

Geology • Geography Dnipro university bulletin

Journal home page: geology-dnu-dp.ua

ISSN 2313-2159 (print)
ISSN 2409-9864(online)

Dniprop. Univer.bulletin.
Geology, geography.,
25(2), 49-57.

doi: 10.15421/111719

Denys O. Dovhanenko, Tatyina P. Mokritska

Dniprop. Univer. bulletin, Geology, geography., 25(2), 49-57

Деякі аспекти аналізу зсувів з використанням серій супутникових знімків Landsat

Д. О. Довганенко, Т. П. Мокрицька

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна, e-mail:ekodnu@i.ua

Received 19 November 2017

Received in revised form 29 November 2017

Accepted 04 December 2017

Резюме. Узагальнено результати дослідження можливості використання мультиспектральних знімків сенсора Landsat 4-ї, 5-ї та 7-ї серій для виявлення змін земної поверхні за дії зсувних процесів. Проаналізовано динаміку спектральних властивостей поверхні з 1988 по 2011 рік за теплий сезон. Виявлено тенденційний та циклічний характер динамічних змін. Установлено надійність нормалізованих індексів NDBI та NDVI як діагностичних ознак небезпечних геологічних процесів. Основною ознакою активізації зсувів є різка взаємопротилежна зміна нормалізованих індексів. Виявлено загальну тенденцію до зниження активності зсувів на території Дніпровсько-Кам'янської агломерації. Частково підтверджено гіпотезу про активізацію зсувів на території Дніпропетровської області під час піків сонячної активності, а саме найбільша частота виникнення зсувів припадає на початок та кінець літа 1988, 2001 та 2007 років. Вибірки екстремумів за літньо-осінній період є статистично однорідними. При цьому 36 % випадків зсувів мають циклічний розвиток. Встановлено, що найбільша ефективність використання супутникових знімків Landsat досягається при аналізі території з найменшим ступенем урбанізації. Наведено інтервальні оцінки нормалізованих індексів, за яких виявлення зсувів найбільш вірогідне.

Ключові слова: знімки Landsat, нормалізовані індекси, зсуви

Some aspects of analysis of landslides using series of Landsat images.

D. O. Dovhanenko, T. P. Mokritska

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail:ekodnu@i.ua

Abstract. The study devoted to problem of landslide dynamic in the territory of Dnipropetrovsk oblast. Study area covered right bank of Dnipro river, between Dnipro and Kamyanske cities. The territory characterized with hilly plain relief on loss soils. Specific combination of geomorphological and climate factors within the territory causes appearance the huge number of landslides. According to the highlighted problems the main aim of this study was to check the hypothesis about long-term dynamic and relation between activation of landslide processes and sunspot activity. The secondary aim was to determine stable diagnostic signs of landslides using satellite images. In accordance to aims the data base of Landsat images was created. The time series of images covered warm season during twenty years period (from 1988 till 2011 years). At the first stage of the study images were preprocessed and digital number was converted into reflectance values. Its allowed to investigate changes of surface type in long term dynamic. The surface changes were studied within locations of active and non-active landslides. There are all over 90 known locations where landslides took placed within this territory. The spectral analysis determined that most relevant signs of landslide are changes with vegetation and soil cover. According to this, the dynamic of surface type transformations was studied using normalized built-up and vegetation indexes (NDBI and NDVI). However, in the urban territory there were problems with recognition type of surface because of insufficient space resolution of Landsat images. This issue had medium influence on the statistical reliability of correlation value. Nevertheless, correlation and in-row statistical analysis showed cyclic and trend type of surface dynamic. More than half of locations characterized with cyclic dynamic, and the last part – with trend dynamic. The zero hypothesis about statistical homogeneity of extremum values NDVI and NDBI confirmed at significance level 0,5. General long-term tendency of NDBI and NDVI has opposite character to itch other: NDBI trend is descending, NDVI – is rising. It allowed to conclude about stabilization of landslides processes in the territory. However, the central hypothesis of the research was confirmed partially. The main part of landslide events took placed in the beginning and in the end of summer seasons of 1988, 2001 and 2007 years. The first pair of years matched with the highest sunspot activity.

Keywords: Landsat images, normalized indexes, landslide processes

Вступ. До небезпечних геологічних процесів (НГП), значно поширених у Дніпропетровській області, відносять зсуви, просадки, ерозійні та суфозійні явища. На правобережній частині долини р. Дніпро, від міста Дніпро до міста Кам'янське, щільність зсувних явищ значно вища. Аномальна щільність зсувних явищ є наслідком дії багатьох факторів: сучасної тектонічної активності, техногенного впливу, особливостей геологічної, геоморфологічної будови, гідрогеологічних та ландшафтних умов, клімату. За даними державного моніторингу екзогенних процесів, загальна кількість зсувних явищ складає 144 тільки у межах м. Дніпро.

Відомо, що етапи активізації зсувних явищ різного типу та механізму відповідають фазам сонячної активності. Причинами відповідності між цими явищами можуть бути зміни напружено-деформованого стану порід масиву внаслідок впливу варіацій магнітного поля на рівневий режим вод, кліматичні та атмосферні явища. Пошук зв'язків між активізацією зсувних явищ та інтенсивністю сонячної активності з метою дослідження результатів моніторингу небезпечних геологічних явищ у межах Дніпропетровської області за сорокарічний період є ключовою ланкою даного дослідження.

Оптимальний шлях виявлення ознак зсувів – використання супутникової або радарної зйомки. Загальноприйнятою практикою вважається саме радарна зйомка (Fan J. R., 2017), (Booth A. M., 2009), (Skibicki J. D., 2017). Але, окрім переваг для виявлення НГП радарна зйомка території потребує досить значних фінансових затрат. Тому, враховуючи існуючий досвід використання даних дистанційного зондування з подібною метою (Duric D., 2017), (Pour A. B., 2017), (Wasowski J., 2017), автори статті вважають доцільним використання саме мультиспектральної зйомки для виявлення зсувів. Зважаючи на найвищу частоту (до одної події за сезон) та найменші масштаби прояву зсувних процесів (до 100 м²), для виконання подібного завдання можна використовувати супутникові знімки з роздільною здатністю до 30 м та частотою зйомки 1 – 2 рази на місяць. З усього різноманіття доступних супутникових даних за вказаними критеріями найбільш відповідні знімки серії радіометрів Landsat. У відповідності з визначеною актуальністю проблеми метою цієї роботи було визначення зв'язку між піками сонячної активності та активізацією НГП на території Дніпропетровської області.

Огляд публікацій. У праці (Filipovich V., 2014) наведено результати моніторингу зсувних процесів на території м. Київ, отримані на підставі дешифрування космічних знімків, показано мо-

жливність виявлення зон із підвищеним температурним фоном. У публікації (Frodella W., 2017) описано результати вивчення динаміки локального зсувного явища на підставі тривалого моніторингу міської території та аналізу космічних знімків. Нині набули активного розвитку методи використання результатів дешифрування багатозональних знімків для створення карт поширення зсувів (Guzzetti F. et al., 2012). Основою подібних методів стали бази даних системи LIDAR. Також ці дані використовували для розробки алгоритму прогнозу зсувних явищ ймовірнісними методами (Gaidzika K. et al., 2017). У той же час у дослідженнях (Rosi, A. and others, 2017) продемонстровано можливості інтерпретації супутникових даних SAR за допомогою методу постійної інтерферометрії розсіювання (PSI), виконано частотний аналіз, виділено зсуви різного типу.

Відомі дослідження, в яких розглядається можливість використання картографічних моделей активної і пасивної вологості ґрунту (SMAP), глобального супутникового картографування продуктів осадження (GSMaP) і глобального поверхневого стоку для моделювання опадів і стоку і оцінки ризику повеней (Ziyue Zeng and others, 2017). У роботі (Donnini M., 2017) показана технологія прогнозу зсувних явищ на основі статистичних оцінок ураженості територій, зайнятих дорогами і зсувними явищами. Останнім часом розвивається напрямок прогнозування регіональних систем, що зв'язує поширеність типових регіональних типів зсувів, транспортні мережі в умовах зміни клімату (Klose M., 2017). На фоні методів дешифрування та картування зсувів вже розробляються прогностичні методи. Наприклад, у роботі (Tom R. Robinson et al., 2017) описують досвід прогнозу сейсмогравітаційними зсувними явищами на основі застосування апарату нечіткої логіки. Китайським дослідникам (Shengwen Qi et al., 2010) вдалося пов'язати ураженість зсувними сейсмогравітаційними явищами з активними розломними порушеннями. Досвід створення єдиної бази даних про зв'язок між сейсмічними і зсувними явищами висвітлений у публікації (Tanyaş, H. et al., 2017).

Матеріали і методи дослідження. В роботі використано результати моніторингу зсувних процесів за 1983 – 2017 рр. підприємством КП «ПівденУкргеологія», а також знімки Landsat 4 – 7.

Перші дані про компоненти інженерно-геологічних умов регіону досліджень датуються 1925 роком. У 1937 році виконано перший опис зсувних явищ. Зв'язок зсувних, просадних явищ був предметом досліджень, причиною зсувів вважали зволоження лесових ґрунтів по контак-

ту зі строкатими або червоно-бурими глинами. Інженерно-геологічна зйомка 1964 р. (масштаб 1 : 50000) була першим систематичним дослідженням небезпечних геологічних процесів, зокрема, ерозійних та зсувних. Велика кількість точок спостереження дає можливість виявити закономірності формування ерозійних і гравітаційних процесів м. Дніпро і його околиць у період відносно слабкої інтенсивності техногенних впливів. Зсувні явища включали циркоподібні, ложкоподібні і фронтальні блоково-ступінчасті зсуви в межах басейнів великих ерозійних систем. У 1975 – 1978 роках було вико-

нано значний обсяг робіт із оцінювання активності розвитку небезпечних і несприятливих геологічних процесів у межах м. Дніпропетровськ та Дніпропетровської області у зв'язку з великими аваріями. При цьому 21 % від загального числа зсувних явищ був пов'язаний з природними причинами, а 79 % - і з техногенними.

З урахуванням наявного ресурсу знімків в архівах GLOVIS сформовано вибірку знімків за 1988 – 2011 роки. На жаль, достатньо представницьку базу знімків сформувати не вдалося, оскільки період 1991 – 1999 та окремі роки (Рис. 1) в офіційних архівах NASA відсутні.

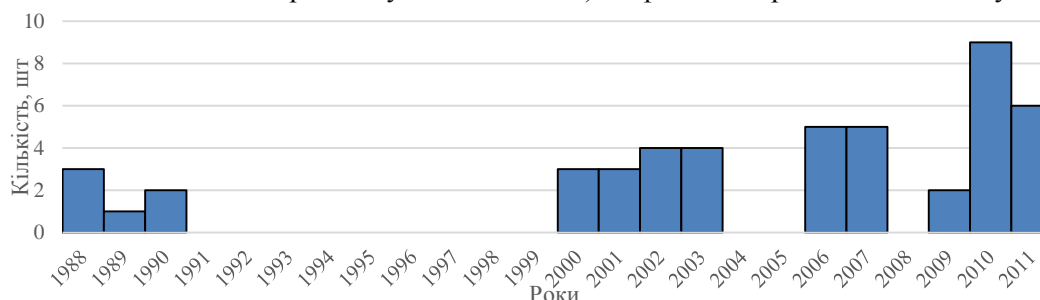


Рис. 1. Кількісний склад бази знімків Landsat 4, 5 та 7 на задану територію

Як було визначено раніше, найбільш небезпечний період активізації зсувів – це теплий сезон року, а отже, до вибірки знімків увійшли ті, що охоплюють період із квітня по жовтень. Особлива увага приділялася місяцям, що належить до так званого нелімітуючого сезону – це квітень – липень для степових районів України. Передбачається, що за цей час відбувається сезонне збільшення стоку поверхневих водних

об'єктів за рахунок опадів (переважно зливого характеру) і, відповідно, посилюється живлення підземних вод. У свою чергу, ці процеси повинні спровокувати критичне обводнення схилів яружно-балкової мережі і виникнення НГП.

Слід зазначити, що знімки низької якості (хмарність вище 30%) відкидалися і в остаточному варіанті база супутникових знімків мала такий кількісний склад (Рис. 2):

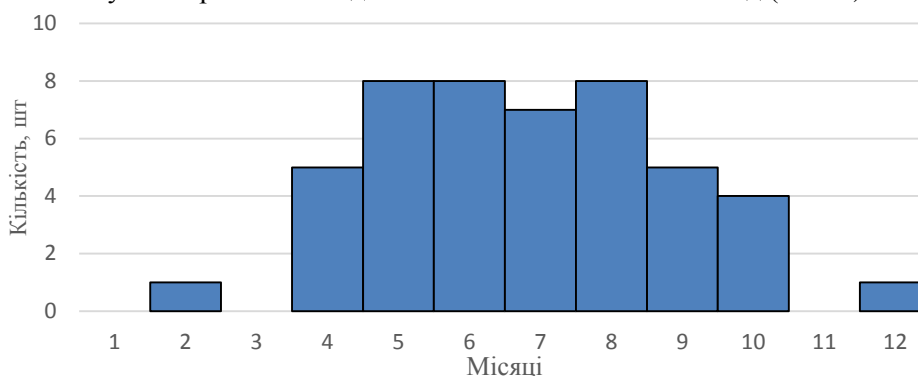


Рис. 2. Кількість знімків по місяцях (з 1988 по 2011 р.)

Усі знімки пройшли стандартну процедуру обробки: калібрування і корегування впливу атмосфери. Оскільки завданням аналізу супутникових знімків було виявлення зміни типу поверхні, значення цифрових одиниць (Digital Number – DN) конвертувались у безрозмірні значення коефіцієнта відображення. Всі перелічені операції виконувались за допомогою стан-

дартних інструментів програмного комплексу ENVI. Всього в аналізі було задіяно 24 знімки радіометрів Landsat.

З метою полегшення пошуку ознак зсувів за мультиспектральними знімками попередній аналіз проводили по точно визначених місцях із зсувами (Рис. 3).



Рис. 3. Місця зафіксованих зсувів

Розподіл місць із зафіксованими зсувами приблизно рівномірний та переважно охоплює частини приміських та міських територій вздовж правобережної частини р. Дніпро. Подібні умови ускладнюють аналіз стану поверхні візуальним способом. Пропонується визначити наявність змін шляхом розрахунку нормалізованих показників спільно з аналізом спектральних кривих. Спектральний аналіз - необхідний захід оскільки зміна форми спектральної кривої є прямим свідченням зміни типу поверхні. Спеціально для здійснення цього етапу дослідження сформовано спектральну бібліотеку типів поверхонь. Зважаючи на роздільну здатність знімків Landsat, для кожного спектра поверхні були розраховані допустимі похибки значень. Практичним шляхом було визначено, що оптимальне значення відхилення становить $1,5\sigma$. Отримані значення спектрів були протестовані на якість дешифрування відповідних типів поверхонь.

Серед усього різноманіття нормалізованих індексів найбільш оптимальними для виконання поставлених завдань обрано індекс ступеня забудови (Normalized Difference Build-Up Index – NDBI) та вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI).

Нормалізований індекс забудови розраховується за рівнянням

$$NDBI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)}, \quad (1)$$

де $SWIR$ – короткохвильовий інфрачервоний спектр (1,55 – 1,75 мкм); NIR – ближній інфрачервоний спектр (0,76 – 0,9 мкм).

Нормалізований вегетаційний індекс розраховується за рівнянням

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}, \quad (2)$$

де NIR – ближній інфрачервоний спектр (0,76 – 0,9 мкм); RED – видимий червоний спектр (0,6 – 0,7 мкм)

Крайні значення обох індексів варіюють від «-1» до «+1». Чим більший індекс, тим щільна забудова та тим щільнішою є рослинний покрив. Значення «0» для NDBI та «0,2» для NDVI означають відсутність ознак забудови та рослинності, відповідно. Від'ємні значення для NDBI свідчать про наявність природного покриття, для NDVI – наявність води або снігу (Measuring Vegetation (NDVI & EVI) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), n.d.).

Для поліпшення статистичної обробки значення вищезгаданих індексів були відібрані по точках зафіксованих зсувів (рис. 3) та наведені у табличній формі. Для цього використано стандартні інструменти просторової статистики геоінформаційної системи Quantum GIS. Усі подальші маніпуляції з даними виконувались у середовищі MS Excel.

Динамічні показники індексів інтерпретувалася наступним чином:

- Зсув відбувається повільно (впродовж декількох місяців або років). Порушення рослинного покриття також повільне і проявляється через зниження життєвих показників. Багаторічна динаміка NDVI має характер тенденції на зниження замість циклу. Індекс забудови також має характер тенденції та поступово підвищується.

- Зсув відбувається раптово. Приріст NDBI між строками буде мати характер позитивного екстремуму, NDVI за той же строк – негативного екстремуму. Обидва показники будуть повертатись до попередніх значень упродовж декількох років.

- Значення обох індексів не співвідносяться (дуже слабка або відсутня кореляція) між

собою. Динамічні показники індексів не мають конкретної тенденції або циклічності. Така ситуація, скоріш за все, буде властива для міських територій. Через високі ступінь забудови та недостатньо високу роздільну здатність сенсора формується «шум», який суттєво знижує можливість діагностування зсувів та стану поверхні загалом.

- Значення індексів занадто високі або занадто низькі. Це може бути пов'язано з якістю знімків. Не зважаючи на те, що бракування знімків відбувалося за хмарності понад 30 %, окремі хмари могли знаходитись у районі досліджуваної території та безпосередньо впливати на показники відображення. До того ж, у районі дослідження розташовано багато підприємств, викиди яких формують «димову завісу», що також впливає на якість знімків в окремих місцях.

Звідси можна зробити висновок про тенденційний характер змін NDBI та більш-менш циклічний характер змін NDVI. При цьому наявність циклічності за NDBI інтерпретувалась як зсуви повільного розвитку.

Статистичний зв'язок між нормалізованими індексами встановлювали за допомогою коефіцієнта кореляції. Для виявлення тенденційних або циклічних змін було застосовано коефіцієнт автокореляції та аналіз корелограм. Кількість лагів автокореляції визначали через співвідношення $n/4$, де n – об'єм вибірки. Інтерпретація значень автокореляції була такою: якщо $r < 0,2$ – тенденція/циклічність відсутня або внутрішньорядний зв'язок не лінійний; $0,2 < r < 0,35$ – значення автокореляції першого порядку більше ніж другого або третього порядку ($r_1 > r_2$

$> r_3$), то наявні тенденційні зміни, в протилежному випадку – мають місце циклічні зміни; $0,35 < r < 0,7$ – внутрішньорядний зв'язок середньої тісноти, характер динаміки визначається таким же способом, як і в попередньому випадку. Знак автокореляції не враховували. Період повторення циклу визначали за номером найбільшого лага.

На жаль, застосування спектрального аналізу в даному випадку не доцільне, оскільки ряди даних не повні. Також не виключено, що по деяких вибірках буде наявний тренд, що, у свою чергу, негативно впливає на результати спектрального аналізу.

Результати та їх аналіз. За результатами аналізу багаторічної динаміки показників стану поверхні встановлено такі положення.

Для проведення спектрального аналізу територія дослідження була розбита на дві частини: міську та приміську (з низьким рівнем забудови). Таким чином визначався вплив різнотипної території на стабільність ознак зсувів за індексами NDBI та NDVI.

Установлено, що мають місце два основні сценарії розвитку подій: тенденційний та циклічний. Тенденційний характер динаміки здебільшого було виявлено по точках, розташованих в межах міських територій (№ 9 – 21 та № 58 – 90), циклічний характер динаміки переважає по точках на приміській території (№ 1 – 8 та № 24 – 57). Як приклад на Рис. 4 показано зміну спектральних профілів поверхонь поблизу точок №42 (Рис. 4 а) та № 49 (Рис. 4 б) за період з 1989 по 2011 рік .

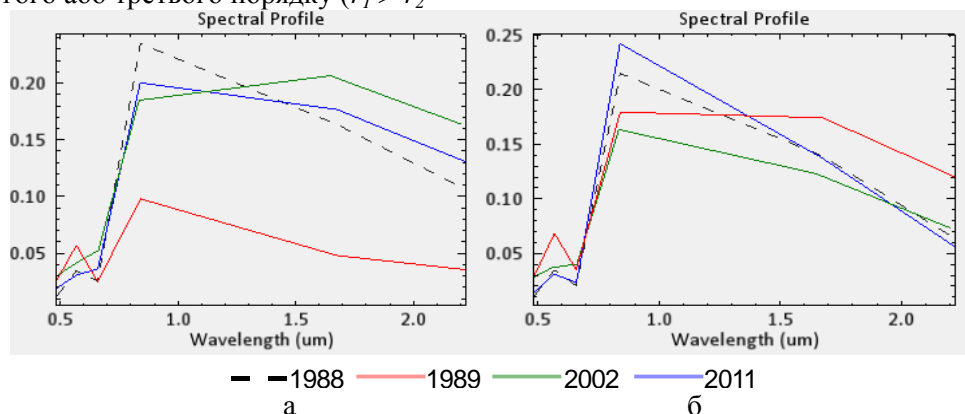


Рис. 4. Динаміка коефіцієнта відображення по точках № 42 (а) та № 49 (б)

По точці № 42 (окраїна м. Дніпро) відмічається повна заміна типу покриття з рослинного (1988 та 1989 рр.) на асфальтоване (2011 р.). У цьому випадку можна зробити припущення, що зсув відбувся у 1988 році і після інженерних заходів (наприклад, зі стабілізації схилоних процесів) ця ділянка була заасфальтована, при-

близно, на початку 2000-х років. Отож зміни тут однонаправленими тобто тенденційними.

По точці № 49 (схил балки на окраїні м. Дніпро) прослідковується цикл відновлення рослинного покриття з 1988 по 2011 рік. Як видно на протязі 1988-89 років відбувалася деградація рослинного покриття. У 1989 році вже переважає сухостій. Спектральний профіль за 2002 рік вка-

зує на наявність дуже бідної рослинності з переважанням ґрунтового покриву, що можна трактувати як початок природного відновлення території після зсуву. У 2011 році відбулося повне відновлення рослинного покриву – спектральний профіль має таку саму форму (з незначним відхиленням по ближньому інфрачервоному спектру), як і у 1988 році

Аналіз динаміки спектральних показників поверхні продемонстрував, що найбільш інтенсивно змінювана поверхня в місцях прояву НГП – це рослинно-ґрунтовий покрив. Отже, вибір індексів NDVI та NDBI як діагностичних ознак зсувів виправданий.

На наступному етапі було проведено кореляційний аналіз вибірок, основні результати якого свідчать про таке. Динаміка середніх ба-

гаторічних значень NDVI та NDBI (Рис. 5) має характер тенденції ($r_1 > r_2$) з незначними проявами періодичності ($r_3 > r_2$), яка припадає на кінець літнього сезону. Значення автокореляції першого лага складає 0,21, що також вказує на нелінійність встановленого зв'язку. Кореляція між індексами обернена та тісна ($r_{\text{NDBI/NDVI}} = -0,66$). Тобто на місцях активних зсувів рослинність деградує, а після зсуву відновлюється. Поступове зниження та збільшення показників – нормальна внутрішньосезонна флуктуація. При цьому помітний взаємопротилежний характер трендів обох індексів: NDVI – зростаючий; NDBI – низхідний. Рослинний покрив на територіях з зсувами поступово відновлюється, що дозволяє зробити висновок про зниження активності НГП в межах досліджуваної території.

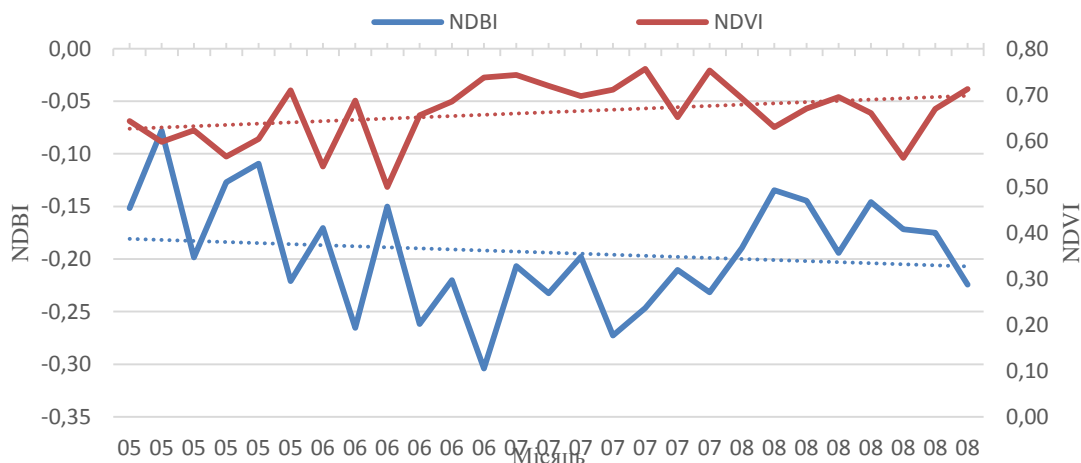


Рис. 5. Динаміка осереднених значень індексів NDBI та NDVI

Наведений тип динаміки є характерним для більшості точок. Окремо слід відзначити динаміку нормалізованих індексів по точках №

25 – 57. В якості прикладу на рис.6 наведено динаміку нормалізованих індексів по точці № 53 за період 1988 – 2011 років.

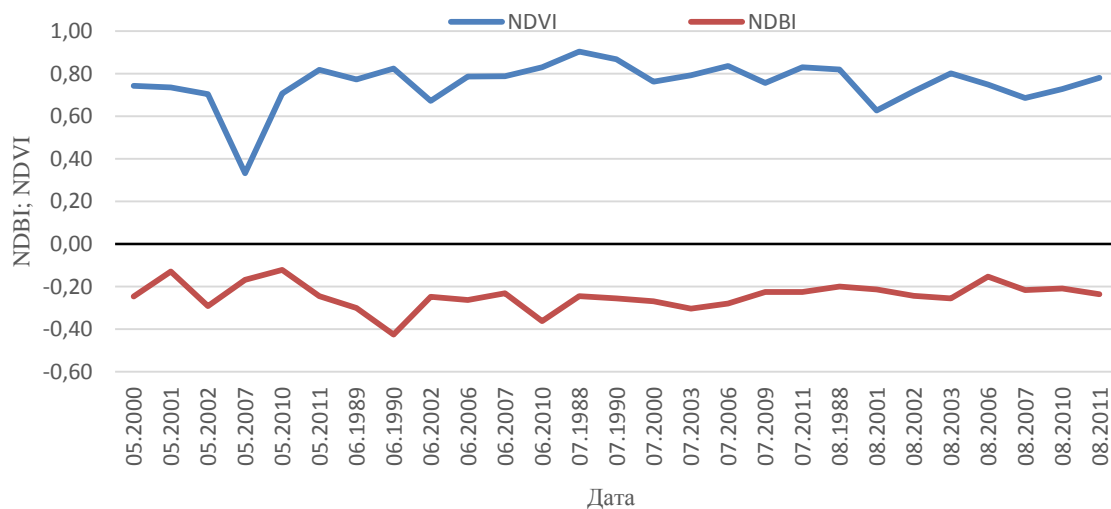


Рис. 6. Багаторічна динаміка NDVI та NDBI по точці № 53

Як і на вищенаведеному графіку, для зазначених точок властиві серії піків NDBI та взаємопротилежних прогинів NDVI, які припадають на травень та серпень. По роках – це 1988, 2001 та 2007-й. Всі, крім останнього року, належать до років із максимальною сонячною активністю. Отже, має місце часткове підтвердження гіпотези про активізацію НГП під час найвищої сонячної активно. Оскільки з'ясовано, що найчастіше зсуви спостерігаються за періоди травень – червень та серпень, по всіх без винятку точках повинна бути схожа динаміка та відповідні статистичні показники.

Для цього виконано перевірку однорідності дисперсій та середніх значень екстремумів нормалізованих індексів. І справді вибірки екстремумів нормалізованих індексів за травень – червень та серпень мають практично однакову дисперсію та середні значення (таблиця).

На рівні значущості $\alpha = 0,05$ гіпотеза про однорідність вибірок було підтверджено: $t < t_{\text{критичне}}$; $F < F_{\text{критичне}}$. Таким чином, можна стверджувати, що зсуви активізуються саме весною, на початку літа та в кінці літнього сезону.

Таблиця. Оцінки параметрів екстремумів нормалізованих індексів NDBI та NDVI

Показник	NDBI _{max}	NDVI _{max}
Середнє значення	0,083	0,097
σ	0,067	0,070
D	0,0045	0,0049
t-статистика	1,03	
t критичне	1,67	
F	1,21	
F критичне	1,93	

Кореляційна залежність між показниками у 80 % (70 точок) щільна та обернена (Рис. 7). Решта характеризується середньою та слабкою залежністю. За критерієм Стюдента встановлено, що лише в шести випадках

коефіцієнт кореляції незначущий. Візуальний аналіз знімків виявив, що на значення нормалізованих індексів у цих точках суттєво вплинули фактори щільної забудови, промислові викиди та наявність хмар.

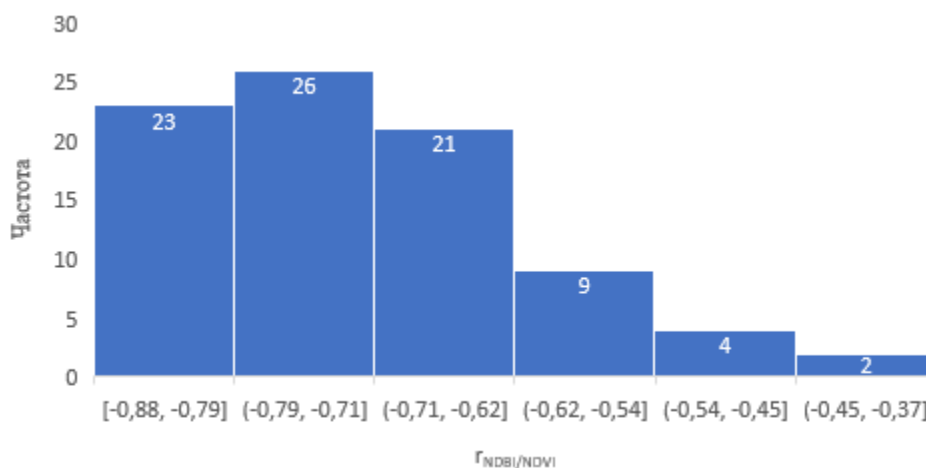


Рис. 7. Ранжовані значення коефіцієнта кореляції між NDBI та NDVI

Так само, як і для аналізу спектральних профілів, проаналізовано кореляційну залежність між індексами в межах міської та міжміської (яружно-балкової мережі) територій. Отримані результати практично ідентичні, з незначною перевагою показників на міжміських територіях ($r_{cp} = 0,75$ проти $r_{cp} = 0,65$). Визначені кореляційні залежності є статистично занчущими на рівні значущості 0,05 та степені вільності – 25. Відповідно до цього зроблено

припущення про достатню надійність обраних критеріїв для виявлення та картування зсувів на територіях із різним рівнем урбанізованості.

За результатами автокореляційного аналізу визначено, що по 19 точках спостерігаються тенденційні зміни, а по 32 – циклічні. Решта (39 точок) мають слабкий внутрішньорядний зв'язок, що може свідчити або про стабілізацію схилових процесів, або про нелінійний вплив неврахованих факторів.

На останньому етапі цього дослідження були розраховані інтервали значень нормалізованих індексів для виявлення та картування зсувів. Для цього використовувались лише вибірки із сильним кореляційним та внутрішньорядним зв'язком. З'ясувалося, що у 45 % випадків значення нормалізованих індексів перебувають у діапазонах: NDBI – (0,08; 0,11) та NDVI – (0,13; 0,16). Слід зауважити, що вказані діапазони індексів придатні для діагностування зсувів за наявності як мінімум пари різночасових знімків. Для діагностування зсувів за одним знімком необхідне проведення додаткових досліджень, спрямованих на аналіз просторової динаміки параметрів цього явища.

Висновок та рекомендації. За результатами виконаного дослідження сформовано такі висновки.

- На території дослідження багаторічна динаміка зсувних процесів набуває характеру тенденції. З огляду на від'ємний лінійний приріст NDBI та позитивний – NDVI можна стверджувати про затухання активності НГП в межах досліджуваної території.

- Використання нормалізованих індексів NDBI та NDVI як діагностичних ознак зсувів виправдане. За використання супутникових знімків Landsat найбільшої точності аналізу динаміки між індексами можна досягти на територіях із мінімальним господарським освоєнням або ступенем забудови.

- Близько 36 % випадків зсувів характеризуються циклічною динамікою, тобто активізуються з періодичністю, що збігається з максимальною сонячною активністю. У 21 % випадків виявлено тенденційний розвиток, а саме, спостерігається відновлення рослинного покриву на місці зсуву. По 43 % точках динаміки не виявлено, що пояснюється або впливом сторонніх неврахованих факторів, або виникненням зсуву в період, що не охоплюється базою знімків Landsat.

- Установлено, що оптимальними значеннями нормалізованих індексів для діагностування зсувів є NDBI – (0,08; 0,11) та NDVI – (0,13; 0,16).

Бібліографічні посилання

Booth A. M., Roering J. J., Perron J. J. (2009) Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology* 109:132 – 147. doi:10.1016/j.geomorph.2009.02.027

- Donnini, M., Napolitano, E., Salvati, P. et al. Impact of event landslides on road networks: a statistical analysis of two Italian case studies. *Landslides* (2017) 14: 1521. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0829-4>
- Duric, D., Mladenovic, A., Pesic-Georgiadis, M., Marjanovic, M., & Abolmasov, B. (2017). Using multiresolution and multitemporal satellite data for post-disaster landslide inventory in the Republic of Serbia. *Landslides*, 14(4), 1467 – 1482. doi:10.1007/s10346-017-0847-2
- Fan, J. R., Zhang, X. Y., Su, F. H., Ge, Y. G., Tarolli, P., Yang, Z. Y., . . . Zeng, Z. (2017). Geometrical feature analysis and disaster assessment of the Xinmo landslide based on remote sensing data (vol 14, pg 1677, 2017). *Journal of Mountain Science*, 14(10), 2136 – 2136. doi:10.1007/s11629-017-4497-6
- Guzzetti F., Cesare Mondini A., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chang K.-T. *Earth-Science Reviews*. Volume 112, Issues 1–2, April 2012, Pages 42 – 66
- Filipovich V., Mychak A., Krylova A. Use satellite data in monitoring ecological condition of urban landscape. 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. Albena, Bulgaria, Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Section Cartography and Gis.// Conference Proceedings, 2014. — Vol. III, —P. 1061 – 1068, DOI:10.5593/sgem2014B23
- Frodella, W., Ciampalini, A., Bardi, F. et al. *Landslides* (2017). <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0875-y>
- Klose M., Auerbach M., Herrmann C., Kumerics C., Gratzki A. (2017) Landslide Hazards and Climate Change Adaptation of Transport Infrastructures in Germany. In: Sassa K., Mikoš M., Yin Y. (eds) *Advancing Culture of Living with Landslides*. WLF 2017. Springer, Cham
- Gaidzika K., Teresa Ramirez-Herrera M., Bunn M., Leshchinsky B. A., *Measuring Vegetation (NDVI & EVI) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. (б.д.). Получено из Nasa. Earth Observatory: https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php
- Olsenb M. and Regmi N. R. *Landslide manual and automated inventories, and susceptibility mapping using LIDAR in the forested mountains of Guerrero, Mexico*. GEOMATICS, NATURAL HAZARDS AND RISK, 2017 <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2017.1292560>
- Pour, A. B., & Hashim, M. (2017). Application of Landsat-8 and ALOS-2 data for structural and landslide hazard mapping in Kelantan, Malaysia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(7), 1285 – 1303. doi:10.5194/nhess-17-1285-2017
- Rosi, A., Tofani, V., Tanteri, L. et al. *Landslides* (2017). <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0861-4>

- Shengwen Qi, Qian Xu, Hengxing Lan, Bing Zhang, Jianyou Liu. Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China. *Engineering Geology* Volume 116, Issues 1–2, 27 October 2010, P. 95 – 108.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.07.011>
- Skibicki, J. D. (2017). The issue of uncertainty of visual measurement techniques for long distance measurements based on the example of applying electric traction elements in diagnostics and monitoring. *Measurement*, 113, 10 – 21.
[doi:10.1016/j.measurement.2017.08.033](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.033)
- Tanyaş, H., van Westen, C. J., Allstadt, K. E., Anna Nowicki Jessee, M., Görüm, T., Jibson, R. W., ... Hovius, N. (2017). Presentation and analysis of a worldwide database of earthquake-induced landslide inventories. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122.
<https://doi.org/10.1002/2017JF004236>
- Tom R. Robinson, Nicholas J. Rosser, Alexander L. Densmore, Jack G. Williams, Mark E. Kincey, Jessica Benjamin, and Heather J. A. Bell. Rapid post-earthquake modelling of coseismic landslide intensity and distribution for emergency response decision support. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 1521–1540, 2017
<https://doi.org/10.5194/nhess-17-1521-2017>
- Wasowski, J., Bovenga, F., Nutricato, R., Nitti, D. O., & Chiaradia, M. T. (2017). High resolution satellite multi-temporal interferometry for monitoring infrastructure instability hazards. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(1), 9.
[doi:10.1007/s41062-017-0077-4](https://doi.org/10.1007/s41062-017-0077-4)
- Zeng Z., Tang G., Hong Y., Zeng C. & Yang Y. (2017). Development of an NRCS curve number global dataset using the latest geospatial remote sensing data for worldwide hydrologic applications, *Remote Sensing Letters*, 8:6, 528-536, DOI:10.1080/2150704X.2017.1297544