



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.2.228>

УДК 504.064.3:(528.831.5:629.783)

## Супутниковий моніторинг стану геосистеми локального рівня на прикладі Матвіївського лісу поблизу м. Миколаєва (Україна)

Л. П. Ліщенко

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

Метою роботи є демонстрація можливостей застосування багаторічних рядів супутникових даних для дослідження та аналізу окремої самоорганізованої геосистеми локального рівня з метою визначення тенденцій і змін, що відбуваються в геосистемах на регіональному рівні. За приклад взята ділянка, що зазнає швидкоплинних змін під дією природних та антропогенних чинників, а саме невелика південностепова ділянка рукотворного лісового масиву “Матвіївський ліс” поблизу м. Миколаєва, що розташована на лівобережжі р. Південний Буг. Для аналізу використаний багаторічний ряд багатоспектральних даних місії Landsat (за період 32 роки) та Sentinel-2 останніх років, за якими встановлюються залежності, що існують між станом геосистеми, температурою поверхні (LST) та рослинністю. Визначено, що показники вегетаційного індексу NDVI та LST знаходяться в протифазі. Але кореляційні залежності між ними становлять лише 0,56, тому що на локальному рівні існують інші чинники, такі як зволоженість ґрунту, форма рельєфу, стан погоди на час знімання, які впливають на обраховані показники. За даними Sentinel-2 простежені та закартовані зміни, що відбуваються – порушення геологічного середовища через стихійне видобування піску, зменшення насаджень внаслідок лісових пожеж, природна саморегуляція та відновлення рослинного покриву в геосистемі після припинення видобування піску та завдяки висадженню нових масивів дерев. Ця геосистема зазнає постійних трансформацій у часі і просторі, є нестабільною і зазнавала значних змін, однак, завдяки природоохоронним заходам, зберігає свої рекреаційні і відновлювальні функції. Багатовимірна інформація найкраще відображається та аналізується за допомогою профілів-трансект, що різнобічно характеризують геосистему “Матвіївський ліс”, зокрема геологічне середовище, рослинність, теплові характеристики поверхні, часову та просторову мінливість стану земного покриву, а також надалі може бути використана для дослідження інших біофізичних параметрів, отриманих за супутниковими даними. Методичний підхід із застосуванням профілювання локальної геосистеми з комплексуванням різних за характеристиками супутникових даних можна успішно використовувати для екологічного менеджменту конкретної ділянки в будь-яких природних умовах та показати її вразливість до антропогенних навантажень.

**Ключові слова:** моніторинг, багаторічний ряд супутникових даних, Sentinel-2, Landsat, геосистема, температура поверхні, вегетаційний індекс.

© Л. П. Ліщенко. 2023

### Актуальність

Беззаперечним є твердження про глобальні кліматичні зміни та перетворення, які відбуваються і очікуються в світовій екосистемі та вже підтверджуються на регіональному і локальному рівні дослідниками різного фаху. Можливість відстежувати зміни, що відбуваються в геосистемах різного рівня, та контролювати їх стан надають засоби дистанційного зондування Землі, а також застосування супутникових даних різної детальності та діапазонів, що фіксують різноманітні біофізичні властивості земної поверхні. Кліматичні зміни, що відбуваються зараз, простежуються у змінах режиму зволоження, термічних характеристиках, зміщенні меж кліматичних зон, зростанні повторюваності та інтенсивності екстремальних умов погоди, небезпечних явищ тощо. Це призводить до трансформації всіх складових біосфери: найбільш

показово проявляються в гідро- та геосфері та візуалізуються на матеріалах супутникового знімання. Особливо впливає на зміну екостану земної поверхні людська діяльність, зокрема, антропогенне навантаження.

### Мета дослідження

Регіональні зміни, що відбуваються в екосистемі і підтверджуються на локальному рівні, є найбільш доказовими. Тож досліджуючи і аналізуючи окрему, історично обумовлену та окреслену, геосистему за допомогою комплексу супутникових даних, історичних документів, сучасних джерел інформації, можна довідатися про трансформації, яких вона вже зазнала в часі, та простежити в цілому регіональні тенденції розвитку системи. Така прикладна робота показує можливості використання і опрацювання комплексу доступних мультиспектральних супутникових даних для отримання різнобічної інформації про досліджуваній ландшафт, земний

E-mail: [Lischenko.lp@gmail.com](mailto:Lischenko.lp@gmail.com)

покрив або будь-яку іншу територіально окреслену ділянку. Екостан геосистеми характеризується певними біофізичними показниками, що фіксуються дистанційно в певних діапазонах спектра, і його можна якісно показати шляхом дешифрування дистанційного образу земного покриття або кількісно через розрахунки спектрального відбиття для певних параметрів геосистеми за допомогою індексів. Перевагою індексів вважається їх відносна легкість отримання та різноманітність варіантів використання у просторі та часі, що дає змогу аналізувати природні поверхні, порівнюючи різні ландшафтні особливості та біофізичні показники. Часовий аналіз показує тенденції змін або кореляційні залежності, що існують для певної точки простору або ландшафтного утворення в часі за окремими показниками. Для відпрацювання цього підходу обрано цікаву ділянку – Баловно-Матвіївське урочище, яке розташоване поблизу м. Миколаєва у долині р. Південний Буг.

### Вихідні дані

Уздовж лівого берега Південного Бугу на північному заході від м. Миколаєва розташоване рукотворне лісове Баловно-Матвіївське урочище, яке простягається від с. Матвіївки до села Баловного, займає площу понад 565 гектарів. Воно з'явилося внаслідок насадження соснового лісу в 50-х роках двадцятого сторіччя, доти тут існували піщані кучугури, що простягалися уздовж річки на декілька кілометрів на першій надзаплавній терасі. Піщані масиви були непридатні для сільського господарства, в улоговинах існували гігрофітні біоценози, що перемежовувалися з псамофітними, лише місцями зайняті фруктовими садами колишніх селянських садиб. Також було багато викопаних людьми криниць, бо вода знаходилася на метр від поверхні ([https://uk.wikipedia.org/wiki/Матвіївка\\_\(Миколаїв\)#Матвіївський\\_ліс](https://uk.wikipedia.org/wiki/Матвіївка_(Миколаїв)#Матвіївський_ліс)). На сьогодні у штучних лісових насадженнях, крім насаджених сосни та дуба черешчатого та червоного, зростають – осика, маслинка, верба, тополя та кущі шипшини, бузини, глоду, також тут сформувалося різноманіття трав'янистої рослинності. Це стало можливим через специфічні умови рельєфу місцевості, що має хвилясто-горбистий вигляд, ускладнений великою кількістю як природних (еолово-дефляційних), так і штучних (піщані кар'єри) від'ємних форм рельєфу (Рис. 1).



Рис. 1. Ландшафти Матвіївського урочища. (Фото Сергій Савченко, 2018)

Основні екологічні проблеми, які вже десятки років існують у Матвіївському лісовому урочищі – пошкодження соснової посадки короїдами, незаконна вирубка дерев, пожежі, завезення сміття до лісу (переважно з навколишніх сіл та дачних товариств). Та найбільшою шкоди екологічному стану завдало нелегальне видобування піску на території лісу, що призводило до падіння сосон, утворення галєвин, порушення сталих біоценозів (Сергій Савченко 2018). Методично та цинічно протягом багатьох років ліс знищувався. Як зазначає екоактивіст Олег Дорош (2016), ліс був схожий на переоране поле. Довгі глибокі ями перерізали його на клаптики, подекуди лишаючи лише невеликі соснові острівки. Всього в лісі нараховувалося 22 піщаних кар'єри, а дерева, що росли на краю цих кар'єрів були приречені на загибель (Рис. 2). Нині на місці покинутих піщаних кар'єрів лісники та активісти висаджують саджанці сосни, черешчатого та червоного дуба, катальпи.



Рис. 2. Вигляд лісового масиву внаслідок видобування піску. Закинуті піщані кар'єри. (Фото Олега Дороша, 2016)

Для порятунку цієї екосистеми нині проїзд через ліс заборонено. Активісти Матвіївки поставили загороджувальні знаки і зробили спеціальні рови на дорогах, тим самим рятуючи від недбайливих водіїв галєвини та стежки, а також організують патрулювання. В літній період ще більшої шкоди екологічному стану завдають періодичні пожежі, причиною яких є недопалки, непогашене багаття, сміття. Так, у 2017 році, за даними ДСНС Миколаївської області, пожежі завдали шкоди 3,5 тис. м<sup>2</sup> лісових насаджень (Рис. 3) (Олена Івашко, 2017).



Рис. 3. Ліквідація підпалу в Матвіївському лісі. (Фото Олега Дороша та ДСНС Миколаївської обл.)

Сосна в такому кліматі, на думку спеціалістів, живе близько 90 років, отже насадженим у 1952–1960 роках деревам при бережливому ставленні

лишилося існувати до 20 років. Тому висаджується новий ліс, переважно сосна і дуб. Але приживаність їх невелика, за інформацією Сергія Савченка (2018) із 2 тисяч саджанців 2017 року вижило лише 10%. З часом, після жакливого занепаду, у лісі відновлюються властиві цій території біоценози, а в кар'єрах з'являються молоді дерева і зарості чагарників, тобто вторинні сукцесії (Рис. 4).



Рис. 4. Різновікові насадження, що відображені у значеннях вегетаційного індексу. (Фото Олега Дороша, 2016)

### Методика досліджень

Без даних супутникового багатоспектрального знімання вже не можна уявити жодне дослідження і моніторинг геоecологічного стану геосистеми будь-якої детальності. Для різних завдань використовуються дані різного просторового розрізнення та спектральних діапазонів. Так, методика застосування інфрачервоних і теплових каналів космічного зондування та результати досліджень теплового поля земної поверхні викладені в низці зарубіжних публікацій (Qihao Weng et al., 2004; Xiaoma Li et al, 2012; Perez Hoyos Isabel C., 2014), а також в публікаціях сучасних українських вчених (С. А. Станкевич та ін., 2015; М. С. Лубський, 2017). Крім дослідження теплового стану поверхні досліджують вологість поверхні, видові та вегетаційні характеристики рослинності, класифікують поверхню за ландшафтними ознаками, визначають певні біофізичні параметри системи за індексами та встановлюють залежності між ними (М. О. Попов та ін., 2012; І. О. Пестова, 2015; Л. П. Ліщенко та ін., 2019, 2021). Оскільки кожна геосистема є динамічною, то в ній відбуваються як довготривалі процеси і перетворення, що залежать від змін клімату та саморозвитку геосистеми (зародження – розвиток – зрілість – старіння – відмирання), так і швидкоплинні – пов'язані із стихійними явищами чи антропогенним впливом (буреломи, повені, пожежі, вирубання, порушення геологічного середовища тощо). Супутникові дані вибираються відповідно до поставлених завдань, періодичності отримання, існуючого часового ряду знімання.

Візуальне дешифрування зміни меж, яскравості, структури і текстури об'єктів на локальному рівні краще проводити за детальним інтегральним існуючим аерофотозніманням, космічними знімками високого розрізнення та перевіркою ситуації з історичними даними з Google Earth. Для просторового аналізу компонентів і параметрів геосистеми доцільно використовувати не тільки класифікацію земних покривів (land cover

classification), а передусім площинний розподіл вегетаційних та інших розрахованих індексних значень спектральної яскравості поверхні у видимому та ІЧ-діапазоні, що характеризують певні біофізичні параметри системи (*caйт index.database.de*), а також враховувати температурне поле поверхні (LST – land surface temperature) або температурні градієнти, які існують на час знімання між різними ландшафтними комплексами, зокрема тими, що зазнали значних природно та антропогенно зумовлених порушень (вирубка, посадка, пожежа, рекультивация тощо).

Такий аналіз краще та ефективніше виконувати за допомогою профілювання (закладання трансект) через ділянки, що зазнали найбільших трансформацій. Профіль проводиться за принципом перетину найбільш значущих ділянок різних ландшафтно-функціональних зон, він трасується через певні точки, які надалі аналізуються, залежно від потреби вивчення конкретних параметрів біофізичних показників об'єктів, і дає змогу отримати не тільки просторовий, а й часовий розподіл показника, обчисленого в результаті обробки мультиспектрального зображення.

У своєму дослідженні зупинимось на використанні попиксельного розрахунку температури земної поверхні через спектральну щільність енергетичної яскравості наземної температури для всіх даних Landsat, отриманих із сенсорів MSS, TM, ETM та OLI, починаючи з 1985 року. Ці радіаційні значення були модифіковані, розраховані і застосовані для теплових каналів за оберненою формулою Планка та з урахуванням нормалізованого вегетаційного індексу NDVI та поправкою на сенсор. Отримані дані приведені до просторового розрізнення 30 м на піксел. Методика розрахунків викладена в роботі С. А. Станкевича та ін., 2015.

Розрахункам вегетаційного індексу та кореляції його з LST присвячені роботи Van De Griend A. A. et al, 1991, 2007; Quattrochi Dale et al, 1994. У цих дослідників кореляція між показниками становила 0,86. Нами при розрахунку LST вже зроблені поправки на характеристику поверхні завдяки індексу NDVI і тому отримана обернена залежність з кореляцією, що становить лише 0,56.

У процесі інтерпретації даних використовуються не стільки абсолютні показники температури поверхні і розміщення кривих одна відносно іншої на температурній осі, а аналізується характер поведінки кривої LST у кожній точці в часі – підняття, падіння, нахили або синхронізація їх поведінки на конкретних об'єктах чи в межах певних ландшафтних систем. Досліджуючи часовий ряд знімків також можливий розрахунок середніх значень за весь період та прирости температури поверхні у частках градуса за рік для певних об'єктів чи площ.

Крім того, проводилась керована класифікація досліджуваної ділянки за типами земного покриття та його характеристиками більш відомим у світовій літературі за терміном Land Cover та визначалась його змінюваність. Для всіх рішень застосовувався єдиний робочий програмний інструментарій



універсальної повнофункціональної ГІС MapInfo Professional, а обробка дистанційної інформації за допомогою продукту ENVI.

### Результати роботи

За допомогою супутникових матеріалів нами простежено, як змінюється в часі дистанційний образ ландшафтів Матвіївського урочища за багатоспектральними космічними знімками середнього просторового розрізнення місії Landsat-5, 7, 8 (з 1985 до 2018 р.), високого просторового розрізнення (дані з Sentinel-2 (2018–2019 рр.) та дані з публічних супутникових зображень Google Earth за останні 15 років.

Розрахована температура земної поверхні за тепловими каналами Landsat звичайно має ситуаційний характер та значні варіації за сезонами і часом знімання. З метою нівелювання впливу погодних умов вибрано знімки для липня і серпня, що мали приблизно однакові показники температури повітря та розрахованої температури поверхні з визначенням середніх, максимальних і мінімальних значень та середньоквадратичних відхилень температури поверхні на момент космічного знімання. За цими ж багатоспектральними знімками були визначені зміни показників вегетаційних індексів, а за тепловими каналами LST, – все це характеризує стан лісового масиву в динаміці. Дані використаних теплових каналів Landsat наведені в Таблиці.

**Таблиця.** Перелік КЗ Landsat, що використовувалися для аналізу та моніторингу розподілу поверхневих температур

Дата	Мін. $t^{\circ}\text{C}$ поверхні	Макс. $t^{\circ}\text{C}$ поверхні	Середня $t^{\circ}\text{C}$ поверхні	StDev	$t^{\circ}\text{C}$ повітря на 12 <sup>00</sup>	Джерела отримання даних про температуру повітря
LT05 1985-08-27	22.825195	43.140045	34.624643	4.661925	–	–
LT05 1986-08-30	22.639832	45.235077	36.146986	5.164555	–	–
LT04 1998-15-08	21.714417	48.008423	34.174319	5.073773	+27	<a href="https://www.gismeteo.ru">https://www.gismeteo.ru</a>
LT05 2000-08-20	24.201050	45.636841	36.970093	4.941614	+34	<a href="https://www.gismeteo.ru">https://www.gismeteo.ru</a>
LT05 2003-08-27	22.321167	41.532684	33.511797	4.437402	23–24	<a href="https://meteo.ua/archive/112/nikolaev/">https://meteo.ua/archive/112/nikolaev/</a>
LT05 009-08-29	22.454681	53.763397	37.732726	5.937616	22–25	<a href="https://meteo.ua/archive/112/nikolaev/">https://meteo.ua/archive/112/nikolaev/</a>
LC08 2015_08.30	26.052979	47.606995	37.280791	4.590212	22–23	<a href="https://meteo.ua/archive/112/nikolaev/">https://meteo.ua/archive/112/nikolaev/</a>
LC08 2018-08-24	23.596008	45.708649	35.851501	4.794822	+27	<a href="https://meteo.ua/archive/882/nikolaev">https://meteo.ua/archive/882/nikolaev</a>

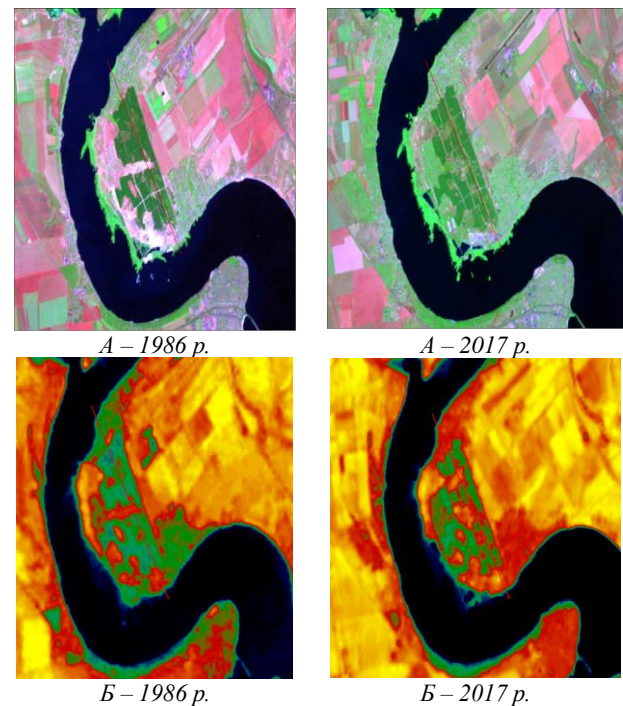
Отримані та сукупно проаналізовані дані дають змогу визначити динаміку екологічного стану цього лісового масиву в часі на різних рівнях детальності як просторово, так і за допомогою окремих профілів – трансект (Л. П. Ліщенко та ін., 2019, 2021). Профіль, на якому визначалися ці показники простягається через лісовий масив з півдня на північ. У декількох місцях він перетинає просіки, дороги, галявини з трав'яною рослинністю та колишні кар'єри з видобутку піску різної стадії заростання, а також вигорілу у 2017 році ділянку лісу (Рис. 5). Ці ділянки зазнали найбільших змін ландшафтного образу території за супутниковими даними і є найбільш проблемними в геоекологічному відношенні. Аналіз кривих на профілі дає змогу відстежити зміни, що відбулися на території стихійних піщаних кар'єрів, молодих насаджень, ділянок пожеж.

Вся довжина профілю становить 180 пікселів, у кожному з яких 30 м на місцевості (5400 метрів). На цьому трансекту ми аналізували і порівнювали:

1) гіпсометричні дані поверхні за допомогою побудованої DEM (Рис. 6);

2) дані про температурні показники поверхні (LST) за весь період спостережень для серпня. Але найбільш інформативними виявились дані 5 часових зрізів КЗ Landsat за період з 1986 до 2017 року (Рис. 7);

3) розподіл вегетаційного індексу NDVI за такий же проміжок на тих самих точках профілю для 5 часових зрізів (Рис. 8).



**Рис. 5.** Порівняння липневих знімків Landsat за 1986 та 2017 роки у видимому (А) і тепловому діапазонах (Б). Профіль показаний червоною лінією

Перевагою використання вегетаційних індексів вважається їх відносна легкість отримання та різноманітність варіантів їх використання у просторі та часі, що дає змогу аналізувати природні поверхні, порівнюючи різні ландшафтні умови та стани. Вегетаційний індекс NDVI змінюється у часі завдяки

декільком чинникам. Він зменшується на вирубках або вигорілих ділянках (точки 50, 52, 91, 111), збільшується при насадженні нових дерев (точка 88). А зростання дерев і більша зімкнутість крони сприяє збільшенню значень вегетаційного індексу в часі (проміжки між точками 26–41, 56–66, 92–109, 125–126). Найбільших коливань цей показник зазнає після 2003 року, коли між точками 46–56 на місці кар'єру з низьким показником NDVI з'явилися молоді насадження, які дали приріст значень індексу через декілька років (Рис. 8).

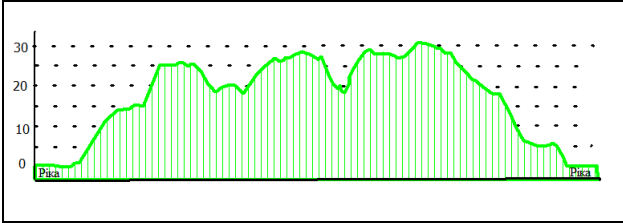


Рис. 6. Гіпсометричний профіль через Матвіївський ліс

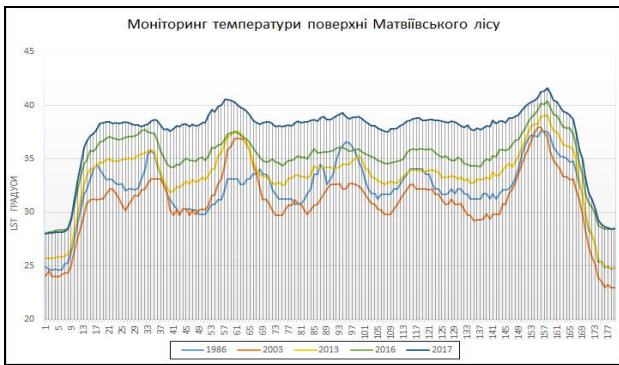


Рис. 7. Профіль через Матвіївський ліс. Моніторинг LST з 1986 до 2017 року, серпень (5 часових зрізів)

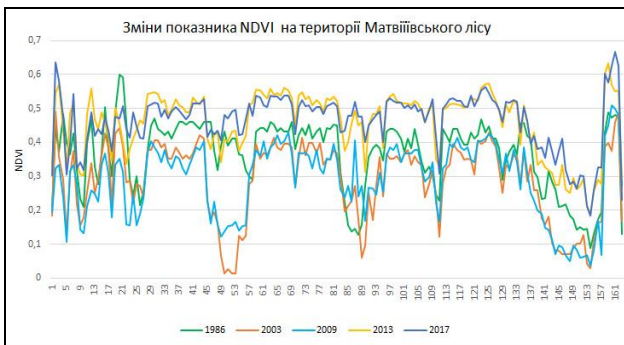


Рис. 8. Профіль через Матвіївський ліс. Моніторинг показника NDVI з 1986 до 2017 року (5 часових зрізів)

Аналіз температурного профілю поверхні станом на серпень, показав, що при постійному зростанні температури за роками, вона все слабше реагує на особливості ландшафтної структури поверхні. Якщо амплітуда перепаду LST в межах лісового масиву у 1986–2010 роках у серпні становила до 10°C, підвищуючись над галявинами, ямами, кар'єрами, то в останні 2013–2017 роки температурна крива профілю вирівнюється, а перепади температури в різних ландшафтних умовах стають менш значними, не більше 5°C. Очевидно, це відбувається за рахунок заростання і засадження галявин деревами і кущами на раніше порушених землях. До того ж, лісовий масив став більш зрілим, хоча з часом деревостан

дуже пошкоджується короїдом і щільність крони старого масиву стає меншою, що сприяє прогріванню і загальному збільшенню температури поверхні, тому і криві стають менш амплітудними і більш пологими.

Окремі ділянки молодих насаджень (точка 106, 126) на серпень мають більш високий вегетаційний показник NDVI 0,56 на фоні основного старого лісу (показник 0,45–0,5). Взагалі показники індексу невисокі, тому що розрахунки проводились за серпневими зображеннями, коли вже спостерігається спад сезонної вегетації. Проте, загальний показник NDVI над лісовим масивом став вищим порівняно з 2003–2009 роками, коли існували значні перепади над відкритими незалісненими ділянками (в межах точок 51–56, 91–96, 111–116). Передовсім це спостерігається в точці 51, де чітко видно, що на зміну відкритому простору з низьким NDVI (кар'єр), а отже, високою температурою прийшли рослинні угруповання з більш осередненими показниками. На початку і кінці профілю значні коливання температур, насамперед вегетаційного індексу, спостерігаються тому, що перетинаються антропогенні ландшафти, зокрема садівничий кооператив на півночі (кінець профілю) і промислові об'єкти на півдні (початок профілю).

У результаті зіставлення всіх даних по профілю встановлена обернена залежність між температурою поверхні та індексом NDVI та дуже складні і неоднозначні залежності з гіпсометричним профілем (він має узагальнений вигляд через загрубленість даних цифрової моделі рельєфу по DEM із кроком 10 м).

Використавши для аналізу видимі діапазони з високим просторовим розрізненням (1–5 м) з Google Earth, добре підтверджуються всі трансформації лісового масиву, що відбулися внаслідок видобутку піску: засипання кар'єрів (1), стихійне заростання галявин (2), пожежі в лісовому масиві (3), насадження молодих дерев (4). На Рис. 9 порівнюється стан екосистем 2004 і 2018 років і цифрами показані ділянки, на яких зафіксовані зовнішні видимі зміни в екосистемі за цей період. Результати порівняння зміни поверхневого стану саме геологічного середовища, що відбулися за досліджуваний період та виявлені за цими знімками, демонструються на Рис. 10.



А – 2004 р.

Б – 2018 р.

Рис. 9. Порівняння дистанційного образу лісового масиву станом на 2004 та 2018 роки за супутниковими знімками високого просторового розрізнення: 1 – піщані кар'єри та їх рекультивация, 2 – ділянка пожежі, 3 – ділянки відновленої рослинності, 4 – молоді насадження



Швидкоплинні зміни, що відбуваються в геосистемі, можна простежити, використавши дані Sentinel-2 у видимому та інфрачервоному діапазонах, прораховуючи індексні показники та аналізуючи дані окремих діапазонів. Поєднання відносно високої просторової і високої спектральної розрізненості, значної смуги захоплення та високої частоти повтору знімання (3–6 діб у північних широтах) є унікальною перевагою знімальної системи Sentinel-2, знімки якої наявні у вільному доступі через відкритий веб-сервіс Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

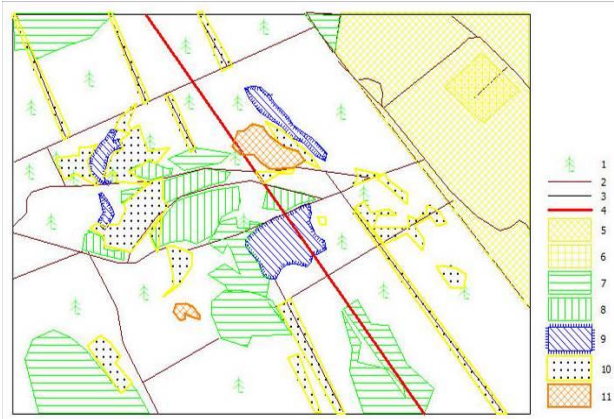


Рис. 10. Результати дешифрування змін земного покриття на ділянці Матвійського лісу:

- 1 – лісовий масив, 2 – дороги, 3 – межі ділянки,
- 4 – профіль, 5 – сільськогосподарські землі, 6 – кладовище,
- 7 – самозаростаючі ділянки, 8 – молоді насадження,
- 9 – колишні кар'єри, 10 – незакріплені піщані поверхні,
- 11 – ділянки лісових пожеж

Досліджувана південностепова геосистема дуже страждає від частих сезонних пожеж. Так, 15 травня 2018 р. у Баловно-Матвійському лісовому урочищі стався підпал. Площа пошкодженої хвойної підстилки склала 600 м<sup>2</sup> (АгроЮг, 2018). Пожежа була локалізована спільними зусиллями пожежників та небайдужими громадянами. Такі пожежі відбувались і в попередні роки (Олена Івашко, 2017) На Рис. 11 порівнюються зображення композиту 4, 8 і 3 каналів КЗ Sentinel-2, що отримані у травні 2018 і у вересні 2019 року. Відмінність кольору зображень залежить від різних аспектів рослинності на композиті одних і тих же каналів та обумовлена різним сезоном знімання.

Для кращої візуалізації даних були протрасовані профілі через зазначену ділянку із середньою довжиною хвилі у спектральних діапазонах – зелений (559 нм – канал 3), червоний (665 нм – канал 4) та інфрачервоний (855 нм – канал 8), що мають просторове розрізнення 10 м (Рис. 11).

Вигоріла внаслідок пожежі ділянка локалізується на профілі між пікселами 9 і 29 (на осі Location). Одразу після пожежі темні вигорілі ділянки поверхні мали високий коефіцієнт поглинання у ІЧ-діапазоні, а також зафіксовано низхідне падіння кривих в інших діапазонах. Вже через рік після пожежі відбивна властивість сильно зросла в усіх каналах, зокрема ІЧ за рахунок появи відкритої піщаної поверхні, що з'явилася на місці згарища після його

розчищення і на графіку цей проміжок характеризується підвищенням кривої відбиття у всіх діапазонах.

Можна також використовувати для аналізу зміни, що відбуваються в геосистемі індексних показників, таких як: вегетаційний, червоного краю рослинності, водний, вологості, сухості тощо. Для обробки і розрахунку даних Sentinel-2 доцільно застосувати програмний продукт SNAP.

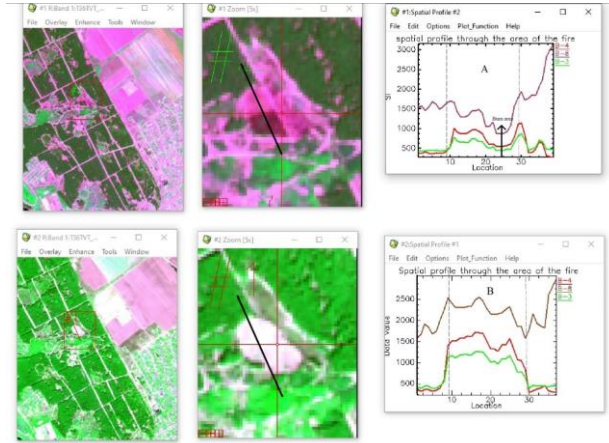


Рис. 11. Порівняння спектральних графіків Sentinel-2, канали 4, 8 3 у місці пожежі: А – згарище (23.05.2018), В – розчищена ділянка після пожежі (15.09.2019)

## Висновки

Зміни геоекологічного стану екосистем та багаторічні зміни фітоценозів, що з цим пов'язані, супроводжуються як сезонною, так і багаторічною динамікою спектрально-відбивних властивостей земної поверхні на супутникових зображеннях. Прикладом такого комплексного вивчення на різних рівнях детальності дистанційних матеріалів є Матвійський ліс, розміром в 6.5 км<sup>2</sup>. Дані КЗ серії Landsat були використані для довгострокового моніторингу розподілу теплового поля поверхні для літніх місяців за більш ніж 30-річний період. Були простежені зміни вегетаційного індексу NDVI у зв'язку зі зміною біофізичного стану лісового масиву за цей період у моніторинговому режимі. За показниками NDVI та LST визначені ділянки земель, порушених піщаними кар'єрами, пошкоджених пожежами, ділянки молодих насаджень та вирубок унаслідок коливань рівня вегетації та збільшення теплового навантаження, що відбуваються з часом під дією природних та антропогенних чинників. Супутникові дані Sentinel-2 дали змогу простежити короткострокові зміни, що відбулися в лісовому масиві, а саме: порушені фітоценози внаслідок пожеж, ділянки вирубок або нових насаджень дерев, порушення ґрунтового покриття та геологічного середовища внаслідок техногенного впливу. Потрібно відзначити, що зусилля активістів та екологічно свідомих громадян підтримує цю геосистему в задовільному стані, незважаючи на загальне підвищення температури поверхні та значний антропогенний вплив. Ця система виконує свою рекреаційну і самовідновлювальну (віталізаційну) функцію. Комплексування знімків

різного просторового розрізнення і використання широкого спектра діапазонів знімання від синіх до теплових дає змогу вивчати конкретні локальні природні об'єкти і геосистеми та зміни їх біофізичних характеристик в моніторинговому режимі.

### Новизна роботи

Регіональні прогнози потрібно підтверджувати дослідженням геосистем локального рівня і в статті на прикладі окремої лісової геосистеми локального рівня показаний підхід до використання доступної інформації про її стан із залученням різних джерел (історичних, природничих, даних ЗМІ та ДСНС тощо) та комплексування її даними супутникового моніторингу. Розглянуті і запропоновані найбільш прийнятні методики опрацювання доступної супутникової інформації різного рівня детальності. Робота має прикладне спрямування, її можна використовувати в природоохоронних планувальних та доказових правових заходах, вона дає змогу зробити науковий прогноз розвитку екологічного стану геосистем.

### Література

- АгроЮг, (16.06.2018). У Матвївському лісі під Миколаєвом сталася пожежа. Взято з <http://agro-yug.com.ua/archives/10508>.
- Дані ДСНС Миколаївської області. Взято з <https://mk.dns.gov.ua/ua/Nadzvichayni-podiyi/15872.html>
- Дорош, Олег (08.11.2016). Нелегке життя Матвївського лісу. Хто оберігає легені Миколаєва? *Миколаївська правда*. Взято з <http://www.nikpravda.com.ua/nelegke-zhittya-matviyivskogo-lisu-hto-oberigaye-legeni-mikolayeva>.
- Івашко, Олена (31.08.2017). Чи вистоять зелені оази степу? *Урядовий кур'єр*. Взято з <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/chi-vistoyat-zeleni-oazi-stepu>.
- Ліщенко, Л. П., Пазинич, Н. В., Філіпович, В. Є. (2019). Аналіз розподілу літніх температур поверхні міста Миколаєва за даними теплового діапазону супутників серії Landsat. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 21, 49–59. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2019.21.148>.
- Ліщенко, Л. П., (2019). Вплив рослинності на сезонну мінливість температурного поля поверхні в місті Київ в межах різних ландшафтно-функціональних зон за супутниковими даними. С. О. Довгий (Ред.), *Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях* (с. 126–130). Київ: ТОВ "Юстон". ISBN 978-617-7361-99-1.
- Ліщенко, Л. П., Кудряшов, О. І. (2021). Дослідження просторово-часових змін поверхневих температур міста Запоріжжя (Україна) за даними дистанційного зондування Землі. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 8(3), 27–36. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.3.198>.
- Лубський, М. С. (2017). *Методика підвищення інформативності інфрачервоного аерокосмічного знімання на основі субпіксельної обробки сигналів*. (Автореф. дис. канд. техн. наук). Київ.
- Матвївка (Миколаїв) Матвївський ліс (2020). Взято з [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B2%D1%96%D1%97%D0%B2%D0%BA%D0%B0\\_\(%D0%9C%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B0%D1%97%D0%B2\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B2%D1%96%D1%97%D0%B2%D0%BA%D0%B0_(%D0%9C%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B0%D1%97%D0%B2)).

- Пестова, І. О. (2015). *Методика оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків*. (Автореф. дис. канд. техн. наук). Київ.
- Попов, М. А., Станкевич, С. А., Козлова, А. А. (2012). Дистанционная оценка риска деградации земель с использованием космических снимков и геопространственного моделирования. *Доповіді НАН України*, 6, 100–104. <http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu.2012.6.18>.
- Станкевич, С. А., Филиппович, В. Е., Лубський, Н. С., Крылова А. Б., Кришук С. Г., Бровкина О. В., Горный, В. И., Тронин, А. А. (2015) Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 7, 14–25. <https://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/7>.
- Савченко, Сергій (2018). Матвївський ліс. Взято з <https://svidok.info/ru/news/926>.
- Dale, Quattrochi, Jeffrey, Luvall, (1994). Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and applications. *Elsevier*, December 1999, 14(6), 577–590. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008168910634>.
- Perez, Hoyos Isabel C. (2014). Comparison between Land Surface Temperature Retrieval Using Classification Based Emissivity and NDVI Based Emissivity. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, 2(2), 26–30. [www.ijrdet.com](http://www.ijrdet.com) (ISSN 2347-6435(Online)).
- Qihao, Weng, Dengsheng, Lu, Jacquelyn, Schubring (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies / *Remote Sensing of Environment*, 89, 467–483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>.
- Van De Griend, A. A., Owe, M. (2007). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 1119–1131. DOI: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169308904400>.
- Xiaoma, Li, Weiqi, Zhou, Zhiyun, Ouyang (2013). Relationship between land surface temperature and spatial pattern of greenspace: What are the effects of spatial resolution? *Landscape and Urban Planning*, 114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.02.005>.

### References

- AgroYug. There was a fire in the Matvyevsky forest near Nikolaev. Retrieved from <http://agro-yug.com.ua/archives/10508> (In Russian).
- Quattrochi, D. A., Luvall, J. C. (1999). Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and applications. *Landscape Ecology*, 14, 577–598. <https://doi.org/10.1023/A:1008168910634>.
- Ivashko, Olena (31.08.2017). Will the green oases of the steppe survive? *Government Courier*. Retrieved from <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/chi-vistoyat-zeleni-oazi-stepu> (In Ukrainian).
- Lisichenko, L. P. (2019). The influence of vegetation on the seasonal variability of the land surface temperature in the city of Kyiv in the different landscape-functional zones using satellite data. *Modern information technologies for managing environmental safety, nature management, measures in emergency situations, current issues* (p. 126–130). Kyiv: Yuston Publishing House. ISBN 978-617-7361-99-1 (In Ukrainian).

- Lisichenko, L., Pazynych, N., Filipovych, V. (2019). Summer surface temperature distribution analysis of Mykolayiv city based on the Landsat series thermal infrared data. *Ukrainian Journal of Remote Sensing of the Earth*, 21, 49–59. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2019.21.148> (In Ukrainian).
- Lisichenko, L., Kudryashov, A. (2021). The results of the study of spatio-temporal changes in surface temperatures of Zaporizhya based on satellite data. *Ukrainian journal of remote sensing*, 8(3), 27–36. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.3.198> (In Ukrainian).
- Lubskiy, M. S. (2017). *Method of infrared aerospace imagery informativity enhancement based on subpixel signal processing*. (Thesis for the degree of candidate of technical sciences). Kyiv, Ukraine (In Ukrainian).
- Matviyivka (Mikolayiv), Matviyivsky forest (2020). Retrieved from [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B2%D1%96%D1%97%D0%B2%D0%BA%D0%B0\\_\(%D0%9C%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B0%D1%97%D0%B2/](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B2%D1%96%D1%97%D0%B2%D0%BA%D0%B0_(%D0%9C%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B0%D1%97%D0%B2/) (In Ukrainian).
- Perez, Hoyos Isabel C. (2014). Comparison between Land Surface Temperature Retrieval Using Classification Based Emissivity and NDVI Based Emissivity. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, 2(2), 26–30. [www.ijrdet.com](http://www.ijrdet.com) (ISSN 2347-6435 (Online)).
- Piestova, I. O. (2015). *Technique for vegetation condition estimation in urban area using multispectral satellite imagery*. (The thesis for the degree of candidate of technical sciences). Kyiv, Ukraine (In Ukrainian).
- Popov, M. A., Stankievich, S. A., Kozlova, A. A. (2012). Remote risk assessment of land degradation using satellite images and geospatial modeling. *Reports of the NAS of Ukraine*, 6, 100–104. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu\\_2012\\_6\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2012_6_18) (In Russian).
- Savchenko, Sergiy (2018). Matviyivsky forest. Retrieved from <https://svidok.info/ru/news/926> (In Ukrainian).
- Stankevich, S. A., Filipovich, V. E., Lubsky, N. S., Krylova, A. B., Kritsuk, S. G., Brovkina, O. V., Gornyy, V. I., Tronin, A. A. (2015). Intercalibration of methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving inside urban area by thermal infrared satellite imaging. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 7, 14–25. <https://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/7>. (In Russian).
- Qihao, Weng, Dengsheng, Lu, Jacquelyn, Schubring (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89, 467–483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>.
- Van De Griend, A. A., Owe, M. (2007). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 1119–1131. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169308904400>.
- Xiaoma, Li, Weiqi, Zhou, Zhiyun, Ouyang (2013). Relationship between land surface temperature and spatial pattern of greenspace: What are the effects of spatial resolution? *Landscape and Urban Planning*, 114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.02.005>.

#### SATELLITE MONITORING OF THE STATE OF THE LOCAL LEVEL GEOSYSTEM ON THE EXAMPLE OF MATVIYIVSKY FOREST NEAR MYKOLAYIV (UKRAINE)

L. P. Lisichenko

*State Institution Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, O. Gonchar str. 55-B, Kyiv 01054, Ukraine*

The research aims are to demonstrate the application of long-term satellite data series for the study and analysis of a separate self-organized local-level geosystem for identifying trends of changes for regional-level ecosystems. There is area that under the influence of natural and anthropogenic factors has undergone rapid changes. As an example, it is a small southern steppe area of artificially planted "Matviyivsky Forest" near Mykolayiv, Ukraine, located on the left bank of the Southern Bug. The analysis uses a long-term series of multi-zone data from the Landsat mission (the period is 32 years) and Sentinel-2 in recent years, which establish the relationships between the state of the geosystem, surface temperature (LST), and vegetation. It was found that the values of the vegetation index NDVI and LST are in antiphase. The correlations between them are only 0.56, because at the local level there are other factors, such as soil moisture, landform, weather conditions at the time of the survey. Using Sentinel-2, the next changes of land cover have been traced and mapped – the result of disturbance of the sand sediment, the square of fire forest, reduction of plantations, planting of new trees. This geosystem is unstable and it is highly variable, it has undergone constant transformations in time and spatial, but it suitable retains its natural self-regulation recreational and restorative functions. Multidimensional information is the best displayed and analysed using transect profiles, which variously characterize the geography system "Matviyivsky Forest", namely the geological environment, vegetation, thermal characteristics of the surface, temporal and spatial variability of the land cover, and other biophysical parameters obtained from satellite data. The methodical approach with the use of local geosystem profiling with the integration of different characteristics space data can be successfully applied in the environmental management of a particular site in any natural conditions and show its vulnerability to anthropogenic pressures.

**Keywords:** monitoring, long-term satellite data series, Sentinel-2, Landsat, geosystem, land surface temperature, vegetation index.

*Рукопис статті отримано 31.01.2023  
Надходження остаточної версії: 05.06.2023  
Публікація статті: 29.06.2023*