



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.1.229>

УДК 528.88:502.53

Оцінювання індикаторів опустелювання регіону Олешківські піски за довготривалими часовими рядами даних супутникового знімання Landsat

М. С. Лубський*, Т. А. Орленко, І. О. Пестова, А. А. Андреев, А. Р. Лисенко

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

Космічний моніторинг земної поверхні з метою оцінювання динаміки та картування індикаторів опустелювання на сьогодні є одним із пріоритетних напрямів досліджень в галузі дистанційного зондування. Окрім того, що опустелювання є серйозною глобальною загрозою для економічної, соціальної та продовольчої безпеки, ризики цього процесу є актуальними також для південної України. За останні роки в Україні зміни клімату стають все більш помітними. Розмиваються часові рамки пір року, зсуваються межі природних зон, все частіше спостерігаються аномальні значення метеорологічних показників та посилюється інтенсивність стихійних природних явищ. Оскільки південна Україна є найбільш вразливою до негативних кліматичних та ландшафтних змін, зокрема опустелювання, у статті розглянуті довготривалі ландшафтні зміни правобережжя річки Дніпра в Херсонській області, для якої характерні піщані масиви, регіону Олешшя, які мають назву Олешківські піски. Аридні ландшафти, до яких належить переважна частина Олешшя, є особливо вразливими до деградаційних процесів, тому космічний моніторинг цієї території є актуальним завданням, з огляду на сучасні глобальні кліматичні зміни. В рамках цього дослідження розглянута довготривала динаміка деяких індикаторів опустелювання в межах піщаних арен Олешківських пісків, картування яких виконано за серіями багатоспектральних космічних зображень, отриманих супутниками Landsat за період 1986–2020 рр. Як індикатори опустелювання було обрано низку математичних перетворень значень спектрального відбиття в різних спектральних діапазонах, які характеризують ключові біофізичні аспекти аридних ландшафтів: ступінь зволоженості ґрунтів, густина рослинності та поширення пісків. Для характеристики динаміки кожного з індикаторів застосовано регресійний аналіз, який засвідчив загальний приріст кожного індикатора за досліджуваний період. Для визначення зв'язку значень приросту індикаторів опустелювання та ландшафтних змін, що відбулись на дослідних ділянках, також класифіковано кілька зображень за різні роки та охарактеризовано просторові та кількісні зміни розподілу класів земних покривів.

Ключові слова: опустелювання, супутниковий моніторинг, класифікація земних покривів, регресійний аналіз, спектральний індекс, біофізичний індикатор, кліматичні зміни.

© М. С. Лубський, Т. А. Орленко, І. О. Пестова, А. А. Андреев, А. Р. Лисенко. 2023

1. Вступ

1.1. Проблема опустелювання та її актуальність для України

Опустелювання є комплексним явищем, яке одночасно розглядається як процес ландшафтних перетворень та перехід екосистем до кінцевої стадії деградації – пустелі. Опустелювання є процесом, який включає комбінацію антропогенних, біофізичних та кліматичних чинників (Zeng et al., 2009), що негативно впливають на аридні (посушливі) екосистеми, які можуть через вказані фактори втратити свою стійкість і почати розширюватись разом із посиленням посушливості. Опустелювання проявляється у втраті біопродуктивності екосистеми, зниженні родючості ґрунтів і, відповідно, зниженні здатності до відновлення рослинного покриву, що додатково посилюється зниженням зволоженості ґрунту, та, відповідно, транспірації і підвищенням поверхневої температури.

Аридні ландшафти за своїми фізико-географічними характеристиками є найбільш вразливими до деградаційних процесів, пов'язаних з опустелюванням. При опустелюванні в результаті природних процесів (кліматичні зміни) або діяльності людини (інтенсивна експлуатація) втрачається біологічна продуктивність земель. Організація Об'єднаних Націй відзначає те, що до 70% посушливих земель страждає від опустелювання, що є однією з глобальних проблем. Опустелювання також може бути характерним для слабкопосушливих та екосистем з помірним зволоженням через вказані фактори, які також можуть спричинити перехід екосистем до більш вразливого до опустелювання стану.

Згідно з різними оцінками UNEP (Програма ООН з довкілля), аридні екосистеми становлять від 47% (Middleton et al., 1997) до 41% (Safriel et al., 2005) земної поверхні, що робить ці регіони найбільшим у світі біомом. Загалом, визначальною характеристикою цих регіонів є посушливість, відсутність або дефіцит вологи. Аридні ландшафти характеризуються високими літніми температурами, високою

*E-mail: nickolo1990@gmail.com

інтенсивністю сонячної радіації (відсутність хмарності понад 70% року (Laity, 2008), низькою відносною вологістю, високою швидкістю випаровування та домінуванням аридозольних ґрунтів (високий вміст мінералів і низький вміст органічних речовин) і ентизолями (піщані, недиференційовані ґрунти). Аридні ландшафти поділяються за ступенем зволоження, вираженого за середньорічною кількістю опадів в регіоні: на посушливі (до 250 мм опадів на рік) та напівпосушливі (250–500 мм опадів на рік).

Згідно з даними Інституту світових ресурсів, Україна є однією з країн з високим ризиком посух нарівні з Близьким Сходом, Північною Африкою та Азією, а південь України включено до регіонів з дуже високим рівнем вразливості до опустелювання. Дослідження індексу посушливості для території України проведені в період 2000–2021 рр. Дані космічного знімання MODIS продемонстрували його стійке зростання для більшої частини території України, передовсім для південного регіону (Lyalko et al., 2020; Апостолов та ін., 2020), на фоні сучасних кліматичних змін в Україні (Khodorovskiy et al., 2023). Одним з найбільш показових наслідків кліматичних змін є зростання посушливості клімату, що проявляється у збільшенні тривалості посух та посиленні їхньої інтенсивності.

Отже, постає актуальне завдання з розроблення методики оцінювання біофізичних індикаторів опустелювання та її апробації в межах певних ділянок України для подальшого моделювання динаміки опустелювання.

1.2. Аналіз світового досвіду дослідження опустелювання

Стрімкий розвиток систем дистанційного зондування та поява космічних даних низької та середньої просторової розрізненості у вільному доступі значно розширили і удосконалили методи оцінювання та картування динаміки опустелювання. Багатоспектральні дані супутникового знімання дали змогу створити спектральні індекси для оцінювання біофізичних характеристик земної поверхні: густоту рослинності, рівень зволоженості, альbedo земної поверхні тощо (Rivera-Marin et al., 2022).

UNEP/FAO розробили методологію дослідження наслідків опустелювання, яка ґрунтується переважно на визначенні рівня ерозії, засоленості, оцінці густоти рослинного покриву та інших фізичних характеристиках ґрунтового покриву (FAO & UNEP, 1984). Подальшого розвитку набула заснована на напрацюваннях UNEP методологія Mediterranean Desertification Land Use Survey (MEDALUS), яка використовується як інструмент жорсткого екологічного моделювання. Індикаторами моделювання є індекси: якості ґрунтів; якості клімату; якості рослинності; якості управління земельними ресурсами. Сформована адаптивна матриця моделювання дала змогу оцінювати екологічну чутливість регіонів (Bakr et al., 2012). Варіації методології MEDALUS використовувались для розробки стратегій оцінювання та опису деградаційних процесів, які комбінували

використання індикаторів навколишнього середовища, таких як топографія, кут нахилу земної поверхні та напрям нахилу, тип землекористування, з яких формувались комплексні ГІС-проекти із зонування територій за ступенем ризику опустелювання (Barzani et al., 2013).

Опустелювання, як комплексний процес, досліджується в сукупності з кількістю річних опадів, їх періодичністю та температурними трендами. Таким чином, дані метеорологічних супутників NOAA під час дослідження опустелювання є актуальними та пріоритетними. Багато досліджень зосереджуються на оцінюванні довготривалих змін густоти рослинного покриву, як основного індикатора опустелювання, який оцінюється за нормалізованим диференційним вегетаційним індексом NDVI та його залежністю від кліматичних індикаторів (Lauwaet et al., 2009).

Під час досліджень природних процесів найчастіше застосовується метод керованої класифікації. Керована класифікація бере за основу піксели еталонного полігона або області та створює спектральні сигнатури для кожного типу покриву. Одним з методів, який найчастіше застосовується під час досліджень та для виявлення ділянок опустелювання, є об'єктно-орієнтовна класифікація Fathizad et al., 2018).

Динаміку процесів опустелювання та посух методом автоматизованої класифікації супутникових знімків Landsat застосовано для територій Алжиру та Тунісу. Класифікатор дерева рішень доповнений спектральними індексами для вилучення ознак посухи, опустелювання, засолення та розширення піщаних територій (Afrasinej et al., 2017).

Часто опустелювання ідентифікується за станом та типом рослинності, оскільки для засушливих та напівзасушливих регіонів зміни видового складу рослинності, стану вологості та властивостей ґрунту є одними з основних показників. У дослідженнях посухи в Алжирі за логістичною моделлю було враховано чотири категорії, що стосуються опустелювання: ґрунтознавство (температура земної поверхні (LST), на основі супутникових даних температури поверхні та вегетаційного індексу NDVI), геоморфологія (на основі перепаду висот за даними SRTM), екологія (опад, рослинний покрив, дренаж, евапотранспірація) та соціально-економічні фактори (випас худоби, густота населення) (Djeddaoui et al., 2017).

Одним з індексів, які застосовуються для дослідження опустелювання та процесів деградації земель, є модифікований індекс рослинності з поправкою на тип ґрунту MSAVI (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index) (Li, 2001), індекс листової поверхні LAI (Leaf Area Index) та ін. Під час досліджень посухи та антропогенної деградації земель у північно-східній Бразилії індекс листової поверхні застосовано в комбінації з альbedo поверхні та евапотранспірацією на основі супутникового знімання MODIS (Mariano et al., 2018). Для картування ризиків опустелювання для північно-східної Йорданії були застосовані вегетаційні індекси в поєднанні з наземними даними, кліматичними

показниками та картуванням індексу евапотранспірації. На основі даних змодельовано посуху та ризику вітрової і водної ерозії (Al-Bakri, et al., 2016). Стан рослинності залежно від посухи в межах провінції Юньнань в Китаї, досліджено на основі супутникових даних GLASS. Індекс листової поверхні для визначення стану рослинності в метеорологічну посуху в дослідженні визначено за допомогою стандартного індексу опадів SPI (Standard Precipitation Index), (Kim et. Al., 2017).

Основним показником, який призводить до опустелювання, що є наслідком посухи, є кількість опадів. Для виявлення посушливих, напівпосушливих та сухих областей застосовують індекс аридності земель AI (Aridity Index). Індекс є відношенням річної кількості опадів до потенційної евапотранспірації (PET) (Dalezios et al., 2017).

Для виявлення прогресії динамічних процесів на земній поверхні використовується підхід обробки часових серій даних космічного знімання або використовується пара різночасових зображень. За парою знімків Landsat (1987 та 2008) проаналізовано опустелювання в Судані за методом спектрального змішування (Spectral Mixture Analysis) та аналізу зміни векторів (Change-Vector Analysis) (Dawelbait et. Al., 2012).

Аналіз зміни векторів також часто застосовується під час аналізу даних зваженого накопичення за методом Tasseled Cap (Crist et al., 1984). Зважене накопичення являє собою суму значень коефіцієнтів спектрального відбиття, помножених на ваговий коефіцієнт, який відображає рівень впливу кожного каналу на конкретний індекс накопичення. Загалом для методу Tasseled Cap реалізовано три індекси накопичення: яскравість (brightness), озелененість (greenness), зволоженість (wetness). Коефіцієнти зваженого накопичення для пустельних регіонів, які використовуються для даних супутникових систем Landsat, розраховані (Zanchetta et al., 2016) та можуть бути використані для багатьох інших пустельних та напівпустельних регіонів.

Отже, можна зробити висновок, що роль дистанційного зондування під час дослідження опустелювання суттєво зросла і на сьогодні є ключовим джерелом даних як для оперативного оцінювання стану земної поверхні, так і для довготривалого моніторингу деградаційних процесів.

2. Матеріали і методи

2.1. Дослідна ділянка

Найбільш посушливим регіоном України на сьогодні є західна частина Херсонської області, а саме лівобережна ділянка Дніпра вище його гирла. На цій території сформувались піщані горбкуваті рівнини, названі Олешківські піски. Загальна територія цього регіону приблизно 219,9 тис. га, 80 % якої становлять піщані арени, де домінуючим типом земного покриву є оголені піски (Кривульченко А., 2019).

Олешківські піски є одним з найбільших природних піщаних масивів у Європі. В цій місцевості сконцентроване велике розмаїття

біотоїв: напівпустельні та пустельні ділянки, піщаний степ, прісні та солоні водойми, листяні гаї, хвойні ліси. Унікальність цих пісків полягає в тому, що вони є рухомими. У XX сторіччі проблема пустелі постала дуже гостро, бо піщані маси почали поширюватись впритул до навколишніх сіл. Для стримування розширення піщаного масиву було розпочато висадження дерев.

Актуальність дослідження посушливості в цьому регіоні впливає не лише з ландшафтних, а й з кліматичних факторів. Територія Нижньодніпровських пісків належить до південно-східної кліматичної зони України, яка характеризується переважанням східних, північно-східних вітрів, відносно низькою вологістю повітря, малою хмарністю, незначною кількістю опадів і порівняно великими добовими і річними амплітудами коливання температури повітря. Ці основні ознаки надають клімату території рис засушливості і континентальності. Критичні температури поверхні піску, які можуть спричинити опіки (більше 50–70° С), повторюються майже в усі місяці вегетаційного періоду, включаючи вересень (Грановська Л. М., 2019).

Територія інтересу охоплює п'ять арен із семи: Іванівську, Збур'ївську, Калегейську, Козачелажерську та Чалбаську. (Рис. 1).

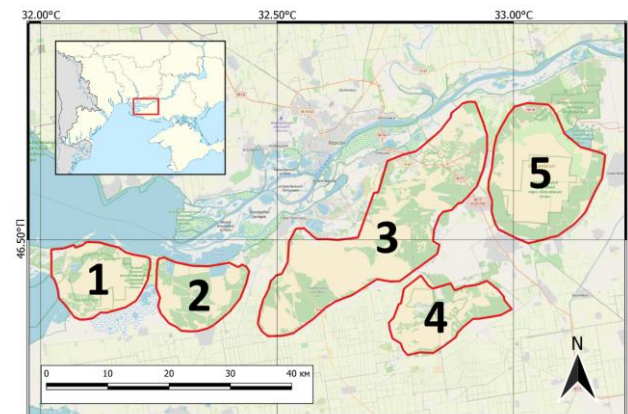


Рис. 1. Карта Олешківських пісків з виділенням досліджуваних піщаних арен: 1 – Іванівська, 2 – Збур'ївська, 3 – Калегейська, 4 – Чалбаська, 5 – Козачелажерська

2.2. Методика дослідження

Для дослідження довготривалих змін земної поверхні, особливо таких динамічних та вразливих, як аридні ландшафти, необхідно використовувати великий масив геоінформаційних даних, які складаються з десятків зображень. Саме з цієї причини для таких досліджень доцільно використовувати дані, отримані супутниками Landsat, які надають багатоспектральні космічні знімки починаючи з 1972 року з просторовою розрізненістю 80 та 30 м (Markham et al., 2004).

Базовою основою для виконання дослідження є набір багатоспектральних космічних зображень, отриманих супутниками серії Landsat у період з липня 1986 по липень 2020 р. Зображення відбирались на основі критеріїв відсутності хмарності в межах досліджуваних ділянок та належності знімків до

періоду високої вегетаційної активності (червень–серпень) для виділення рослинного покриву та його максимального контрасту з відкритими ґрунтами та пісками.

У рамках розробки та реалізації методики оцінювання динаміки опустелювання за даними дистанційного зондування виконано такі роботи:

сформована серія космічних знімків Landsat із 27 багатоспектральних зображень, для яких виконана радіометрична та атмосферна корекція (дати, за які були використані зображення та супутники, перелічені в Табл. 1);

визначена територія інтересу та сформувавши векторний шару для виділення дослідних ділянок Олешківських пісків, в межах яких буде проаналізована серія зображень (Рис. 1);

за сформованою серією космічних зображень відібрані та обчислені просторові розподіли індикаторів опустелювання, які можна визначити за даними космічного знімання;

виконано регресійний аналіз просторової та часової динаміки кожного індикатора та її картування;

виконане дослідження ландшафтних змін за класифікацією чотирьох зображень із серії космічних знімків та оцінена просторова динаміка характерних типів ландшафтів дослідної території.

Таблиця 1. Перелік космічних зображень для формування часових серій даних

Супутник	Дата знімання
Landsat-5	13 липня 1986 р.
Landsat-5	30 червня 1987 р.
Landsat-4	13 липня 1989 р.
Landsat-5	8 липня 1990 р.
Landsat-5	27 липня 1991 р.
Landsat-5	29 липня 1992 р.
Landsat-5	16 травня 1994 р.
Landsat-5	6 липня 1995 р.
Landsat-5	8 липня 1996 р.
Landsat-5	12 червня 1998 р.
Landsat-7	9 липня 1999 р.
Landsat-5	3 липня 2000 р.
Landsat-5	19 травня 2001 р.
Landsat-5	22 травня 2002 р.
Landsat-5	29 серпня 2003 р.
Landsat-5	14 травня 2005 р.
Landsat-5	5 серпня 2006 р.
Landsat-5	20 травня 2007 р.
Landsat-5	10 серпня 2008 р.
Landsat-5	10 червня 2009 р.
Landsat-5	31 липня 2010 р.
Landsat-8	23 липня 2013 р.
Landsat-8	30 серпня 2015 р.
Landsat-8	31 липня 2016 р.
Landsat-8	18 липня 2017 р.
Landsat-8	19 червня 2018 р.
Landsat-8	26 липня 2020 р.

2.3. Відбір індикаторів опустелювання

Для Олешківських пісків, як для типових аридних ландшафтів, є характерним дефіцит зволоження, динаміку якого можна визначити за даними дистанційного зондування як одним з індикаторів опустелювання.

Для обчислення розподілу зволоженості земної поверхні обрано індекс NDMI (normalized difference moisture index – нормалізований диференціальний індекс зволоженості), який розраховується за формулою:

$$\frac{\text{NIR} - \text{SWIR1}}{\text{NIR} + \text{SWIR1}}, \quad (1)$$

де NIR – дані спектрального відбиття у ближній інфрачервоній області (4 канал даних супутників Landsat-4, 5 та 7, та 5 канал даних супутників Landsat-8, 9), SWIR1 – дані спектрального відбиття в першому каналі короткохвильового інфрачервоного діапазону (5 канал даних супутників Landsat-4, 5 та 7, та 6 канал даних супутників Landsat-8, 9).

Індекс NDMI дає змогу виявити нестачу вологи в рослинності та рівень зволоженості ґрунтів і їх здатність утримувати вологу. Використання NDMI є ефективним для контролю зрошення, передусім у регіонах, де сільськогосподарські культури потребують більше води, ніж можуть забезпечити кліматичні умови, а також є одним із ключових індикаторів виявлення передумов посухи. Дані каналу SWIR1 відображають зміни вмісту вологи в рослинності, тоді як на спектральне відбиття в каналі NIR впливає внутрішня структура листя та вміст сухої речовини, але не вміст води. Поєднання NIR зі SWIR усуває зміни, індуковані внутрішньою структурою листя та вмістом сухої речовини, підвищуючи точність у визначенні вмісту рослинної вологи. Кількість води, наявної у внутрішній структурі листя, значною мірою контролює спектральне відбиття в інтервалі інфрачервоного випромінювання електромагнітного спектра (Gao, 1996).

Наступний критичний показник стану деградованості ландшафтів – це визначення динаміки просторового розподілу зеленої рослинності, яка є водночас індикатором зволоженості, потенційної транспірації та можливості закріплення ґрунтів дерном та кореневими системами деревної рослинності, зокрема захисними лісосмугами, вирощування яких практикується в окремих районах Олешківських пісків. Динаміка рослинного покриву дає змогу оцінити потенціальні ризики опустелювання окремих регіонів через втрату рослинності, деградацію ґрунтового покриву та розповсюдження пісків. Взаємна кореляція зволоженості та густоти рослинного покриву дають змогу сформувати комплексну оцінку можливості екосистеми протидіяти опустелюванню.

Для визначення густоти вегетаційного покриву використано індекс EVI (Enhanced vegetation index – покращений вегетаційний індекс), який розраховується за формулою:

$$\frac{2,5 \cdot (\text{NIR} - \text{Red})}{(\text{NIR} + 6 \cdot \text{Red} - 7,5 \cdot \text{Blue} + 1)}, \quad (2)$$

де Red – дані спектрального відбиття в червоній області (3 канал даних супутників Landsat-4, 5 та 7,

та 4 канал даних супутників Landsat-8, 9), Blue – дані спектрального відбиття в синій області (3 канал даних супутників Landsat-4, 5 та 7, та 4 канал даних супутників Landsat-8, 9).

Однак, типовий нормалізований диференціальний вегетаційний індекс (NDVI) чутливий до хлорофілу, індекс EVI більше реагує на структурні варіації крон дерев, включаючи індекс LAI листової поверхні (індекс листової поверхні – Leaf area index), тип крон, фізіономію рослин (Huete et al., 2002). Також цей індекс враховує проходження світла крізь крони дерев та вплив атмосферних аерозолів на дані в червоній області спектра; ці аспекти враховуються за числовими коефіцієнтами, встановленими емпірично. Таким чином, цей індекс добре підходить в умовах дослідження територій, для яких характерними є як деревний, так і трав'яний тип рослинності.

Власне піщаний покрив є основним індикатором кінцевої стадії ґрунтової деградації – формування умов, за яких неможливе зростання рослинності через брак поживної органіки в ґрунтах і, відповідно, не створені умови для стримування розповсюдження пісків. Для індикації піску обрано одне з рівнянь зваженого накопичення коефіцієнтів спектрального відбиття Tasseled Cap, а саме яскравість земної поверхні (brightness), оскільки пісок за своїми спектральними властивостями має дуже високу відбивальну здатність в усіх спектральних діапазонах:

$$0.3037 \cdot \text{Blue} + 0.2793 \cdot \text{Green} + 0.4743 \cdot \text{Red} + 0.5585 \cdot \text{NIR} + 0.5082 \cdot \text{SWIR1} + 0.1863 \cdot \text{SWIR2}, \quad (3)$$

де Green – дані спектрального відбиття в зеленій області (2 канал даних супутників Landsat-4, 5 та 7, та 3 канал даних супутників Landsat-8, 9), SWIR2 – дані спектрального відбиття в другому каналі короткохвильового інфрачервоного діапазону (6 канал даних супутників Landsat-4, 5 та 7, та 7 канал даних супутників Landsat-8, 9).

2.4. Оцінювання просторової та часової динаміки індикаторів опустелювання за регресійним аналізом

Після формування багаторічних серій даних розподілів індикаторів опустелювання за дослідний період 1986–2020 рр. (кожна серія складена із 27 зображень) було проаналізовано їх просторову і часову динаміку. Чітке просторове суміщення зображень дає змогу обчислити значення фізичної характеристики земної поверхні (в нашому випадку індикаторів опустелювання) в певній конкретній ділянці за всі роки обробки даних космічного знімання без просторових викривлень. Накопичення значень індикаторів в кожному пікселі дає змогу сформувати їх вибірку за всі роки та розрахувати регресійну залежність, яка засвідчить приріст значення індикатора за весь досліджуваний період, а розрахунок регресії для кожної просторової комірки досліджуваної ділянки, показаної на зображенні, дає змогу отримати просторовий розподіл динаміки індикатора в межах всієї досліджуваної ділянки.

Лінійна регресія в цьому випадку являє собою оцінку лінійної залежності значення кожного з

індикаторів від часу і може бути репрезентацією ландшафтних змін, що виникли впродовж досліджуваного періоду.

Лінійна, одновимірна регресія має вигляд (O'Leary, D. P. (1990):

$$R(x, y) = a \cdot x + b, \quad (4)$$

де x – залежна змінна; y – незалежна змінна; a – кутовий коефіцієнт або градієнт регресії; b – вільний член, який визначає лінію перетину регресії з віссю y . В цьому дослідженні залежною змінною є значення кожного з індикаторів у кожному з пікселів за конкретний рік, а незалежною – роки, в які отримані ці зображення.

Найпоширенішим способом обчислення регресійної залежності є метод найменших квадратів, за яким знаходимо коефіцієнти лінійної залежності, де функція двох змінних a і b вигляду

$$F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 \quad (5)$$

приймає найменше значення. Тобто, при даних a і b сума квадратів відхилень експериментальних даних від знайденої прямої буде найменшою.

Для побудови просторового розподілу багаторічної динаміки отриманих індикаторів опустелювання використовується отримане значення градієнта розрахованої регресії або кутового коефіцієнта, який за своєю фізичною суттю являє середньорічний приріст значення індикатора.

2.5. Виявлення ландшафтних змін досліджуваної ділянки за класифікацією багатоспектральних даних

Класифікація даних дистанційного зондування – це присвоєння пікселам багатоспектрального зображення класового атрибуту на основі близькості спектра цього піксела до еталонного спектра. Спектри зображення подані у вигляді набору коефіцієнтів спектрального відбиття в певних спектрально-зональних областях. Класи являють собою типи ландшафту, які можна вирізнити за спектром.

Навчальні вибірки є попередньо підготовленими наборами полігонів на зображенні, яке необхідно класифікувати. За набором пікселів, які входять до вибірки конкретного класу, формується розподіл значень спектрального відбиття, за якими далі в межах всього зображення всі піксели, що максимально подібні до пікселів в цій вибірці, відносяться до певного класу.

З отриманої навчальної вибірки формується бібліотека спектрів типових покривів для досліджуваної території, за якими далі її класифікують (Рис. 2). Для досліджуваної території сформовано навчальні вибірки для наступних класів: піски, відкриті ґрунти, піщані ґрунти, водна поверхня, трав'яниста рослинність, хвойні дерева.

Піски, як було вже сказано, є одним з основних індикаторів опустелювання, тому є одним із ключових класів у класифікації території Олешківських пісків. Поділ ґрунтів на “піщані” та “відкриті” є досить умовним і відображає градієнт спектральних властивостей ґрунтів від найбільш спектрально яскравих пісків, які переходять у більш

темні піщані ґрунти, до спектрально найтемніших чорноземів та інших ґрунтів з високим вмістом гумусу, що за спектральними властивостями є найтемнішими. Трав'яниста рослинність відображає трав'яний покрив як один із ключових елементів аридних ландшафтів, що проявляють їх здатність протистояти деградаційним процесам. Хвойні ліси є одним із штучних факторів стримування опустелювання та закріплення ґрунтового покриву. Водні поверхні взяті як додатковий клас для уникнення перекриття водних поверхонь одним з попередніх класів.

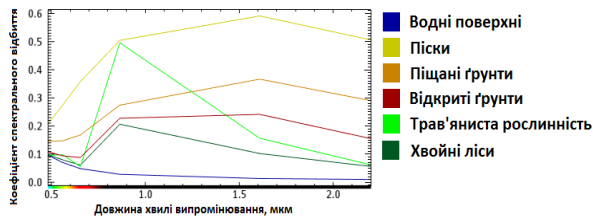


Рис. 2. Типові спектри земних покривів, які використано для класифікації досліджуваної ділянки

Власне класифікація виконується за допомогою одного із статистичних алгоритмів на основі оцінок спектральних властивостей навчальної вибірки. В дослідженні використано метод Maximum Likelihood (максимальної правдоподібності). Цей алгоритм заснований на двох базових принципах Richards, 1999):

- 1) значення комірок у вибірці кожного класу в багатовимірному просторі підпорядковуються закону нормального розподілу;
- 2) для розподілу класів використовується теорія ухвалення рішень Байєса.

Цей інструмент при віднесенні кожного пікселя до одного з класів, поданих у навчальній вибірці, враховує як дисперсії, так і коваріації навчальних вибірок класів. Якщо припустити, що вибірка класу підпорядковується нормальному розподілу, клас може бути охарактеризований вектором середнього значення та матрицею коваріації. Після присвоєння цих двох характеристик кожному значенню пікселів зображення з кожного класу, для визначення належності пікселів до того чи іншого класу, обчислюється статистична ймовірність цієї належності. Кожен піксел зображення буде віднесений до того класу, ймовірність належності до якого є максимальною. Таким чином, кожен піксел зображення отримує свій клас, незалежно від відстаней його спектральних характеристик до характеристик навчальної вибірки.

Перелік дат, за які отримані супутникові зображення та класифіковані зображення, наведений у Табл. 2.

Таблиця 2. Список оброблених зображень супутника Landsat для класифікації

Супутник, який надав зображення	Дата отримання
Landsat-5	13 липня 1986 р.
Landsat-5	8 липня 1996 р.
Landsat-5	5 серпня 2006 р.
Landsat-8	26 липня 2020 р.

3. Оцінювання динаміки індикаторів опустелювання за результатами обробки геоданих за розробленою методикою

3.1. Оцінювання просторової та часової динаміки індикаторів опустелювання в межах Олешківських пісків

Олешківські піски належать до досить уразливих екосистем через низьку родючість ґрунтів та порівняно низьку густоту трав'яної рослинності, низьку зволоженість та кліматичні умови регіону. При цьому результати обчислення просторової динаміки обраних індикаторів опустелювання свідчать про кардинальні відмінності між досліджуваними аренами Олешківських пісків та навколишніми територіями, так і виявили суттєві відмінності між самими аренами. Також виявлено чітко окреслені осередки із суттєвими змінами індикаторів.

Розподіл нормалізованого диференційного індексу зволоженості NDMI суттєво змінився на більшості арен. Значні осередки зниження NDMI наявні на території Іванівської, Збур'ївської арен. Найбільше зниження виявлено на території Келегейської арени із чітко вираженими контурами, що може свідчити про інтенсивний антропогенний вплив на арену. Також в межах Іванівської, Чалбаської та Козачеллагерської арен наявні осередки незначного підвищення індексу. Детальне зображення розподілу приростів індексу NDMI показане на Рис. 3.

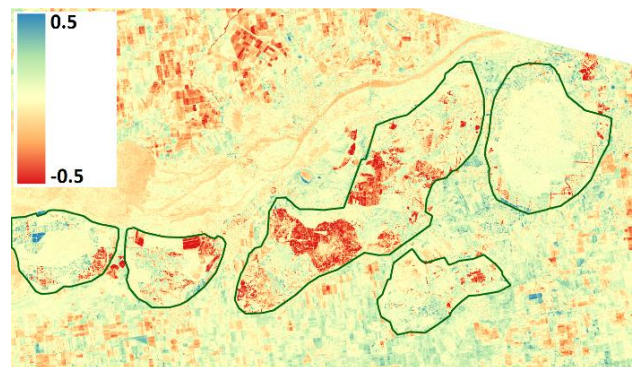


Рис. 3. Просторовий розподіл значень приросту індексу NDMI за результатами обробки довготривалої серії космічних даних Landsat із зазначенням меж досліджуваних арен

З дослідження розподілу динаміки вегетаційного індексу EVI було виявлено його доволі низьку дисперсію в межах дослідних ділянок арен Олешківських пісків порівняно з навколишніми територіями. На Рис. 4 видно, що в межах окреслених територій значення динаміки індексу набагато ближче до нуля порівняно з навколишніми територіями. Це свідчить про те, що для арен Олешківських пісків характерною є низька густота вегетаційного покриву та трав'яної рослинності, що додатково призводить до пониження транспірації та, відповідно, посилює посушливість регіонального клімату. При цьому сама динаміка індексу є переважно позитивною для всіх арен, передовсім для Чалбаської та Козачеллагерської, де найбільш

інтенсивно виконуються роботи з формування лісозахисних смуг. На території Козачелагерської арени виявлено поступове збільшення осередків зростання трав'яної рослинності.

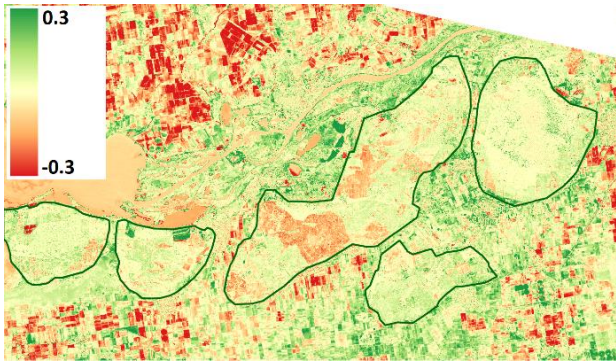


Рис. 4. Просторовий розподіл значень приросту індексу EVI за результатами обробки довготривалої серії космічних даних Landsat із зазначенням меж досліджуваних арен

Динаміка яскравості земної поверхні, визначена за регресійною моделлю результатів зваженого накопичення даних коефіцієнтів спектрального відбиття Tasseled Cap, має чітку обернену кореляцію з динамікою індексу NDMI, тобто зниження зволоженості території призводить до підвищення загальної яскравості земної поверхні. Незважаючи на те, що в межах Козачелагерської арени виявлено збільшення осередків зеленої рослинності, при цьому для піщаного масиву арени виявлено суттєве збільшення альбедо, що потенційно може свідчити про деградацію рештків ґрунтового покриття. На Рис. 5 зображений розподіл довготривалої динаміки значення яскравості.

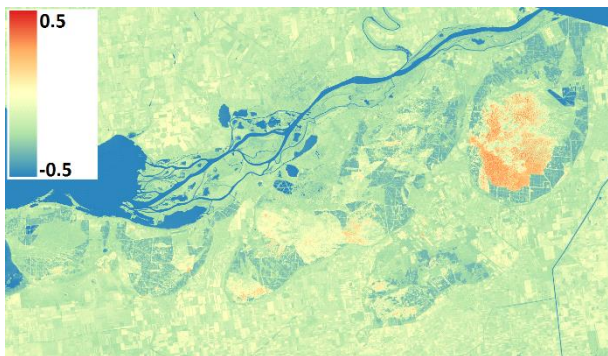


Рис. 5. Просторовий розподіл значень приросту альбедо (Tasseled Cap Brightness) за результатами обробки довготривалої серії космічних даних Landsat із зазначенням меж досліджуваних арен

Додатково проведено кількісний аналіз середнього приросту кожного індикатора опустелювання в межах кожної арени для формування загальної оцінки динаміки опустелювання. Результати подано у Табл. 3.

Аналіз усереднених приростів індикаторів опустелювання показав, що найменша загроза опустелювання Іванівської та Чалбаської арен. Для них характерними є прирости індексів зволоження та вегетаційного покриття, а також знижується альбедо. Слід зазначити, що частина Іванівської арени належить

до Чорноморського біосферного заповідника. В межах Козачелагерської арени також виявлено прирости вегетаційного покриття та зволоження, зокрема, за рахунок зростання площ деревних насаджень, однак, також виявлено суттєвий приріст альбедо, що може свідчити про деградацію ґрунтів.

Таблиця 3. Список оброблених зображень супутника Landsat для класифікації

Арена / індикатор	Приріст NDMI	Приріст EVI	Приріст альбедо
Іванівська	0,029	0,035	-0,04
Збур'ївська	-0,045	0,031	-0,004
Келегейська	-0,08	-0,012	0,06
Чалбаська	0,028	0,046	-0,06
Козачелагерська	0,034	0,03	0,034

3.2. Оцінювання просторової та часової динаміки індикаторів опустелювання в межах Олешківських пісків

Русійні сили, що суттєво впливають на перерозподіл індикаторів в довготривалій перспективі, можна виявити з аналізу типів земних покриттів та їх довготривалих змін, які були отримані в результаті класифікації космічних зображень.

Результати класифікації та оцінювання їх динаміки показали значні ландшафтні зміни, які відбулись за досліджуваній період на всіх аренах. Також для окремих класів на окремих аренах виявлена суттєва мінливість розподілу класів за площею. Приклади результатів двох класифікацій показано на Рис. 6 та 7. Для наочності в статистиці відсоткового розподілу класів класи "піщані ґрунти" та "відкриті ґрунти" були поєднані в єдиний клас "ґрунти".



Рис. 6. Результати класифікації багатоспектрального знімка, отриманого супутником Landsat-5 13 липня 1986 року, із зазначенням меж досліджуваних арен



Рис. 7. Результати класифікації багатоспектрального знімка, отриманого супутником Landsat-8 26 липня 2020 року, із зазначенням меж досліджуваних арен

Для Іванівської арени, незважаючи на те, що індикатори показують зниження ризику опустелювання, характерними є суттєвий перерозподіл хвойної рослинності. Так, хвойні насадження в північній частині арени за досліджуваний період стали густішими, водночас суттєво скоротилися хвойні насадження у східній частині арени. Загалом, за досліджуваний період спостерігається розширення площ відкритих ґрунтів та хвойних насаджень при зменшенні площ трав'яної рослинності та суттєвій мінливості площ пісків (діаграма на Рис. 8).

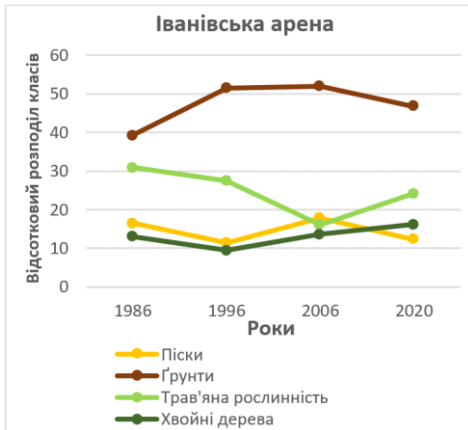


Рис. 8. Діаграма розподілу класів Іванівської арени за роки досліджень

На Збур'ївській арені після суттєвого скорочення площі хвойних лісів, виявленого за результатами класифікації 1996 року, поступово збільшується їх площа. Також зафіксовано великий осередок втрати хвойної рослинності у східній частині арени. Спостерігається поступове розширення класу відкритих ґрунтів, зокрема через осушення водойми у північній частині арени. Загалом клас пісків розширюється, однак з 2006 року виявлена тенденція до зменшення площ пісків та збільшення площ трав'яної рослинності. Детальний розподіл динаміки класів Збур'ївської арени наведений на Рис. 9.

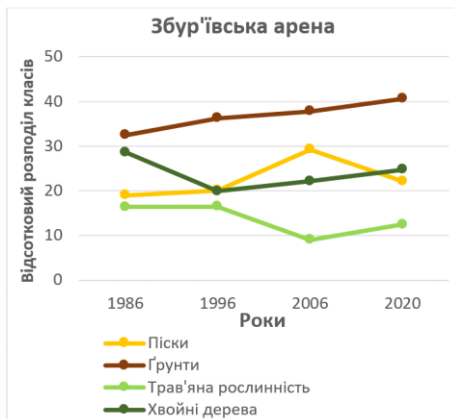


Рис. 9. Діаграма розподілу класів Збур'ївської арени за роки досліджень

З огляду на результати оцінювання динаміки індикаторів опустелювання для Келегейської арени, виявлені найвища загроза опустелювання та найбільші осередки потенційних деградаційних

процесів. Зіставлення цих результатів з даними класифікації показало суттєве зниження густоти хвойної рослинності на значній площі арени, виявлене в період 2006–2020 рр., а конкретно площа хвойних насаджень скоротилась із 32 від загальної площі арени до 18,5%. Заміщення відбулось за рахунок збільшення площі класів трав'янистої рослинності та відкритих ґрунтів, водночас приросту площ пісків не виявлено. Однак, отримані результати чітко вказують на суттєве підвищення ризику опустелювання, а характер зміни площі деревних насаджень дає змогу припускати, що їх зникнення пов'язане із антропогенними факторами, насамперед вирубками. Детальний розподіл динаміки класів Келегейської арени – на Рис. 10.

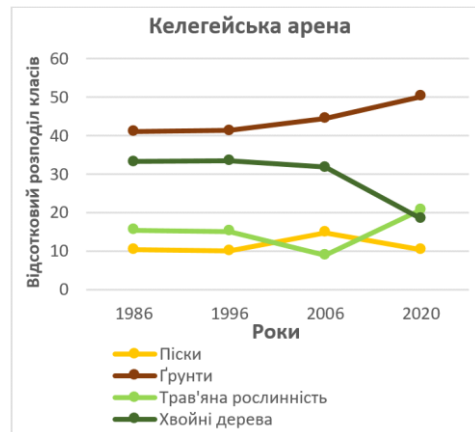


Рис. 10. Діаграма розподілу класів Келегейської арени за роки досліджень

Для Чалбаської арени характерним є суттєвий перерозподіл хвойної рослинності. Так, за період досліджень спостерігається поступове збільшення її густоти в південній частині арени, де на початку цього періоду домінували піщані ґрунти. При цьому з класифікації 2006 року спостерігається різка втрата значної площі хвойних дерев в східній частині арени і їх заміщення пісками та піщаними ґрунтами, про що свідчить різкий приріст площі класу піску за цей рік. Надалі за останній часовий проміжок періоду досліджень спостерігається суттєве зниження ризику опустелювання: зменшується площа пісків та відкритих ґрунтів, збільшується площа, вкрита трав'яною рослинністю. Детальний розподіл динаміки класів Чалбаської арени наведений на Рис. 11.

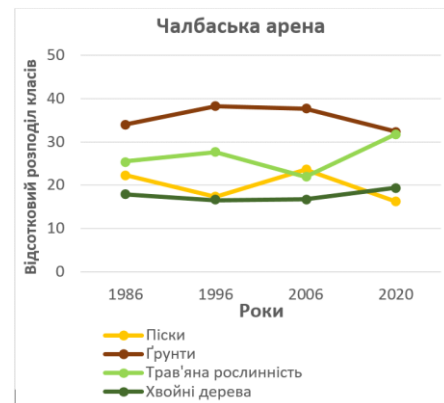


Рис. 11. Діаграма розподілу класів Чалбаської арени за роки досліджень

Козачелажерська арена є частиною Національного природного парку Олешківські піски, тому для цієї арени за рахунок реалізації комплексу природоохоронних заходів поступово підвищується площа насаджень хвойних дерев в південній її частині для стримування розширення піщаних масивів. Суттєвий приріст площ хвойних насаджень виявлено в період 2006–2020 рр., за який цей показник зріс з 17,5 до 31,5%. Однак, виявлені деякі негативні тенденції, пов'язані з поступовим переходом класу ґрунтів у піски. Це також було ідентифіковано за результатами аналізу динаміки альбедо, який показав суттєвий приріст яскравості ґрунтів всередині арени. Детальний розподіл динаміки класів Козачелажерської арени наведений на Рис. 12.

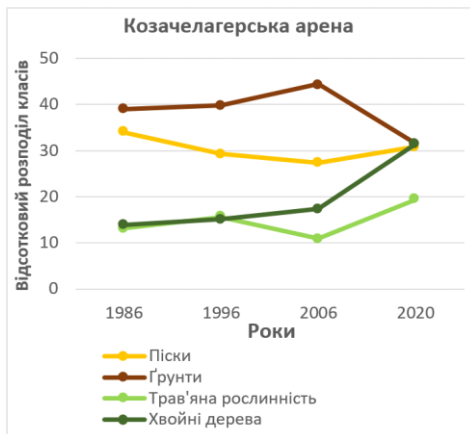


Рис. 12. Діаграма розподілу класів Козачелажерської арени за роки досліджень

Загалом, розроблена методика показала загальну тенденцію до зниження ризику опустелювання в межах арен Олешківських пісків за рахунок поступового формування лісозахисних смуг із хвойних насаджень, які дали змогу зафіксувати піщані арени в більш-менш чітких межах. Однак, слід зазначити, що як і будь-які аридні ландшафти Олешківські піски є дуже вразливими і потребують підтримання умов, які знижують ризик опустелювання. В межах Келегейської арени виявлено значну втрату насаджень хвойних дерев, які були заміщені пустельними ландшафтами. Також привертає увагу підвищення альбедо пісків Козачелажерської арени, яке може свідчити про певні деградаційні процеси.

В умовах кліматичних змін, які призводять до більш сухих літніх сезонів разом зі зниженням середньорічної кількості опадів, отримані результати свідчать про необхідність підтримки заходів щодо насадження посухостійкими видами рослин та організацію зрошення для підвищення зволоженості ґрунтів, що сприятиме росту трав'яної рослинності та знизить ризик виникнення стихійних пожеж, які знищують деревні насадження.

4. Висновки

Програма довготривалого супутникового знімання Landsat, матеріали якої знаходяться у вільному

доступі, дала змогу проводити широкий спектр досліджень геодинамічних процесів за часовими серіями космічних знімків, отриманих починаючи з кінця 1970-х років.

Оскільки Південь України належить до територій з високим ризиком аридизації та опустелювання, постало актуальне завдання дослідження довготривалих ландшафтних змін, максимально наближених до природних аридних екосистем.

Для більшості досліджуваних територій виявлені тенденції до зниження біопродуктивності, що пов'язано з втратою рослинного покриву на значних територіях, переважно хвойних насаджень, які висаджувались для стримування розширення пісків. На території більшості арен виявлено суттєву реконфігурацію ландшафтів (зникнення деяких типів покриттів на одних територіях та їх поява на інших, передусім це стосується пісків та хвойних насаджень). Найсуттєвіші втрати рослинного покриву виявлено на найбільшій Келегейській арені, а характер поширення втрат рослинності може свідчити про антропогенний фактор впливу (вирубки).

У межах деяких арен виявлено позитивні тенденції, пов'язані зі збільшенням площ деревних насаджень, особливо це стосується Козачелажерської та Іванівської арен, які належать до об'єктів природно-заповідного фонду, а також Чалбаської арени.

Отже, можна зробити загальний висновок про наявність суттєвих деградаційних процесів на значних площах Олешківських пісків, стримати які вдасться у разі реалізації природоохоронних заходів та включення всіх арен Олешківських пісків до об'єктів природно-заповідного фонду. Також кліматичний фактор суттєво впливає на зволоження досліджуваних територій з огляду на те, що аридні ландшафти є особливо уразливими до мінливості зволоження.

Подяки

Дослідження реалізовано в рамках науково-дослідної роботи “Методика оцінювання динаміки опустелювання на основі даних супутникового знімання на прикладі піщаного масиву “Олешківські піски”, яка виконана відповідно до розпорядження Президії НАН України від 16.06.2021 № 308 “Про результати конкурсу проектів науково-дослідних робіт молодих учених НАН України у 2021 р.” та розпорядження Президії НАН України від 15.02.2022 № 116 “Про продовження виконання проектів науково-дослідних робіт молодих учених НАН України у 2022 р.”.

Література

Апостолов, О. А., Єлістратова, Л. О., Романчук, І. Ф., Чехній, В. М. (2020). Виявлення осередків опустелювання в Україні на основі розрахунків водних індексів за даними дистанційного зондування Землі. *Український географічний журнал*, 1, 16–25. doi: 10.15407/ugz2020.01.016.

- Грановська, Л. М. (2019). Гідрологічні та гідрогеологічні особливості утворення і використання Нижньодніпровських пісків. *Екологічні науки*, 3(26), 40–45. doi:10.32846/2306-9716-2019-3-26-8.
- Кривульченко, А. (2019). Олешківські піски як ієрархічно побудована природна система. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*, 53, 197–209. URL: <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/article/view/10666>.
- Afrasinei, G. M., Melis, M. T., & Buttau, C. (2017). Classification methods for detecting and evaluating changes in desertification-related features in arid and semiarid environments. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 2(14). doi:10.1007/s41207-017-0021-1.
- Al-Bakri, J. T., Brown, L., Gedalof, Z., Berg, A., Nickling, W., Khresat, S., Salahat, M., & Saoub, H. (2016). Modelling desertification risk in the north-west of Jordan using geospatial and remote sensing techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 531–549. doi:10.1080/19475705.2014.945102.
- Bakr, N., Weindorf, D. C., Bahnassy, M., & El-Badawi, M. M. (2012). Multi-temporal assessment of land sensitivity to desertification in a fragile agro-ecosystem: environmental indicators. *Ecological Indicators*, 15, 271–280. doi:10.1016/j.ecolind.2011.09.034.
- Barzani, N. M., Khairulmaini O. S. (2013). Desertification risk mapping of the Zayandeh Rood Basin in Iran. *Journal of Earth System Science*, 122(5), 1269–1282. doi:10.1007/s12040-013-0348-1.
- Crist, E. P., Cicone, R. C. (1984). A physically based transformation of Thematic Mapper data – The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 22(3), 256–263. doi:10.1109/TGRS.1984.350619.
- Dalezios, N. R., Eslamian, S. (2017). Environmental Impacts of Drought to Desertification Classification. In: S. Eslamian, & F. Eslamian (Eds.). *Handbook of Drought and Water Scarcity, 1st ed.*, (vol. 2), 45–63. Taylor and Francis: Boca Raton, FL, USA.
- Dawelbait, M., Morari, F. (2012). Monitoring desertification in a Savannah region in Sudan using Landsat images and spectral mixture analysis. *Journal of Arid Environments*, 80, 45–55. doi:10.1016/j.jaridenv.2011.12.011.
- Djeddaoui, F., Chadli, M., Gloaguen, R. (2017). Desertification Susceptibility Mapping Using Logistic Regression Analysis in the Djelfa Area, Algeria. *Remote Sensing*, 9(10), 1031. doi:10.3390/rs9101031.
- Fathizad, H., Ali Hakimzadeh Ardakani, M., Taghizadeh Mehrjadi, R., Sodaiezadeh, H. (2018). Evaluating desertification using remote sensing technique and object-oriented classification algorithm in the Iranian central desert. *Journal of African Earth Science*, 145, 115–130. doi:10.1016/j.jafrearsci.2018.04.012.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. United Nations Environment Programme. (1984). Provisional Methodology for Assessment and Mapping of Desertification. Rome, FAO, UNEP. ISBN: 9789251014424.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez E. P., Gao X., & Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices (2002). *Remote Sensing of Environment*, 83, 195–213. doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- Gao, B. C. (1996). NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266. doi:10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- Kim, K., Wang, M. C., Ranjitkar, S., Liu, S., Xu, L. C., & Zomer, R. J. (2017). Using leaf area index (LAI) to assess vegetation response to drought in Yunnan province of China. *Journal of Mountain Science*, 14, 1863–1872. doi:10.1007/s11629-016-3971-x.
- Khodorovskiy, A. Y., Apostolov, A. A., Yelistratova, L. A., Orlenko, T. A. (2023). Study on Irrigated and Nonirrigated Lands in Ukraine Under Climate Change Based on Remote Sensing Data. In: Pande, C. B., Moharir, K. N., Singh, S. K., Pham, Q. B. & Elbeltagi, A. (Eds.). *Climate Change Impacts on Natural Resources, Ecosystems and Agricultural Systems* (pp. 391–411). Springer Climate. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19059-9_15.
- Laity, J. (2008). *Deserts and Desert Environments*. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Lauwaet, D., van Lipzig, N. P. M., & De Ridder, K. (2009). The effect of vegetation changes on precipitation and Mesoscale Convective Systems in the Sahel. *Climate Dynamics*, 33, 521–534. doi:10.1007/s00382-009-0539-2.
- Li, B. L. (2001). Sandy desertification trend in western Northeast China Plain in the past 10 years. *Acta Geographica Sinica*, 2, 54–61. doi:10.1007/BF02888688.
- Lyalko, V. I., Romanciuc, I. F., Yelistratova, L. A., Apostolov, A. A., & Chekhnii, V. M. (2020). Detection of Changes in Terrestrial Ecosystems of Ukraine Using Remote Sensing Data. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 1(29), 102–110. doi:10.15421/112010.
- Mariano, D. A., Santos, C. A. C., Wardlow, B. D., Anderson, M. C., Schiltmeyer, A. V., Tadesse, T., & Svoboda, M. D. (2018). Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 231, 129–143. doi:10.1016/j.rse.2018.04.048.
- Markham, B. L., Storey, J. C., Williams, D. L., & Irons, J. R. (2004). Landsat sensor performance: history and current status. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(12), 2691–2694. doi:10.1109/TGRS.2004.840720.
- Middleton, N., Thomas, D. (1997). *World atlas of desertification*. London, New York, Sydney, Auckland, Arnold, UNEP.
- O'Leary, D. P. (1990). Robust regression computation using iteratively reweighted least squares. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 11(3), 466–480. doi:10.1137/0611032.
- Richards, J. (1999). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin: Springer-Verlag.
- Rivera-Marin, D., Dash, J., Ogotu, B. (2022). The use of remote sensing for desertification studies: A review. *Journal of Arid Environments*, 206, 104829. doi:10.1016/j.jaridenv.2022.104829.
- Safriel, U., Adeel, Z. (2005). Dryland systems. In *Millennium Ecosystem Assessment*, Chapter 22, World Resources Institute, Island Press, Washington, DC.
- Zanchetta, A., Bitelli, G., Karnieli, A. (2016). Monitoring desertification by remote sensing using the Tasseled Cap transform for long-term change detection. *Natural Hazards*, 83, 223–237. doi:10.1007/s11069-016-2342-9.
- Zeng, N., Yoon, J. (2009). Expansion of the world's deserts due to vegetation-albedo feedback under global warming. *Geophysical Research Letters*, 36(17), L17401. doi:10.1029/2009GL039699.

References

- Afrasinei, G. M., Melis, M. T., Buttau, C. (2017). Classification methods for detecting and evaluating changes in desertification-related features in arid and semiarid environments. *Euro-Mediterr. J. Environ. Integr.*, 2, 14. doi:10.1007/s41207-017-0021-1.

- Al-Bakri, J. T., Brown, L., Gedalof, Z., Berg, A., Nickling, W., Khresat, S., Salahat, M., & Saoub, H. (2016). Modelling desertification risk in the north-west of Jordan using geospatial and remote sensing techniques. *Geomatics Nat. Hazards Risk*, 7(2), 531–549. doi:10.1080/19475705.2014.945102.
- Apostolov, O. A., Yelistratova, L. A., Romanciuc, I. F., Chekhniy, V. M. (2020). Identification of of deserted areas in Ukraine based on calculations of water indices based on remote sensing of the Earth. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 16–25. doi:10.15407/ugz2020.01.016. (In Ukrainian).
- Bakr, N., Weindorf, D. C., Bahnassy, M., & El-Badawi, M. M. (2012). Multi-temporal assessment of land sensitivity to desertification in a fragile agro-ecosystem: environmental indicators. *Ecol. Indic.*, 15, 271–280. doi:10.1016/j.ecolind.2011.09.034.
- Barzani, N. M., Khairulmaini O. S. (2013). Desertification risk mapping of the Zayandeh Rood Basin in Iran. *J. Earth Syst. Sci.*, 122(5), 1269–1282. doi:10.1007/s12040-013-0348-1.
- Crist, E. P., Cicone, R. C. (1984). A physically based transformation of Thematic Mapper data – The TM Tasseled Cap. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 22(3), 256–263. doi:10.1109/TGRS.1984.350619.
- Dalezios, N. R., Eslamian, S. (2017). Environmental Impacts of Drought to Desertification Classification. In: S. Eslamian, & F. Eslamian (Eds.). *Handbook of Drought and Water Scarcity, 1st ed.*, (vol. 2), 45–63. Taylor and Francis: Boca Raton, FL, USA.
- Dawelbait, M., Morari, F. (2012). Monitoring desertification in a Savannah region in Sudan using Landsat images and spectral mixture analysis. *J. Arid. Environ.*, 80, 45–55. doi:10.1016/j.jaridenv.2011.12.011.
- Djeddaoui, F., Chadli, M., Gloaguen, R. (2017). Desertification Susceptibility Mapping Using Logistic Regression Analysis in the Djelfa Area, Algeria. *Remote Sens.*, 9(10), 1031. doi:10.3390/rs9101031.
- Fathizad, H., Ali Hakimzadeh Ardakani, M., Taghizadeh Mehrjadi, R., Sodaiezadeh, H. (2018). Evaluating desertification using remote sensing technique and object-oriented classification algorithm in the Iranian central desert. *J. Afr. Earth. Sci.*, 145, 115–130. doi:10.1016/j.jafrearsci.2018.04.012.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. United Nations Environment Programme. (1984). *Provisional Methodology for Assessment and Mapping of Desertification*. Rome, FAO, UNEP. ISBN: 9789251014424.
- Gao, B. C. (1996). NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.*, 58, 257–266. doi:10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- Granovska, L. M. (2019). Hydrological and hydrogeological features of formation and use of Nizhny Dnieper sands. *Ecological Sciences*, 3(26), 40–45. doi:10.32846/2306-9716-2019-3-26-8. (In Ukrainian).
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez E. P., Gao X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 83, 195–213. doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- Kim, K., Wang, M. C., Ranjitkar, S., Liu, S., Xu, L. C., & Zomer, R. J. (2017). Using leaf area index (LAI) to assess vegetation response to drought in Yunnan province of China. *J. Mountain Sci.*, 14, 1863–1872. doi:10.1007/s11629-016-3971-x.
- Khodorovskiy, A. Y., Apostolov, A. A., Yelistratova, L. A., Orlenko, T. A. (2023). Study on Irrigated and Nonirrigated Lands in Ukraine Under Climate Change Based on Remote Sensing Data. In: Pande, C. B., Moharir, K. N., Singh, S. K., Pham, Q. B. & Elbeltagi, A. (Eds.). *Climate Change Impacts on Natural Resources, Ecosystems and Agricultural Systems* (pp. 391–411. Springer Climate. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19059-9_15.
- Kryvulchenko, A. (2019). Oleshky sands as a hierarchically constructed natural system. *Bulletin of Lviv University. The geographical series*, 53, 197–209. URL: http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/article/view/10666. (In Ukrainian).
- Laity, J. (2008). *Deserts and Desert Environments*. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Lauwaet, D., van Lipzig, N. P. M., De Ridder, K. (2009). The effect of vegetation changes on precipitation and Mesoscale Convective Systems in the Sahel. *Clim. Dyn.*, 33, 521–534. doi:10.1007/s00382-009-0539-2.
- Li, B. L. (2001). Sandy desertification trend in western Northeast China Plain in the past 10 years. *Acta Geographica Sinica*, 2, 54–61. doi:10.1007/BF02888688.
- Lyalko, V. I., Romanciuc, I. F., Yelistratova, L. A., Apostolov, A. A., & Chekhniy, V. M. (2020). Detection of Changes in Terrestrial Ecosystems of Ukraine Using Remote Sensing Data. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 1(29), 102–110. doi:10.15421/112010.
- Mariano, D. A., Santos, C. A. C., Wardlow, B. D., Anderson, M. C., Schiltmeyer, A. V., Tadesse, T., & Svoboda, M. D. (2018). Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. *Remote Sens. Environ.*, 231, 129–143. doi:10.1016/j.rse.2018.04.048.
- Markham, B. L., Storey, J. C., Williams, D. L., Irons, J. R. (2004). Landsat sensor performance: history and current status. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 42(12), 2691–2694. doi:10.1109/TGRS.2004.840720.
- Middleton, N., Thomas, D. (1997). *World atlas of desertification*. London, New York, Sydney, Auckland, Arnold, UNEP.
- O’Leary, D. P. (1990). Robust regression computation using iteratively reweighted least squares. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 11(3), 466–480. doi:10.1137/0611032.
- Richards, J. (1999). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin: Springer-Verlag.
- Rivera-Marin, D., Dash, J. & Ogutu, B. (2022). The use of remote sensing for desertification studies: A review. *J. Arid Environ.*, 206, 104829. doi:10.1016/j.jaridenv.2022.104829.
- Safriel, U., Adeel, Z. (2005). Dryland systems. In *Millennium Ecosystem Assessment*, Chapter 22, World Resources Institute, Island Press, Washington, DC.
- Zanchetta, A., Bitelli, G., Karnieli, A. (2016). Monitoring desertification by remote sensing using the Tasseled Cap transform for long-term change detection. *Nat. Hazard.*, 83, 223–237. doi:10.1007/s11069-016-2342-9.
- Zeng, N., Yoon, J. (2009). Expansion of the world’s deserts due to vegetation-albedo feedback under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, 36(17), L17401. doi:10.1029/2009GL039699.

EVALUATION OF INDICATORS FOR DESERTIFICATION RISK ASSESSMENT OF OLESHKY SANDS DESERTIFICATION BASED ON LANDSAT DATA TIME SERIES

M. S. Lubskeyi, T. A. Orlenko, I. O. Piestova, A. A. Andreiev, A. R. Lysenko

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

Earth's surface monitoring allows the assessment of the dynamics and mapping of desertification indicators and is currently one of the priority research regions in remote sensing. In addition to the fact that desertification is a serious global threat to economic, social and food security, the risks of desertification have also become relevant for southern Ukraine. In recent years, climate change has become more and more noticeable in Ukraine. As a result, the time frames of the seasons are blurred, the boundaries of natural zones are shifting, abnormal values of meteorological indicators are increasingly observed, and the intensity of natural disasters is increasing. Since southern Ukraine is most vulnerable to adverse climate and landscape changes, including desertification, the article considered long-term landscape changes on the right bank of the Dnieper River in the Kherson region, mainly represented by sandy massifs of the Oleshky region, which are called the Oleshky Sands. Arid landscapes, which include the vast majority of Oleshky, are especially vulnerable to degradation processes, so space monitoring this territory is an urgent task given the current global climate changes. Within the framework of the presented study, the long-term dynamics of several indicators of desertification within the sandy arenas of the Oleshkovsky sands were mapped. Based on a series of multispectral space images obtained by Landsat satellites for the period 1986-2020 was considered. Spectral ranges characterize the key biophysical aspects of arid landscapes: the degree of soil moisture, vegetation density and sand distribution. Regression analysis was used to illustrate the dynamics of each indicator, which showed a general increase in each indicator over the experimental period. Furthermore, we determined the relationship between the values of the rise in desertification indicators and landscape changes that occurred in the research region, the classification of several images for different years was also carried out, and spatial and quantitative changes in the distribution of land cover classes were characterized.

Keywords: desertification, satellite monitoring, land cover classification, regression analysis, spectral index, biophysical indicator, climate change.

Рукопис статті отримано 31.01.2023