння та шкала чисел, що вказують, наскільки важливий один параметр порівняно з іншим з урахуванням критерію порівняння, щоб зробити організовані висновки про пріоритети.

Таблиця 3. Шкала Сааті (1–9) для попарного порівняння експертних суджень

Ступінь важливості	Значення	Пояснення
1	однакова важливість	Порівнювані альтернативи мають однакову важливість
3	слабка перевага	Досвід і судження експерта дають змогу незначною мірою віддати перевагу важливості одній альтернативі над іншою
5	сильна перевага	Досвід і судження експерта дають змогу віддати перевагу важливості одній альтернативі над іншою
7	очевидна (дуже сильна) перевага	Важливість однієї альтернативи очевидно переважає над іншими
9	абсолютна перевага	Докази, які свідчать про перевагу однієї альтернативи над іншою, мають найвищий можливий ступінь важливості
2,4,6,8	проміжні значення	Коли потрібен компроміс між двома сусідніми судженнями

Для перевірки рішення про попарне порівняння різних тематичних шарів та їх підкласів використовувався коефіцієнт узгодженості (CR). Для розрахунку CR було використано таке рівняння:

$$CR = \frac{CI}{RCI},$$

де RCI – індекс випадкової узгодженості, для розрахунку його значень використовуються стандартні дані за Сааті (Табл. 4); CI – індекс узгодженості, який розраховується за допомогою такого рівняння:

$$CI = \frac{(\gamma_{\max} - n)}{(n - 1)},$$

де γ_{\max} – головне власне значення, n – загальна кількість вхідних шарів, що використовуються при оцінюванні.

Таблиця 4. Індекс випадкової узгодженості Сааті

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RCI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

N – порядок матриці, RCI – індекс випадкової узгодженості.

У зваженому аналізі, використовуючи МАІ, допустиме значення $CR = 0,10$. Якщо CR перевищує 0,10, експертні оцінки слід переглянути.

2.3. Створення карти вразливості до деградації досліджуваної території

Тематичні шари та їхні підкласи отримали в ArcGIS ваги на основі МАІ, щоб окреслити зони вразливості досліджуваної території до змін клімату. Карту, яка включає ступені вразливості до змін клімату досліджуваної території, у цьому дослідженні було створено за допомогою такого рівняння:

$$VCC = NDVI_{Cwi} \times NDVI_{SCwi} + PR_{Cwi} \times PR_{SCwi} + LST_{Cwi} \times LST_{SCwi} + SM_{Cwi} \times SM_{SCwi} + LULC_{Cwi} \times LULC_{SCwi} + R_{Cwi} \times R_{SCwi},$$

де $NDVI$ – нормалізований індекс рослинності, PR – середньорічна кількість опадів, LST – температура поверхні землі, SM – вологість земної поверхні, $LULC$ – класифікація земної поверхні, R – середньорічне значення сонячної радіації; Cwi та $SCwi$ є вагою класу та вагою підкласу, відповідно. В результаті карту ступенів вразливості (VCC) було розділено на п'ять класів, а саме: дуже низький, низький, помірний, високий і дуже високий, використовуючи квантильні розриви в ArcGIS.

3. Результати та обговорення

3.1. Аналіз розподілу характеристик земної поверхні на основі оброблених геоінформаційних продуктів

2022 рік – один із найспекотніших за історію метеоспостережень (Ravilious, 2023), що відобразилось на поверхневій температурі в літній період, тому майже половина території (47%) потрапила до зони перевищення норми (південь України та північний Крим), а значна частина Запорізької, Миколаївської, Херсонської та Одеської областей (загалом 15%) у зону значного перевищення температури (Рис. 2).

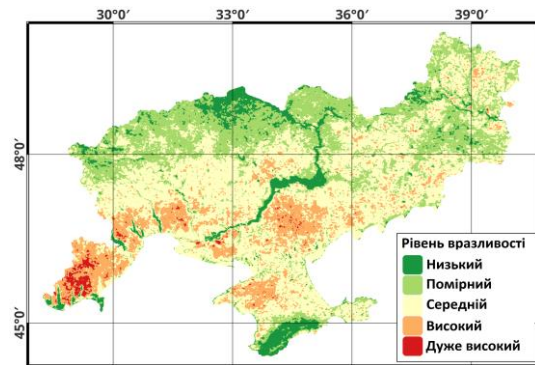


Рис. 2. Картоschema розподілу рівня вразливості степової ландшафтно-кліматичної зони до кліматичних змін на основі даних середньої поверхневої температури за травень–вересень 2022 р. (дані MODIS)

Через високі температури вологість ґрунтів також була порівняно низькою, лише 22% досліджуваної території були в зоні достатньої та помірної зволоженості. Південь та частина сходу потрапили в зону суттєвої нестачі зволоженості, 25% території постраждали від дуже суттєвої посушливості ґрунтового покриття (Рис. 3).

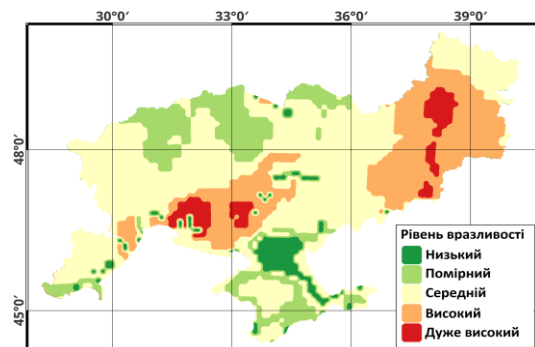


Рис. 3. Картоschema розподілу рівня вразливості степової ландшафтно-кліматичної зони до кліматичних змін на основі даних вологості ґрунту за травень–вересень 2022 р. (дані SMAP)

Розподіл рівня вразливості досліджуваної території на основі даних індексу *NDVI* достатньо сильно корелює з даними поверхневої температури, що підтверджує взаємозв'язок між густиною рослинності та її охолоджуючим ефектом навіть на великих масштабах. Загалом відзначено, що 48% території впродовж досліджуваного періоду було вкрито густою рослинністю, незважаючи на дуже низьку лісистість. Найнижчі значення *NDVI* та, відповідно, низьку густину рослинного покриву відзначено в Запорізькій, Миколаївській, Херсонській та Одеській областях. Площа найбільш вразливих територій на основі оцінювання розподілу значень вегетаційного індексу становила 18% (Рис. 4).

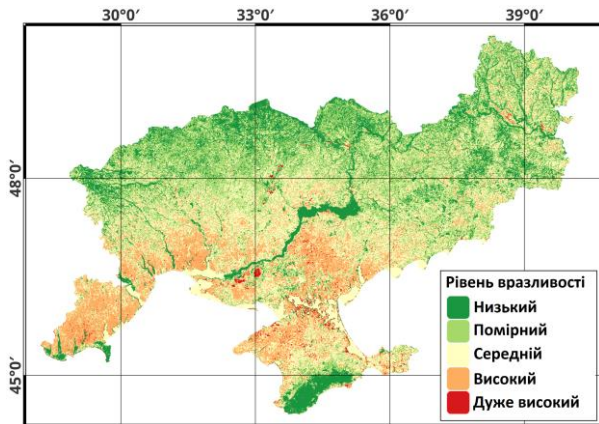


Рис. 4. Картошка розподілу рівня вразливості степової ландшафтно-кліматичної зони до кліматичних змін на основі даних вегетаційного індексу *NDVI* за травень–вересень 2022 р. (дані MODIS)

Дані класифікації земної поверхні показали, що лише 14% вкриті класами, які не сприяють або слабо сприяють вразливості до кліматичних змін. Через активне ведення сільського господарства, 85% території степової зони є дуже нестійкими до кліматичних змін (Рис. 5).

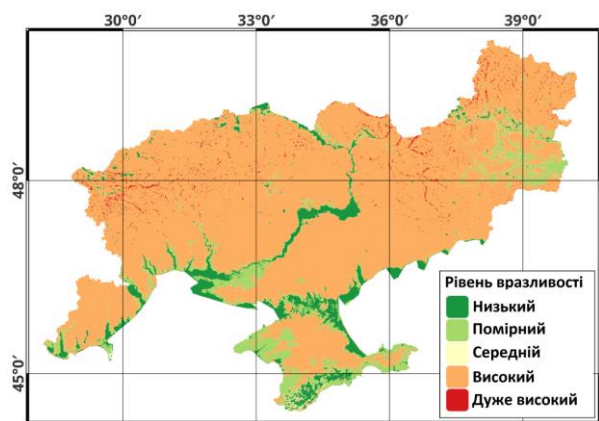


Рис. 5. Картошка розподілу рівня вразливості степової ландшафтно-кліматичної зони до кліматичних змін на основі даних класифікації земної поверхні за 2022 р. (дані MODIS)

Аналіз даних розподілу сумарних річних опадів за 2022 рік показав, що більша частина досліджуваної території отримала достатню кількість опадів, яка знаходиться в межах середньорічної норми, тобто в межах 400–700 мм (73% досліджуваної території).

Недостатню кількість опадів отримала прибережна частина Одеської області, насамперед на півдні, де кількість опадів виявилась менше 300 мм (Рис. 6).

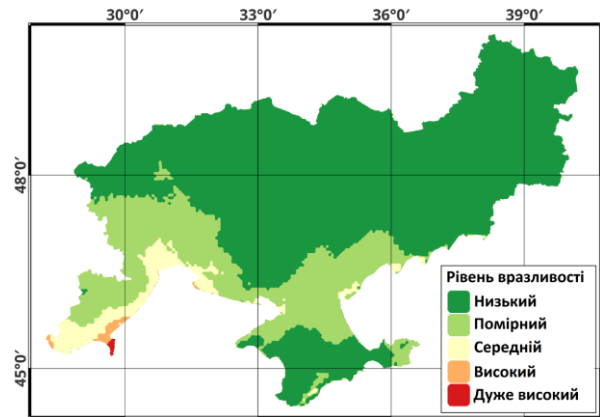


Рис. 6. Картошка розподілу рівня вразливості степової ландшафтно-кліматичної зони до кліматичних змін на основі даних середньорічних опадів за 2022 р. (дані ERA5)

Розподіл сонячної радіації є типовим, з поступовим збільшенням від півночі до півдня. Дуже високий рівень надходження сонячного випромінювання та, відповідно, висока вразливість до кліматичних змін на основі цього показника спостерігається на півдні Одеської області (Рис. 7).

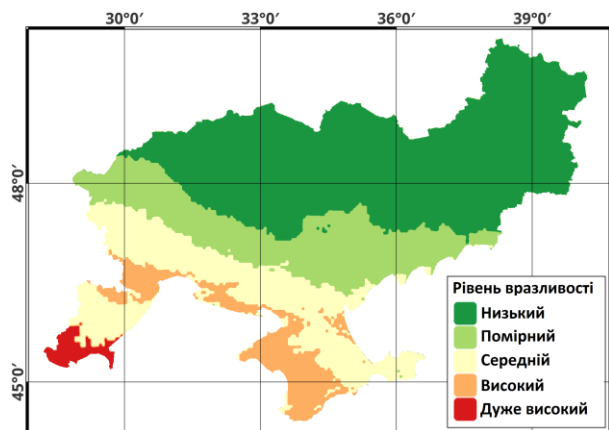


Рис. 7. Картошка розподілу рівня вразливості степової ландшафтно-кліматичної зони до кліматичних змін на основі даних середньорічного рівня надходження сонячної радіації за 2022 р. (дані ERA5)

3.2. Вразливість степової зони до кліматичних змін

Загальне оцінювання вразливості степової ландшафтно-кліматичної зони на основі описаних результатів виконано шляхом застосування методу аналізу ієрархій.

Для оцінювання вразливості біофізичного стану степової ландшафтно-кліматичної зони України до кліматичних змін було розроблено інтегральну ієрархічну модель вразливості (Рис. 8).

Далі для кожного елемента моделі на всіх рівнях ієрархії будувалися матриці переваг (Табл. 5) та згідно із шкалою переваг попарно порівняно елементи нижчого рівня. На наступному етапі для кожної з матриць попарних порівнянь розраховано компоненти власного вектора матриці та здійснено нормування (Табл. 6).

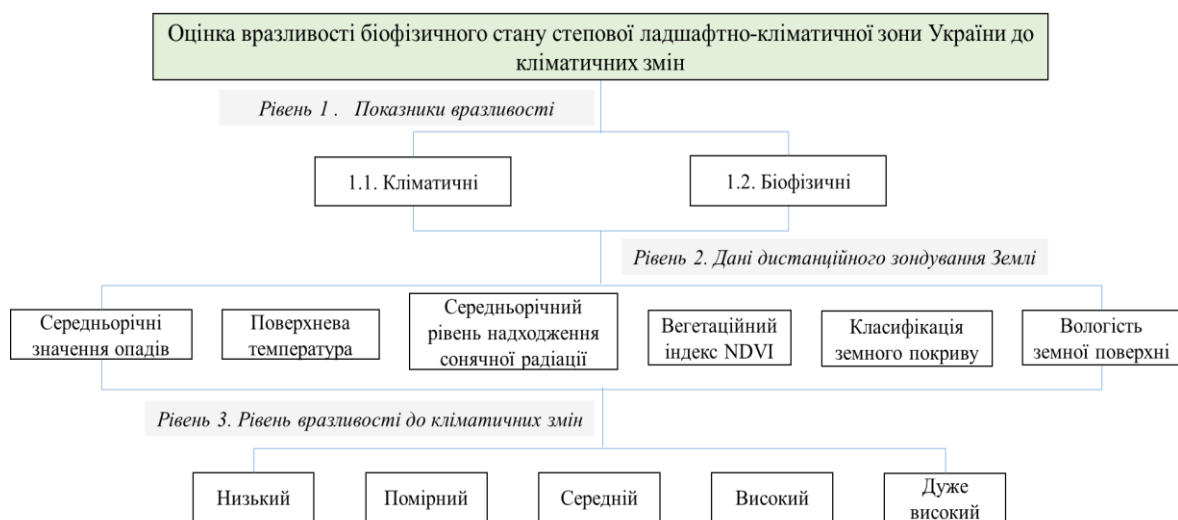


Рис. 8. Ієрархічна модель вразливості території до кліматичних змін

Таблиця 5. Матриця попарного порівняння МАІ для тематичних шарів

	PR	SR	LST	NDVI	LULC	SM	Пріоритет (ранг)	CR
PR	1	5	1	6	7	3	34,3% (1)	0,076
SR	0,2	1	0,33	4	5	0,25	10,7% (4)	
LST	1	3	1	5	6	1	24,5% (2)	
NDVI	0,17	0,25	0,2	1	3	0,17	5,3% (5)	
LULC	0,14	0,2	0,17	0,33	1	0,2	3,3% (6)	
SM	0,33	4	1	6	5	1	21,9% (3)	

де PR – середньорічна кількість опадів, SR – середньорічне значення надходження сонячної радіації, LST – температура поверхні землі, NDVI – нормалізований індекс рослинності, LULC – класифікація земної поверхні, SM – вологість земної поверхні.

Таблиця 6. Нормалізована матриця тематичних шарів

	PR	SR	LST	NDVI	LULC	SM
PR	0,352	0,372	0,270	0,269	0,259	0,534
SR	0,070	0,074	0,089	0,179	0,185	0,044
LST	0,352	0,223	0,270	0,224	0,222	0,178
NDVI	0,060	0,019	0,054	0,045	0,111	0,030
LULC	0,049	0,015	0,046	0,015	0,037	0,036
SM	0,116	0,297	0,270	0,269	0,185	0,178

Кожен параметр на основі експертного оцінювання отримав ваговий коефіцієнт по відношенню до інших характеристик на основі попарного зіставлення відносної переваги однієї характеристики над іншою. Матрицю суджень (вагових коефіцієнтів) та пріоритету характеристик земної поверхні зазначено в Табл. 5.

Результати показують, що матриці суджень, використані в аналізі, були достатньо послідовними та точними (CR 0,076). Підхід попарного порівняння використовувався для інтеграції тематичних шарів відповідно до їх пов'язаних ваг. За МАІ встановлено, що опади мають найвищий пріоритет у визначенні вразливості до змін клімату з ваговим значенням 0,343, за яким йдуть температура земної поверхні (0,245), вологість ґрунтового покриву (0,219), сонячна радіація (0,107), вегетаційний індекс NDVI (0,053) та класифікація земної поверхні (0,033).

3.3. Загальна оцінка вразливості степової ландшафтно-кліматичної зони на основі даних 2022 р.

За результатами багатокритеріального аналізу масиву даних методом аналізу ієрархій отримано просторовий розподіл загальної вразливості до кліматичних змін. Найнижчий рівень вразливості характерний для північної частини досліджуваної території та русла р. Дніпра. Однак, після руйнування греблі Каховської гідроелектростанції російськими військами у червні 2023 р. та осушення Каховського водосховища можливі суттєві зміни в межах цієї території. Для східної частини характерний помірний та середній рівень вразливості, як для північного Криму. Найбільш вразливі території, які різко виділяються на фоні решти ділянки – південь Одеської, Миколаївської та

Херсонської областей, дотичних до узбережжя Чорного моря. Детальна картосхема зображена на Рис. 9.

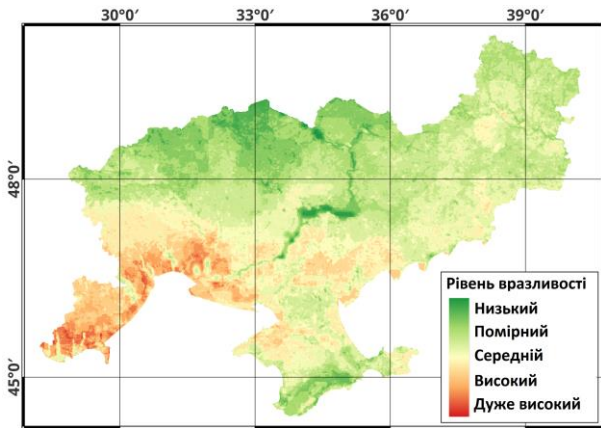


Рис. 9. Оцінка вразливості степової ландшафтно-кліматичної зони України до кліматичних змін на основі даних 2022 р.

У цьому дослідженні підхід до моделювання на основі МАІ та ГІС показав свою корисність для оцінювання вразливості степової зони до змін клімату шляхом поєднання різних параметрів і є корисним для аерокосмічного геомоніторингу вразливих територій (Khyzhniak, 2021). За результатами дослідження, посушливі та напівпосушливі місцевості зазвичай чутливі до змін клімату, тому важливо враховувати як науковий, так і політичний підходи. Методологія, використана в цьому дослідженні, може бути застосована як інструмент для керівництва особами, які приймають рішення для визначення пріоритетів річкового басейну. Результати цього дослідження свідчать про те, що зони з дуже високим і високим ступенем вразливості слід вважати гарячими точками для ініціатив, які можна використати для заходів із збереження ґрунтового покриву, якості води та сталого управління земельними ресурсами.

Висновки

Глобальне підвищення температури приземного шару атмосфери та його наслідки призвели до накопичення негативних процесів, що полягають у зниженні біопродуктивності екосистем, зниженні родючості та рівня зволоження ґрунтів. Український степ належить до аридних ландшафтів, тобто найбільш вразливих до кліматичних та антропогенних змін території.

На сьогодні степова ландшафтно-кліматична зона майже на 82% є антропогенно видозміненою, що значно посилює наслідки впливу несприятливих умов та факторів, як антропогенних, так і природних. Впродовж останніх десятиліть в межах усієї України спостерігається поступовий приріст активних температур, який особливо відчутний у межах степової зони. Особливо негативним процесом є перерозподіл кількості опадів впродовж року, при якому значно збільшилась їх кількість в осінній період та зменшилась в найспекотніші місяці.

Найбільш вразливі до кліматичних змін території, до яких належить Український степ, потребують детального багатофакторного дослідження з урахуванням сезонних екстремумів характеристик земної поверхні. Тому дуже корисними є хмарні технології обробки геоданих, зокрема Google Earth Engine, який дає змогу швидко обробляти великі масиви даних для значних територій та оперативно отримувати результати обчислення розподілу характеристик земної поверхні. А якісно реалізувати багатокритеріальну оцінку вразливості досліджуваної території, та виявити високу вразливість до кліматичних змін південних регіонів України, зокрема Одеської, Херсонської та Миколаївської областей дав змогу метод аналізу ієрархій.

Подальші дослідження будуть спрямовані на аналіз багаторічної динаміки вразливості, сформованої на основі багаторічних рядів даних характеристик земної поверхні.

Подяки

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи “Моделювання динаміки біофізичного стану степової ландшафтно-кліматичної зони України в умовах сучасних кліматичних викликів на основі даних космічного знімання”, яке виконується згідно з розпорядженням Президії НАН України від 19.06.2023 № 321 “Про результати конкурсу проектів науково-дослідних робіт молодих учених НАН України у 2023 р.” та розпорядженням Президії НАН України від 26.01.2024 № 71 “Про продовження виконання проектів науково-дослідних робіт молодих учених НАН України у 2024 р.”

References

- AbdelRahman, M. A. E., Natarajan, A., Hegde, R. & Prakash, S. S. (2019). Assessment of land degradation using comprehensive geostatistical approach and remote sensing data in GIS-model builder. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(3), 323–334. DOI: 10.1016/j.ejrs.2018.03.002.
- Asgari, H. M. & Soleimany, A. (2023). Long-term study of desert dust deposition effects on phytoplankton biomass in the Persian Gulf using Google Earth Engine. *Marine Pollution Bulletin*, 195, 115564. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115564.
- Baitsar, A. L. (2012). *Physical geography of Ukraine: Educational and methodological manual*. Lviv: Ivan Franko National University. (in Ukrainian).
- Core Writing Team, Lee, H. & Romero, J. (2023). *IPCC, 2023: Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Cuff, M. (2023). Why 2023 is shaping up to be the hottest year on record. *New Scientist*, 258, 3444. DOI: 10.1016/S0262-4079(23)01116-8.
- De Oliveira, M. L., dos Santos, C. A. C., de Oliveira, G., Silva, M. T., da Silva, B. B., de B. L. Cunha J. E., Ruhoff, A. & Santos, C. A. G. (2022). Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. *Science*

- of *The Total Environment*, 835, 155490. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155490.
- Feng, S., Zhao, W., Zhan, T., Yan, Y. & Pereira, P. (2022). Land degradation neutrality: A review of progress and perspectives. *Ecological Indicators*, 144, 109530. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109530.
- Giuliani, G., Mazzetti, P., Santoro, M., Nativi, S., Van Bemmelen, J., Colangeli, G. & Lehmann, A. (2020). Knowledge generation using satellite earth observations to support Sustainable Development Goals (SDG): A use case on land degradation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88, 102068. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102068.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- Khyzhniak, A. V., Fedorovsky, O. D., Porushkevych, A. Yu. & Yefimenko, T. A. (2021). The concept formation of the aerospace geomonitoring methodology of the decision of problems in natural resource. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 8(4), 4–11. DOI: 10.36023/ujrs.2021.8.4.203. (in Ukrainian).
- Kilic, O. M., Ersayın, K., Gunal, H., Khalofah, A. & Alsubeie, M. S. (2022). Combination of fuzzy-AHP and GIS techniques in land suitability assessment for wheat (*Triticum aestivum*) cultivation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(4), 2634–2644. DOI: 10.1016/j.sjbs.2021.12.050.
- Kruschke, J. K. (2014). *Doing Bayesian Data Analysis: A Tutorial with R, JAGS, and Stan*. Academic Press.
- Laiy, J. (2008). *Deserts and Desert Environments*. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S. ... Zhou, B. (2021). IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Odum, H. T. & Odum E. C. (2000). *Modeling for All Scales: An Introduction to System Simulation*. Academic Press.
- Ravilious, K. (2023). 2022 was Europe's hottest summer but warmer years are likely to come. *New Scientist*, 258(3436). DOI: 10.1016/S0262-4079(23)00751-0.36.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York.
- Singh, M., Khajuria, V., Singh, S. & Singh, K. (2024). Landslide susceptibility evaluation in the Beas River Basin of North-Western Himalaya: A geospatial analysis employing the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. *Quaternary Science Advances*, 14, 100180. DOI: 10.1016/j.qsa.2024.100180.
- Thomas, A., Bentley, L., Feeney, C., Lofts, S., Robb, C., Rowe, E. C., Thomson, A., Warren-Thomas, E. & Emmett, B. (2023). Land degradation neutrality: Testing the indicator in a temperate agricultural landscape. *Journal of Environmental Management*, 346, 118884. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118884.
- Uchida, S. (2015). Applicability of Satellite Remote Sensing for Mapping Hazardous State of Land Degradation by Soil Erosion on Agricultural Areas. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 29–34. DOI: 10.1016/j.proenv.2015.03.005.
- UNEP (1994). *Development of guidelines for assessment and mapping of desertification and degradation in Asia/Pacific*. In Proceedings of the Draft Report of the Expert Panel Meeting, Paris, France, 17 June 1994. United Nations Environment Programme: Robbie, Kanyana.
- Wang, X. D., Zhong, X. H., Liu, J.G., Wang, Z.Y. & Li, M.H. (2008). Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan Plateau. *Journal of Arid environment*, 72, 1929–1939. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2008.06.005.
- Wei-Dong, W., Cui-Ming, X. & Xiang-Gang, D. (2009). Landslides susceptibility mapping in Guizhou province based on fuzzy theory. *International Journal of Mining Science and Technology*, 19, 399–404. DOI: 10.1016/S1674-5264(09)60075-2.
- Zhou, T., Lv, W., Geng, Y., Xiao, S., Chen, J., Xu, X., Pan J., Si B. & Lausch A. (2023). National-scale spatial prediction of soil organic carbon and total nitrogen using long-term optical and microwave satellite observations in Google Earth Engine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 210, 107928. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107928.

SIMULATION OF THE VULNERABILITY OF THE STEPPE LANDSCAPE AND CLIMATE ZONE OF UKRAINE TO CLIMATE CHANGES BASED ON SPACE IMAGE DATA

M. S. Lubskeyi, A. V. Khyzhniak, T. A. Orlenko

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

Now, the whole world, including Ukraine, is facing one of the biggest environmental problems, namely, climate change. The steppe landscape-climate zone is one of the territories considered the most sensitive to Ukraine's current and future climate change threats. Studying the vulnerability to climate change of the steppe zone of Ukraine based on data from space surveys requires analyzing a large amount of objective data, namely the products of remote sensing data processing. The article presents the results of combining remote sensing, geographic information systems, and multi-criteria decision analysis to identify vulnerable areas to the impact of climate change in the steppe landscape-climatic zone. This information will be used to recommend adaptation systems to modern conditions and reduce the impact of adverse climate changes. The proposed decision-making structure was developed in three stages: 1) collection and processing of available data from space surveys; 2) development of a model of vulnerability to climate change of the steppe landscape-climatic zone of Ukraine based on the method of analysis of hierarchies; 3) construction of the resulting map, which includes degrees of vulnerability to climate changes of the studied territory. Modern cloud processing methods for space survey data provide access to a large number of geo-informational products, including the characteristics of the earth's surface and the spatial distribution of climatic indicators accumulated over a long period. These products allow the processing of these data for large areas to be implemented quickly. This technique allows, based on expert assessments, to assess the combined impact of the most significant characteristics of the earth's surface and regional climate, prioritize their impact on the studied territory's vulnerability to climate changes, and implement its quantitative multi-criteria assessment.

Keywords: geospatial modelling, satellite imagery, vulnerability to climate change, multi-criteria analysis, hierarchy analysis method, steppe zone.

*Рукопис статті отримано 10.03.2024
Надходження остаточної версії: 25.03.2024
Публікація статті: 30.03.2024*