



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.4.249>

УДК 528.855:58.04

Спектральна модель динамічних компонентів ландшафтів на основі багатоспектральних космічних знімків Землі

В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов, О. В. Томченко*, Л. П. Ліщенко

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

Моделлю ландшафту, як реального географічного комплексу, який охоплює всі природні та антропогенні утворення поблизу земної поверхні, є геосистема. Процес побудови адекватної математичної моделі є важливим етапом вивчення геосистем. Найбільш простим загальним визначенням моделі є її тлумачення як об'єкта заміни, що у чомусь є подібним до оригіналу. Під оригіналом будемо розуміти як природничу геосистему, так і певний досліджуваний процес. Міра адекватності моделі об'єкта досліджень ніколи не може бути повною і визначається залежно від мети та способів моделювання. Динаміка геосистеми – це зміна в часі значень її окремих характеристик, станів, набору та інтенсивності процесів, територіальних структур, яка, на відміну від еволюції, не призводить до безпосереднього формування принципово нової геосистеми. В цій роботі представлена спектральна модель динамічних компонентів ландшафтів території на прикладі Солотвинського солерудного промислу Закарпатської області України, за двома багатоспектральними космічними знінками Sentinel 2, зробленими через певний час. За допомогою цієї моделі можна простежити зміни в таких характеристиках ландшафту, які найбільш яскраво проявились на означеній території – обводнення, провали, карст, порушення геологічного середовища, стану рослинності та зміни кількості антропогенних об'єктів та забудов. Спектральна модель – це множина пар оптимальних спектральних каналів з найбільшими відносними змінами спектрального індексу між еталонами на двох знімках послідовних в часі динамічних компонентів ландшафтів. Динамічні компоненти ландшафтів, відповідних еталону, виявляються на двох багатоспектральних космічних зображеннях, для цього необхідно сканувати досліджувану місцевість вікном, відповідним розміру еталона з урахуванням частоти Найквіста. Для виявлення динамічних компонентів ландшафтів у вікні використовуємо міру подібності, як множину найбільших відносних змін у часі спектрального індексу для сканувального вікна і еталона на двох багатоспектральних знімках. Були отримані значення спектральних моделей для трьох еталонів і значення міри подібності спектральних моделей по всьому знімку з еталонами, які показали їх розпізнавальні можливості, але для конкретизації цих змін необхідні матеріали завіркових наземних спостережень.

Ключові слова: адаптивні методи, різночасові космічні знімки, спектральна модель, динамічні компоненти ландшафтів, техногенний карст.

© В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов, О. В. Томченко, Л. П. Ліщенко. 2023

Вступ

Знімання Землі з космосу широко використовується для дослідження змін світу як у глобальному, так і в локальному масштабі. Прикладом вивчення та екологічного моніторингу динамічних компонентів ландшафтів нашої планети в різних сферах та надзвичайних ситуаціях можуть бути техногенно спровоковані та природні зміни ландшафту, зони пригнічення й деградації рослинності, ділянки техногенних порушень ґрунтово-рослинного покриву (Федоровський А. Д., 2005), а саме:

на місцях видобутку й переробки корисних копалин (Шапар А. Г., 2018; Мичак А. Г. та ін., 2010);

на водоймах: наявність завислих речовин, руйнування берегів, зони заболочування, підтоплення, виходи ґрунтових вод (Томченко О. В., 2017);

на ділянках деградації рослинності: наслідки пожеж, лісові насадження, що загинули, ділянки дерев,

повалених вітром, ділянки всихання рослинності, впливу комах та ін. (Артюшенко М. В., 2020).

Геоекосистема є геопросторовою екологічною моделлю ландшафту як реального тотального географічного комплексу, який охоплює всі природні та антропогенні утворення поблизу земної поверхні (Круглов І. С., 2006).

Динаміка геосистеми – це зміна в часі значень її окремих характеристик, станів, набору та інтенсивності процесів, територіальних структур, яка, на відміну від еволюції, не призводить до безпосереднього формування принципово нової геосистеми. Характерною особливістю геосистеми є те, що різні її характеристики змінюються з різною швидкістю.

Геологічне середовище досліджуваного району зазнавало достатнього перетворювального впливу людини в результаті господарської діяльності, а саме видобування харчової солі шахтним способом, що надалі викликало швидкі зміни інших компонентів ландшафту та всього ландшафтного образу досліджуваної геосистеми. Збільшення антропогенного

*E-mail: olhatomch@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6975-9099>

навантаження на геологічне середовище та такі кліматичні явища, як повені, спровокували та підсилювали інші природні явища – карстоутворення, просідання, обвали ґрунту та приповерхневих горизонтів над копальнями, підтоплення території та затоплення підземних виробок, що спровокувало екологічну катастрофу селища Солотвино (Яковлев Є. О., 2013).

Небезпечні геологічні процеси, що виникли в результаті експлуатації Солотвинського родовища кам'яної солі, спонукали до детального вивчення цієї території багатьма дослідниками і науковими установами. Ці питання досліджували фахівці Інституту геологічних наук НАН України (Хрущов Д. П., Шехунова С. Б., Алексеєнкова М. В., Стадніченко С. М., Сюмар Н. П.), Ради національної безпеки та оборони України (Яковлев Є. О.), Український науково-дослідний інститут соляної промисловості – УкрНДІсіль (Босевська Л. П.), фахівці Львівського держуніверситету (Дяків В. О.), ДП Солотвинського солерудника, Івано-франківського технічного університету нафти та газу та спеціалісти МНС України (Балого В. та ін.). Були виконані роботи з дослідження екологічних, соціальних та виробничих проблем смт Солотвино.

Територія дослідження

Селище Солотвино Закарпатської області (колишня назва румунською – Акнаслатина, Слатинські Доли), розташоване в межах Закарпатського внутрішнього прогину (Мармароський котловині) на правому березі ріки Тиса в Солотвинській западині, безпосередньо на однойменній солянокупольній структурі. Видобування харчової солі на цій території фіксується з I-II ст. н.е.

Площа розповсюдження соленосних відкладів у Солотвинській западині становить 1500 кв. км, геологічні запаси солі перевищують 700 млрд. тонн. Систематичне видобування солі у Солотвино почалося з другої половини 18 сторіччя. Максимум видобутку солі припав на 1970 р. (450 тис. т). Солотвинський солерудник відомий ще тим, що його гірські копальні з семидесятих років минулого сторіччя використовувалися для лікування хворих на бронхіальну астму, де на 300-метровій глибині (шахти № 8, 9) були облаштовані алергологічні лікарні і щорічно лікувалося десятки тисяч осіб (Яковлев Є. О., 2013).

Виникнення соляних озер почалося з моменту запуску соляної шахти в 1902 р., коли шахта провалилась на 20 м і утворилась котловина, що заповнилась солоною водою, – так утворилось озеро Кунігунда. Згодом, внаслідок збільшення обводнення утворились інші озера з високим ступенем мінералізації води (ропа до 200 мг на літр) та наявністю лікувальної сульфідної грязі. Тому зараз це відомий бальнеологічний курорт України.

Різке збільшення притоку підземних вод та розвиток техногенного карсту сприяло суттєвому погіршенню геоecологічного стану та збільшенню загроз існування промислових і житлових об'єктів смт Солотвино (Босевська Л. П., 2011).

За матеріалами Державної служби надзвичайних ситуацій України у 1998–2007 роках експлуатація гірських копалень на ДП “Солотвинський солерудник” відбувалась в аварійному режимі. В результаті періодичних повеней та розущільнення порід по зонах глибинних розломів були затоплені шахти, при цьому на території підприємств почали виникати карстові процеси, неконтрольовані провали поверхні і обводнення. З 2007 року фактично припинені видобувні роботи, а також зупинене надання послуг алергологічних лікарень, що були розташовані в шахтах № 8 та 9. В кінці 2010 – на початку 2011 р. сталися катастрофічні обвали поверхні, на місці яких утворились нові озера. В зоні можливих просадок деформацій земної поверхні опинилося 292 будинки, де проживало до 1255 мешканців селища, 2 школи, дитячі садочки, лікарня, водоканал, лінії електро- та газозабезпечення та ділянки доріг. Цю територію вважають зоною техногенної катастрофи (Tomchenko O., 2021).

Природні ландшафти в межах цього району зазнавали значних антропогенних змін протягом багатьох століть, а в результаті експлуатації соляного родовища заплава та надзаплавна тераса ділянки ріки Тиса та корінні схили в подальшому зазнають зміни ландшафтного образу через зміни окремих їх компонентів. Найбільш вразливими до змін для цієї території виявилось втручання в геологічне середовище, а саме вилучення соленосних порід, розущільнення та порушення глибинних верст та активізація проникних зон. Своєю чергою, це викликало гідрогеологічні зміни – підняття рівня підземних вод та обводнення шахт. А кліматичні гідрологічні катастрофічні явища, такі як повені, активізували небезпечні екзогенні процеси – карстоутворення, просідання, обвали ґрунту і приповерхневих верств над копальнями, підтоплення заплавної та надзаплавної територій. З погляду геоморфології, Солотвинське родовище лежить у межах широкої долини р. Тиси, у правобережній її частині, на ділянках поширення другої (шахти № 7, 8 та 9) і частково першої надзаплавної терас (Дяків В. О., 2012).

Цим змінам підпорядковуються і зміни ґрунтово-рослинного покриву, а головне, подальша спрямованість людської і технічної діяльності у вигляді розміщення будинків, доріг, інфраструктури. Змінилась господарська діяльність селища – від гірничовидобувної до бальнеологічної та рекреаційної.

Для виявлення динамічних компонентів ландшафтів на території Солотвинського солерудника використані знімки Sentinel 2 за 08.08.2015 та 21.08.2021 р. (Рис. 1).

За Шехуновою С. Б. зони проявів небезпечних процесів на території, розташування наших еталонів відноситься до катастрофічних, з найбільш вірогідним розвитком карстово-суфозійних провалів, просідань, зсувоутворення, ерозії. Карстові процеси розвиваються в межах Солотвинської соляної діапирової дисгармонійної складки з відкритим ядром протикання, територіально розташованої в південній і центральній частині містечка, там нами обрані еталонні ділянки.

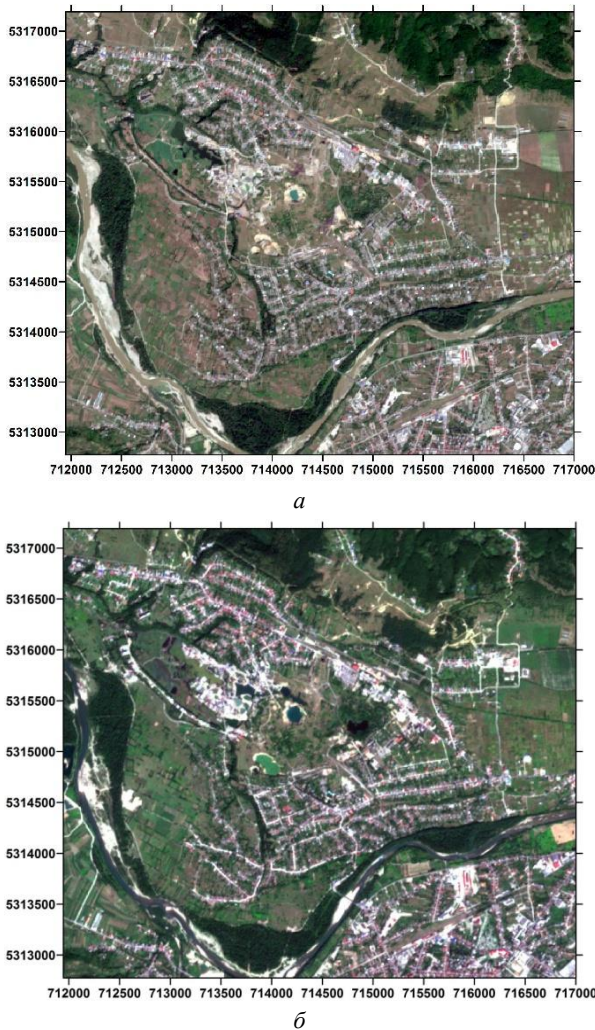


Рис. 1. Синтезовані знімки Sentinel 2 в комбінації каналів В4, В3, В2 території Солотвино за наступні дати: 8 серпня 2015 р. (а) та 21 серпня 2021 р. (б)

Поверхневі карстопрояви представлені суфозійно-карстовими й провальними воронками, колодзями, карстовими деформаціями просідання, нерівномірно розміщеними по тілу соляного штока в межах Солотвинської соляної діапірової дисгармонійної складки з відкритим ядром протикання. Загалом до шахтних полів рудників № 7, 8 та 9 приурочено 40 суфозійно-карстових та провальних воронок, щільність ураженості ділянки 0,1 шт./тис. кв. м, площинний коефіцієнт закарстованості 20 %. На сьогодні основна кількість суфозійно-карстових воронок зосереджена на ділянці між шахтою № 7 та Чорним Мочаром – понад 90 із середнім діаметром 5,5 м, глибиною 1,5–3 м, щільність ураженості ділянки – 0,5 шт./тис. кв. м, площинний коефіцієнт закарстованості – 8,5 % (Шехунова С. Б., 2019).

Саме на цій території вибрані 3 еталони (розміщені безпосередньо над провальними), які на Рис. 2 позначені червоними цифрами.

1. Ділянка 1 приурочена до провалля над шахтою № 7.

Масштабне провалля приурочене до шахти № 7, де спочатку в 1953 р. відбулося обрушення одного з ціликів на стеліну третього горизонту. З 1965 р. після затоплення шахти відбувається постійне

зростання розмірів провалля внаслідок зсувних процесів по стінках провалу, злиття та поглинання сателітних суфозійно-карстових воронок ослабленої зони.)

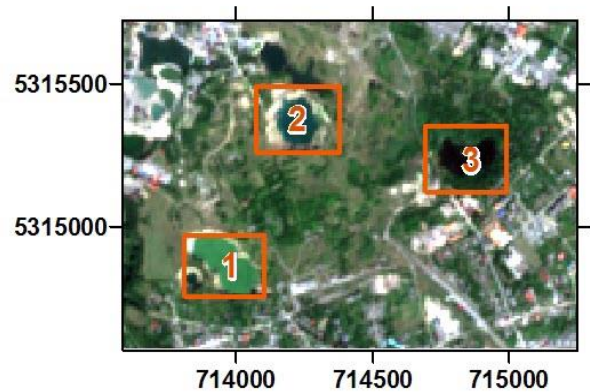


Рис. 2. Розташування еталонів на космічному знімку Sentinel 2 у комбінації каналів В4, В3, В2 території смт Солотвино за 21 серпня 2021 р.

Швидкість зростання провалля в горизонтальному напрямку становить до 8–10 м/рік за період 2003–2018 рр. На сьогодні провал над виробками шахти № 7 має загальну площу 40,2 тис. кв. м з шириною ослабленої зони 30–50 м, площу водної поверхні 20 тис. кв. м (Шехунова С. Б., 2015).

2. Ділянка 2 розташована над західним флангом шахти № 8 у районі сучасного провалу № 25.

Ще з 40-х років минулого століття фіксувалося утворення та поновлення карстових воронок, незважаючи на постійну їх відсіпку гравійно-галечниковим матеріалом. Вже на кінець 90-х років минулого століття тут нараховувалося 14 карстових воронок, карстовими процесами було зруйновано стеліни камер 5, 6 та 7, й атмосферні води отримали безпосередній доступ до покладів солі. На сьогодні провал №25 має загальну площу 43,4 тис. кв. м з шириною ослабленої зони до 100 м та площу водної поверхні 26,5 тис. кв. м.

Осідання в межах промислових майданчиків шахт № 8, встановлені за результатами інтерферометричних досліджень, представлених у звіті експертної місії ЄС в Україні – EU EUCPT report Advisory mission to Ukraine “Solotvyno salt mine area” (Velasco V., 2016) підтверджені маркшейдерсько-геодезичними роботами УкрНДМІ (Педченко С. В., 2012). За результатами інструментальних досліджень встановлено, що в межах проммайданчика шахти № 8 виділено три локальні зони осідань із середньою швидкістю 10–20 мм/рік.

3. Ділянка 3 розташована в межах території “Чорного Мочара”.

У 2007 р. відбулося стрибкоподібне утворення порожнини розрідження і обвалення з підвищенням рівня ґрунтових вод в результаті висхідної фільтрації, обумовленої відтисненням води з порожнини, подальшим формуванням низки озер (2008–2009 рр.), розширенням ослабленої зони в південно-східному напрямку (2009–2011 рр.), формуванням багатоступінчастих концентричних вертикальних тріщин з видимою сучасною висотою

0,3–1,8 м. З 2011 р. зафіксоване зростання водної поверхні озер, з подальшим їх злиттям (сучасна площа озера 10,2 тис. кв. м) (Шехунова, 2019).

Завдання дослідження

Виявлення динамічних аномалій на космічних знімках розглядається в багатьох дослідженнях, зокрема в роботі (Chang C. I., 2002) описані два типи виявлення аномалій. Перший тип розроблений для виявлення об'єктів, ознаки яких відрізняються від оточення, а другий – для виявлення об'єктів з низькою ймовірністю в невідомій сцені зображення. В роботі (Lu D., 2004) методи виявлення часових змін на космічних знімках згруповані в сім категорій: алгебра, перетворення, класифікація, моделі, підходи географічної інформаційної системи, візуальний аналіз та інші підходи.

Метою роботи є представлення спектральної моделі (spectral model – SM) динамічних компонентів ландшафтів за двома багатоспектральними космічними знімками Землі тієї самої території, зробленими через певний час.

Адаптивний спектральний індекс

Різні адаптивні методи виявлення змін довкілля за допомогою багатоспектральних космічних знімків Землі, отриманих через відповідний інтервал часу, були описані в роботі (Якимчук В. Г., 2021). Згідно із зазначеним, у вказаній роботі адаптивним індексом виявлення відносних змін довкілля за двома каналами для знімків Sentinel 2 за серпень 2015 та 2021 р. було визначено канали $p^* = 8$, $q^* = 12$ (0.842 nm, 2.190 nm). Спектральні яскравості ілюструють наявність змін адаптивного індексу (Рис. 3), їх значення і напрямок та можуть бути використані для подальшої інтерпретації змін.

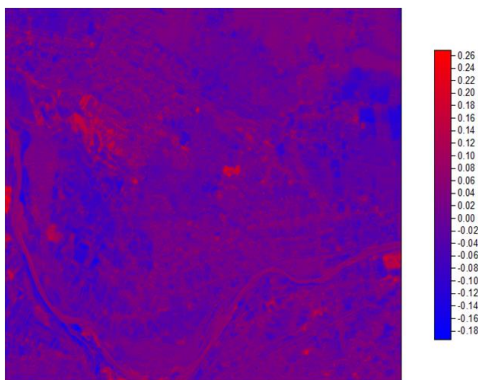


Рис. 3. Індекс виявлення відносних змін довкілля за двома каналами, визначений за двома знімками Sentinel 2 за 8 серпня 2015 та 21 серпня 2021 р.

Спектральна модель динамічних компонентів ландшафтів

Позначимо множини спектральної яскравості каналів двох різночасових багатоспектральних аерокосмічних знімків однієї місцевості, отриманими через відповідний інтервал часу, $L_{t,i}(x,y)$ та $L_{t+1,i}(x,y)$, де t , $t+1$ – номери двох послідовних

багатоспектральних аерокосмічних знімків, $i = 1, 2, \dots, I$ – номери каналів знімків, $x = 1, 2, \dots, X$, $y = 1, 2, \dots, Y$ – координати пікселів знімків.

Для періоду часу $(t, t+1)$ оптимальне рішення, яке максимізує відносні зміни за двома багатоспектральними космічними знімками Землі, з вибором номерів двох каналів знімка p і q ($p = 1, 2, \dots, P-1$; $q = 2, 3, \dots, P$, де P – кількість спектральних каналів, визначається зокрема так.

Для каналів t -го багатоспектрального знімка спектральний індекс (Spectral Index, скорочено SI) визначається відповідно до виразу:

$$SI_{t,(p,q)}(x,y) = \frac{L_{t,p}(x,y) - L_{t,q}(x,y)}{L_{t,p}(x,y) + L_{t,q}(x,y)}, \quad (1)$$

де $L_{t,p}(x,y)$, $L_{t,q}(x,y)$ – значення спектральної яскравості пікселів p -го і q -го каналів t -го багатоспектрального знімка, $p = 1, 2, \dots, P-1$; $q = 2, 3, \dots, P$, $x = 1, 2, \dots, X$, $y = 1, 2, \dots, Y$ – піксели знімка.

Для каналів $(t+1)$ -го багатоспектрального знімка SI визначається відповідно до виразу:

$$SI_{t+1,(p,q)}(x,y) = \frac{L_{t+1,p}(x,y) - L_{t+1,q}(x,y)}{L_{t+1,p}(x,y) + L_{t+1,q}(x,y)}, \quad (2)$$

де $L_{t+1,p}(x,y)$, $L_{t+1,q}(x,y)$ – значення спектральної яскравості пікселів p -го і q -го каналів $(t+1)$ -го багатоспектрального знімка, $p = 1, 2, \dots, P-1$; $q = 2, 3, \dots, P$, $x = 1, 2, \dots, X$, $y = 1, 2, \dots, Y$ – піксели знімка.

Далі визначаються модулі різниць $|SI_{t+1}(p,q) - SI_t(p,q)|$ відповідних пікселів та їх сума по всьому знімку за формулою:

$$\begin{aligned} |M_{p,q}(x,y)|_{\Delta t} &= \sum_{x,y} |SI_{t+1,(p,q)}(x,y) - SI_{t,(p,q)}(x,y)| = \\ &= \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \left| \frac{L_{t+1,p}(x,y) - L_{t+1,q}(x,y)}{L_{t+1,p}(x,y) + L_{t+1,q}(x,y)} - \frac{L_{t,p}(x,y) - L_{t,q}(x,y)}{L_{t,p}(x,y) + L_{t,q}(x,y)} \right| \end{aligned} \quad (3)$$

Для множини N впорядкованих пар значень p і q складаємо декартовий добуток N^2 і обчислюємо значення $|\Delta I2B_{p,q}(x,y)|$. З отриманих значень $|\Delta I2B_{p,q}(x,y)|$ вибираємо найбільші, за якими визначаються пари каналів p^* і q^* , які дають найбільші відносні зміни для двох різночасових знімків.

Для інтегрального виявлення динамічних компонентів місцевості на першому етапі виконуємо обчислення за формулами (1)–(3) для двох багатоспектральних зображень однієї території, отриманих через відповідний інтервал часу. Різниця $\Delta I2B_{p^*,q^*}(x,y)$ досліджуваної території за двома каналами багатоспектральних космічних знімків Землі визначається за формулою:

$$\Delta I2B_{p^*,q^*}(x,y) = I2B_{t,(p^*,q^*)}(x,y) - I2B_{t-1,(p^*,q^*)}(x,y). \quad (4)$$

Для візуалізації $\Delta I2B_{p^*,q^*}(x,y)$ досліджуваної території виконано нормування з використанням середньоквадратичного відхилення та приведення до розрядності C зображення за формулою:

$$\Delta I2B_{p^*,q^*}(x,y)_n = \max \left(-1, \min \left(1, \frac{\Delta I2B_{p^*,q^*}(x,y)}{K_n} \right) \right) \cdot (2^C - 1), \quad (5)$$

де $\Delta I2B_{p^*,q^*}(x,y)_n$ – нормовані значення, $K_n = \max(|\Delta I2B_{p^*,q^*}(x,y) + 3\sigma|, |\Delta I2B_{p^*,q^*}(x,y) - 3\sigma|)$, $\Delta I2B_{p^*,q^*}(x,y)$ – середнє значення, σ – середньо-квадратичне відхилення. Далі перетворюємо значення (5) в спектральні яскравості шляхом округлення до найближчого цілого.

Далі розглядається метод виявлення динамічних компонентів ландшафтів, в якому аналізуються кілька пар каналів, які мають найбільші значення модулів різниць $|\Delta I2B_{p,q}(x,y)|$.

Міра подібності спектральних моделей для виявлення динамічних компонентів ландшафтів

На етапі навчання виконуємо обчислення за формулами (1)–(3) для еталона (standard) на багатоспектральних зображеннях тієї самої місцевості. Для множини N впорядкованих пар значень p і q відліків здійснюємо повний їх перебір і обчислюємо для еталона $|M_{p,q}^s(x,y)|_{\Delta}$. Отримані значення $|M_{p,q}^s(x,y)|_{\Delta}$ сортуємо по спаданню і вибираємо R найбільших значень:

$$|M_{p_1,q_1}^s(x,y)|_{\Delta} \geq |M_{p_2,q_2}^s(x,y)|_{\Delta} \geq \dots \geq |M_{p_R,q_R}^s(x,y)|_{\Delta} \quad (6)$$

з парами каналів $p_{s,1}, q_{s,1}; p_{s,2}, q_{s,2}; \dots; p_{s,R}, q_{s,R}$.

Множина пар оптимальних спектральних каналів (6) з найбільшими відносними змінами спектрального індексу між еталонами на двох послідовних в часі знімках ($t, t+1$) будуть слугувати спектральною моделлю (spectral model – SM) еталона

$$SM = \{p_{s,1}, q_{s,1}; p_{s,2}, q_{s,2}; \dots; p_{s,R}, q_{s,R}\}.$$

Об'єкт відповідного еталона, виявляється (detection) на тих самих двох багатоспектральних зображеннях, що були використані під час навчання. Для цього необхідно сканувати досліджувану місцевість вікном, відповідним розміру об'єкта з урахуванням частоти Найквіста. Для кожного вікна виконуємо обчислення за формулами (1)–(3).

Метод визначення подібності спектральних моделей (similarity spectral model – SSM) знімків і еталона полягає в тому, що для кожного пікселя для множини N впорядкованих пар значень p і q відліків здійснюємо повний їх перебір і обчислюємо N^2 значень $|M_{p,q}^d(x,y)|_{\Delta}$.

Отримані значення $|M_{p,q}^d(x,y)|_{\Delta}$ сортуємо за спаданням і вибираємо R найбільших значень:

$$|M_{p_1,q_1}^d(x,y)|_{\Delta} \geq |M_{p_2,q_2}^d(x,y)|_{\Delta} \geq \dots \geq |M_{p_R,q_R}^d(x,y)|_{\Delta} \quad (7)$$

з парами каналів $p_{d,1}, q_{d,1}; p_{d,2}, q_{d,2}; \dots; p_{d,R}, q_{d,R}$.

Значення (7) дають найбільші відносні зміни в часі спектрального індексу SI для ковзного вікна двох багатоспектральних знімків. Ознакою виявлення динамічних компонентів ландшафтів

у вікні є збіг значень пар каналів ковзного вікна $p_{d,1}, q_{d,1}; p_{d,2}, q_{d,2}; \dots; p_{d,R}, q_{d,R}$ зі спектральною моделлю еталона $SM = \{p_{s,1}, q_{s,1}; p_{s,2}, q_{s,2}; \dots; p_{s,R}, q_{s,R}\}$. При цьому для різних варіантів збігу пар каналів присвоюються значення міри подібності спектральних моделей SSA у вигляді формули:

$$SSM(x,y) = 2R + 2 - (s + d), \quad (8)$$

де $s = 1, 2, \dots, R; d = 1, 2, \dots, R$.

У випадку чотирьох найбільших значень модулів різниць отримуємо формулу:

$$SSM(x,y) = 10 - (s + d), \text{ де } s = 1, 2, 3, 4; d = 1, 2, 3, 4. \quad (9)$$

Для візуалізації $SSM(x,y)$ досліджуваної території виконано нормування з використанням середньоквадратичного відхилення та приведення до розрядності C зображення за формулою:

$$SSM(x,y)_n = \max \left(-1, \min \left(1, \frac{SSM(x,y)}{K_n} \right) \right) \cdot (2^C - 1), \quad (10)$$

де $SSM(x,y)_n$ – нормовані значення,

$$K_n = \max(|\overline{SSM}(x,y) + 3\sigma|, |\overline{SSM}(x,y) - 3\sigma|), \quad \overline{SSM}(x,y)$$

– середнє значення, σ – середньоквадратичне відхилення. Далі перетворюємо значення (10) у спектральні яскравості шляхом округлення до найближчого цілого.

Обчислення були виконані за допомогою скриптів Python, вхідними та вихідними даними для скриптів Python є зображення у форматі TIFF. Роботу з цим форматом забезпечує сторонній модуль Pillow для мови Python.

Розглянемо результати застосування методу за мірою подібності спектральних моделей (9).

Результат застосування міри подібності спектральних моделей для виявлення динамічних компонентів ландшафтів також було апробовано на групі еталонів, розміщених в місцях розвитку різних геологічних процесів, не тільки проваллях, для дослідження різних ландшафтів, наведених на Рис. 4.



Рис. 4. Синтезовані знімки Sentinel 2 у комбінації каналів В4, В3, В2 території смт Солотвино з позначеними червоними цифрами еталонами за 21 серпня 2021 р. Еталони – 1, 2, 3, 4

На знімках були вибрані 4 еталони, позначені червоними цифрами на Рис. 4. За формулою (9) були визначені канали знімків Sentinel 2, які мають чотири найбільших значення модулів різниць (Табл. 1), також наведено центральну довжину хвилі цих каналів.

Таблиця 1. Канали та центральна довжина хвилі знімків Sentinel 2, які мають чотири найбільших значення модулів різниць для 4-х еталонів

Еталони	Band / Central Wavelength	Band / Central Wavelength	Band / Central Wavelength	Band / Central Wavelength
1	B12; B8A 2190 nm, 865 nm	B12; B7 2190 nm, 783 nm	B12; B8 2190 nm, 842 nm	B4; B8A 665 nm, 865 nm
2	B12; B8 2190 nm, 842 nm	B11; B8 1610 nm, 842 nm	B12; B7 2190 nm, 783 nm	B11; B7 1610 nm, 783 nm
3	10;8A 1375 nm, 865 nm	1;8A 443 nm, 865 nm	4;8A 665 nm, 865 nm	2;8A 490 nm, 865 nm
4	11;7 1610 nm, 783 nm	12;7 2190 nm, 783 nm	11;8 1610 nm, 842 nm	12;8 2190 nm, 842 nm

Значення міри подібності спектральних моделей по всьому знімку з еталонами 1–4, позначеними на Рис. 4, наведені на Рис. 5–8. Найкраща подібність позначається білим кольором, і чим менша подібність, тим темніше зображення. Також на Рис. 5–8 наведені спектральні моделі еталонів на осі довжин хвилі каналів знімків Sentinel 2.

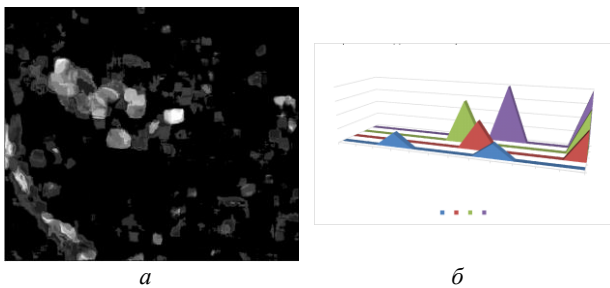


Рис. 5. Значення міри подібності спектральних моделей по всьому знімку з еталоном 1 (а), спектральна модель еталона 1 (б)

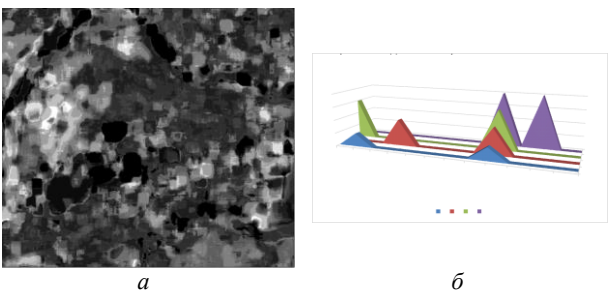


Рис. 6. Значення міри подібності спектральних моделей по всьому знімку з еталоном 2 (а), спектральна модель еталона 2 (б)

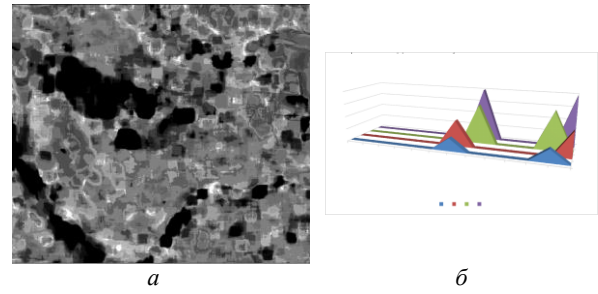


Рис. 7. Значення міри подібності спектральних моделей по всьому знімку з еталоном 3 (а), спектральна модель еталона 3 (б)

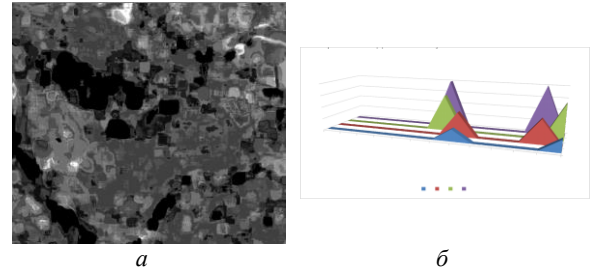


Рис. 8. Значення міри подібності спектральних моделей по всьому знімку з еталоном 4 (а), спектральна модель еталона 4 (б)

Висновки

Математичне моделювання ландшафтів – це метод формалізації географічних уявлень на основі створення логіко-математичних конструкцій, що відображають кількісне відношення реальних компонентів. Процес побудови адекватної математичної моделі є важливим етапом вивчення геосистем. Динаміка геосистеми – це зміна в часі значень її окремих характеристик, станів, набору та інтенсивності процесів, територіальних структур, яка не призводить до безпосереднього формування принципово нової геосистеми. В цій роботі представлена спектральна модель динамічних компонентів ландшафтів території на прикладі Солотвинського солерудного промислу Закарпатської області України. За допомогою моделі вдалося простежити зміни в таких характеристиках ландшафту, які найбільш яскраво проявились на цій території. Були отримані значення спектральних моделей для чотирьох еталонів, описано еталони і значення міри подібності спектральних моделей по всьому знімку з еталоном, які показали їх розпізнавальні можливості, але для конкретизації цих змін необхідні матеріали завіркових наземних спостережень.

Література

- Артюшенко, М. В., Томченко, О. В. (2020). Перколяційна модель для контролю над поширенням заражень лісу за зображеннями з космічних апаратів. *Космічна наука і технологія*, Т. 26, 4(125), 45–56. doi: 10.15407/knit2020.04.045.
- Босевська, Л. П., Хрушов, Д. П. (2011). Надзвичайна екологічна ситуація в Солотвино: геологічні причини і стратегія розв'язання проблеми. *Вісник Дніпропетровського*

- університету: *Геологія. Географія*, 19 (13), 80–90. Взято з http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdugg_2011_19_13_19.
- Дяків, В. О. (2012). Закономірності розвитку техногенно активізованого соляного карсту в процесі затоплення шахт № 8 та № 9 Солотвинського солерудника. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій*, 9, 69–79.
- Круглов, І. С. (2006). Ландшафт як геосистема. *Вісник Львів. ун-ту: Географія*, 33, 186–193.
- Мичак, А. Г., Філіпович, В. Є., Приходько, В. Л. та ін. (2010). *Аерокосмічні дослідження геологічного середовища*. Київ: Міністерство охорони навколишнього природного середовища України. Державна геологічна служба.
- Педченко, С. В. (2012). Вплив затоплення гірничих виробок шахти № 8 Солотвинського солерудника на денну поверхню регіону *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*, 1 (9), 113–123.
- Шехунова, С. Б., Алексєєнкова, М. В., Стадніченко, С. М., Сюмар, Н. П. (2015). Інтегральна геологічна модель Солотвинської структури як інструмент оцінки геоекологічного стану Солотвинського родовища кам'яної солі. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*, 8, 233–250. doi:10.30836/igs.2522-9753.2015.146791.
- Шехунова, С. Б., Алексєєнкова, М. В., Стадніченко, С. М. (2019). Закономірності розвитку природних та природно-техногенних небезпечних геологічних процесів на території містечка Солотвино (Закарпаття, Україна). *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*, 12, 70–83. Взято з http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpign_2019_12_10.
- Томченко, О. В., Федоровський, О. Д. (2017). Оцінка стану водойм на основі інтеграції космічної і наземної інформації (на прикладі верхів'я Київського водосховища). *Доповіді Національної академії наук України*, 8, 64–70. doi:10.15407/dopovidi2017.08.064.
- Федоровський, А. Д., Ліщенко, Л. П. (2005). Ландшафтно-системний підхід к оцeнке и прогнозированию экосостояния природно-техногенных систем на основе космической информации ДЗЗ (на примере Никопольского горнопромышленного района). *Доклады Академии наук Украины*, 11, 126–131.
- Шапар, А. Г., Тараненко, О. С. (2018). Визначення техногенних та природних змін на порушених гірничими роботами землях за даними ДЗЗ. *Екологічна безпека*, 2 (26), 64–69. doi: 10.30929/2073; 5057.2018.2.64;69.
- Якимчук, В. Г., Суханов, К. Ю., Томченко, О. В. (2021). Адаптивні методи виявлення змін довкілля за допомогою багатоспектральних космічних знімків Землі на прикладі території Солотвино. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 8 (1), 10–17. doi:10.36023/ujrs.2021.8.1.187.
- Яковлев, С. О. (2013). Оцінка еколого-техногенної безпеки міст і селищ України. *Стратегічні пріоритети*, 4, 146–157.
- Chein-I Chang, Shao-Shan Chiang (2002). Anomaly detection and classification for hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (6), 1314–1325. doi:10.1109/TGRS.2002.800280.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., Moran, E. (2004). Change detection techniques. *Intern. Journ. of Remote Sensing*, 25 (12), 2365–2401.
- Tomchenko, O., Zhyrnov, P., Pidlisetska, I., Mykolaenko, O. (2019, November). Remote assessment of earth's surface deformation dynamics above Solotvyno salt mine. *13th International Scientific Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. Kiev. doi:10.3997/2214-4609.201903269.
- Velasco, V., Sanchez, C., Papoutsis, I., Antoniadis, S., Kontoes, C., Aifantopoulou, D., & Paralykidis, S. (2017, September). Ground deformation mapping and monitoring of salt mines using InSAR technology. *SMRI Fall 2017 Technical Conference*. Munster, Germany.

References

- Artiushenko, M. V., Tomchenko, O. V. (2020). Percolation model to control the distribution of forest infections on images from space vehicles. *Space Sci. & Technol.*, 25(4), 45-56. doi:10.15407/knit2020.04.045 (In Ukrainian).
- Bosevska, L., Khrushchov, D. P. (2011). Emergency environment situation in Solotvino: geological reasons and strategy of the problem decision. *Bulletin of Dnipropetrovsk University: Geology. Geography*, 19 (13), 80–90. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdugg_2011_19_13_19 (In Ukrainian).
- Chein-I Chang, Shao-Shan Chiang (2002). Anomaly detection and classification for hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (6), 1314–1325. doi:10.1109/TGRS.2002.800280.
- Dyacyv, V. O. (2012). Conformities to the Law of Development of Tekhnogenic Activated Salt Karst in the Process of Submergence of Mines № 8 and № 9 of the Solotvinsky Saltmine. *The nature of Western Polissia and adjacent territories*, 9, 69–79. (In Ukrainian).
- Fedorovsky, A. D., Lishchenko, L. P. (2005). The landscape-system approach to the estimation of a geoeological situation in a region. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 11, 37–40. (In Russian).
- Kruhlov, I. (2006). Landscape as a Geoecosystem. *Visnyk of the Lviv University: Geography*, 33, 186–193. (In Ukrainian).
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., Moran, E. (2004). Change detection techniques. *Intern. Journ. of Remote Sensing*, 25 (12), 2365–2401.
- Mychak, A. G., Filipovych, V. E., Prykhodko, V. L. and others. (2010). *Aerospace studies of the geological environment*: Kyiv: Ministry of Environmental Protection of Ukraine. State Geological Service. (In Ukrainian).
- Pedchenko, S. (2012). The impact of flooded mine workings of the mine no. 8 Solotvino salt mine on the ground surface of the region. *Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry*, 1 (9), 113–123. (In Ukrainian).
- Shapar, A., Taranenko, O. (2018). Determination of techogenic and natural changes in the mining lands by remote sensing data. *Ekologichna bespeka*, 2 (26), 64–69. doi:10.30929/2073-5057.2018.2.64-69. (In Ukrainian).
- Shekhunova, S. B., Aleksieienkova, M. V., Stadnichenko, S. M. (2019). Regularities of natural and antropogenig hazardous geological processes development for Solotvino (Transcarpathia, Ukraine). *Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine*, 12, 70–83 Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpign_2019_12_10. (In Ukrainian).
- Shekhunova, S. B., Aleksieienkova, M. V., Stadnichenko, S. M., Siumar, N. P. (2015). The Integrated Geological Model of Solotvyno Structure as a Tool to Assess Geoeological Sustainability of Solotvyno Rocksalt Deposit. *Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine*, 8, 233–250. doi:10.30836/igs.2522-9753.2015.146791 (In Ukrainian).
- Tomchenko, O., Zhyrnov, P., Pidlisetska, I., Mykolaenko, O. (2019, November). Remote assessment of earth's surface deformation dynamics above Solotvyno salt mine. *13th International Scientific Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. Kiev. doi:10.3997/2214-4609.201903269.

- Tomchenko, O. V., Fedorovsky, A. D. (2017). Assessment of the status of wetlands based on the integration of space and terrestrial information (by the example of the upper Kiev reservoir). *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 8, 64–70. doi:10.15407/dopovidi2017.08.064. (In Ukrainian).
- Velasco, V., Sanchez, C., Papoutsis, I., Antoniadis, S., Kontoes, C., Aifantopoulou, D., & Paralykidis, S. (2017, September). Ground deformation mapping and monitoring of salt mines using InSAR technology. *SMRI Fall 2017 Technical Conference*. Munster, Germany.
- Yakimchuk, V. G., Sukhanov, K. Yu., Tomchenko, O. V. (2021). Adaptive methods of detecting environmental changes using multispectral satellite images on the Earth for example territory Soltvyno. *Ukrainian journal of remote sensing*, 8 (1), 10–17. doi:10.36023/ujrs.2021.8.1.187. (In Ukrainian).
- Yakovlev, E. (2013). Assessment of the Environmental and Technogenic Security of Ukrainian Cities and Towns. *Strategic Priorities*, 4, 146–157. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/spa_2013_4_22. (In Ukrainian).

SPECTRAL MODEL OF DYNAMIC LANDSCAPE COMPONENTS BASED ON MULTISPECTRAL SPACE IMAGES OF THE EARTH

V. G. Yakimchuk, K. Yu. Sukhanov, O. V. Tomchenko, L. P. Lishchenko

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

A geosystem is a model of a landscape as a real geographical complex that encompasses all natural and anthropogenic formations near the earth's surface. The process of building an adequate mathematical model is an important stage in the study of geosystems. The simplest general definition of a model is its interpretation as a substitute object that is similar to the original in some way. Under the original, we will understand both a natural geosystem and a certain process under study. The degree of adequacy of the model to the object of research can never be complete and is determined depending on the purpose and methods of modeling. The dynamics of a geosystem is a change over time in the values of its individual characteristics, states, a set and intensity of processes, and territorial structures, which, unlike evolution, does not lead to the direct formation of a fundamentally new geosystem. This paper presents a spectral model of the dynamic components of the territory's landscapes on the example of Soltvyno salt mine in the Transcarpathian region of Ukraine, based on two multispectral Sentinel-2 satellite images taken over time. This model can be used to trace changes in the following landscape characteristics that are most pronounced in this area: waterlogging, sinkholes, karst, disturbance of the geological environment, vegetation, and changes in the number of anthropogenic objects and buildings. A spectral model is a set of pairs of optimal spectral channels with the largest relative changes in the spectral index between the standards in two images of consecutive dynamic landscape components. The detection of dynamic landscape components corresponding to the reference is performed on two multispectral satellite images, for this purpose it is necessary to scan the area under study with a window corresponding to the size of the reference taking into account the Nyquist frequency. To detect dynamic landscape components in the window, we use a similarity measure as the set of the largest relative changes in time of the spectral index for the scanning window and the reference on two multispectral images. The values of the spectral models for the three references and the values of the similarity measure of the spectral models over the entire image with the reference were obtained, which showed their recognition capabilities, but to specify these changes, we need materials of verification ground observations.

Keywords: adaptive methods, multi-temporal satellite images, spectral model, dynamic components of landscapes, technogenic karst.

*Рукопис статті отримано 01.12.2023
Надходження остаточної версії: 08.12.2023
Публікація статті: 29.12.2023*