



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.1.187>

УДК 528.855:58.04

## Адаптивні методи виявлення змін довкілля за допомогою багатоспектральних космічних знімків Землі на прикладі території Солотвино

В. Г. Якимчук \*, К. Ю. Суханов, О. В. Томченко

ДУ “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. О. Гончара 55 Б, Київ 01054, Україна

Описано методи виявлення змін довкілля за допомогою двох різночасових мультиспектральних космічних знімків Землі, які можуть бути використані для оцінки змін еколого-геологічної обстановки і контролю динаміки процесів в реальному масштабі часу, з метою попередження надзвичайної екологічної ситуації. Створення та функціонування системи постійного геоecологічного моніторингу на основі космічної інформації передбачає виявлення відносних змін довкілля за двома мультиспектральними космічними знімками Землі, отриманими через певний проміжок часу. Для цього необхідно розробити і застосувати адаптивні методи (індекси) виявлення відносних змін. Пропонуються три методи, які адаптуються до конкретних знімків, для знаходження оптимального рішення, що максимізує відносні зміни за двома різночасовими мультиспектральними космічними знімками Землі. При цьому перший метод вибирає один оптимальний канал зі всіх каналів знімка, другий метод — два оптимальні канали зі всіх каналів і третій — чотири оптимальні канали зі всіх каналів. Відомі методи дають оцінку наявності чи відсутності змін на двох різночасових зображеннях, але не дають інформації про напрямок змін. Пропоновані індекси можуть приймати додатні та від’ємні значення, які відображають тенденцію змін на місцевості. Від’ємні значення індексів, отримані на території біля смт Солотвино Тячівського району Закарпатської області, відповідають ділянкам з найбільш динамічними змінами довкілля таких екзогенних процесів як карстові воронки та озера, а додатні значення відповідають збільшенню площ рослинності. Результати порівняння застосування індексу виявлення змін на двох різночасових мультиспектральних космічних знімках Землі за чотирма, двома каналами і одним каналом показали, що збільшення числа каналів може дати більш обґрунтовану картину змін, але для конкретизації цих змін необхідні матеріали наземних спостережень.

Ключові слова: різночасові космічні знімки, зміни довкілля, адаптивні методи

© В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов, О. В. Томченко. 2021

### 1. Вступ

Втручання людини у природні процеси різко зростає, наприклад, будівництво гідротехнічних споруд, шахт, рудників, доріг, свердловин, водойм, дамб, деформація суші вибухами, будівництво гігантських міст, обводнення і озеленення пустель, та інші повсякденні аспекти діяльності людини викликають значні видимі і приховані зміни довкілля.

Виявлення змін довкілля за допомогою мультиспектральних космічних знімків Землі може бути виконано з використанням методів визначення змін на конкретних ділянках поверхні Землі через певний проміжок часу. Основна мета виявлення змін — надання кількісної та якісної інформації про зміни та їх просторовий розподіл. Вплив широкого спектру факторів на результати виявлення змін часто призводить до труднощів у виборі найбільш підходящого методу для конкретної проблеми. Виявлення змін — це напрямок, що розвивається і має широкий спектр застосувань у різних областях. З розвитком технологій з’являються нові космічні системи гіперспектрального знімання, що дають більш детальні зоб-

раження із високим просторовим розрізненням. Дослідження методів виявлення змін за допомогою мультиспектральних космічних знімків Землі все ще є актуальною задачею і нові методи необхідні для ефективного використання все більш різноманітних і складних дистанційно даних.

Метою роботи є розроблення нових ефективних методів, які дозволять виявити зміни з мінімальними помилками на землях з техногенними та природними порушеннями за мультиспектральними космічними знімками. В статті пропонуються адаптивні методи виявлення відносних змін довкілля з оптимальним вибором одного або кількох каналів мультиспектральних космічних знімків Землі. В цих методах визначається індекс змін, який може мати більші і менші нуля значення, тобто, аналізуючи два різночасові космічні знімки, можна визначити напрямок змін індексу. Методи виявлення змін еколого-геологічної обстановки використовують два, рознесені в часі, космічні знімки однієї території поверхні Землі.

У випадку змін місцевості при завданні періодичного моніторингу використовуються методи, засновані на аналізі й класифікації різночасових аеро- і космічних зображень. Основні методи ідентифікації змін місцевості можна умовно підрозділити на три групи (Гиенко; Гиенко, 2013): методи з безпосереднім використанням вихідних зображень і методи засновані на результатах перетворення зображень та дешифрування знімків.

\* E-mail: [vladj@ukr.net](mailto:vladj@ukr.net)  
Tel.: +380 67 497 92 46  
<https://orcid.org/0000-0001-7818-3562>.

В статті (Radke et al., 2005) представлено систематичний огляд загальних етапів обробки та основних правил прийняття рішень в сучасних алгоритмах виявлення змін, включаючи тестування значущості та гіпотези. Робота (Lu et al., 2004) узагальнює та переглядає різні методики виявлення змін, серед яких аналіз головних компонентів і порівняння після класифікації є найбільш поширеними методами. Останніми роками аналіз спектральної суміші, штучні нейронні мережі та інтеграція географічної інформаційної системи та даних дистанційного зондування стали важливими прийомом для виявлення змін.

Результати картування змін рослинного покриву Київської агломерації з використанням даних часових рядів багатоспектральних супутникових знімків Landsat за період з 1992 по 2011 рр. представлені в роботі (Станкевич; Пестова, 2014). У якості основного показника, що характеризує рослинний покрив, обрано індекс листової поверхні *LAI*.

В роботі (Lu et al., 2004) методи виявлення змін згруповані в сім категорій: алгебра, перетворення, класифікація, моделі, підходи географічної інформаційної системи, візуальний аналіз, та інші підходи.

Індикатором техногенних та природних змін на порушених гірничими роботами землях може виступати різниця значень вегетаційних індексів в часі (Шапар; Тараненко, 2018). В роботі застосовано метод розрахунку та аналізу різних спектральних індексів, які забезпечують підсилення відмінностей між певними змінами типів поверхні. Відмінності можуть бути різні, але немає об'єктивного вибору індексів для будь яких відмінностей на місцевості.

Програмний комплекс ENVI представлено групою інструментів ENVI Change Detection ([www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI](http://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI)), в якій є пошук змін за вихідними даними космічної зйомки та пошук і аналіз змін за растрами класифікації.

Різні методи виявлення змін мають свої власні переваги, і жоден підхід не є оптимальним і не може застосовуватися до всіх випадків. На практиці різні алгоритми часто порівнюються, щоб знайти кращі результати виявлення змін для конкретного застосування. Дослідження методів виявлення змін все ще є актуальною темою, і нові методи необхідні для ефективного використання все більш різноманітних і складних дистанційно відстежуваних даних, доступних або прогнозованих, які найближчим часом будуть доступні від супутникових та повітряних датчиків. Розглянуті методи дають оцінку наявності чи відсутності змін на зображеннях, але не дають інформації про напрямок змін.

Пропонується ряд методів виявлення відносних змін довокільця за мультиспектральними космічними знімками Землі. Для обчислень було написано скрипти на мові програмування Python, а також бібліотеки *pillow*, *numpy*, *scipy*. В методах виявлення відносних змін визначаються індекси змін, які можуть мати значення, як більші нуля, так і менші нуля. Тобто, аналізуючи ряд космічних знімків, можна визначити напрямки змін індексів.

Але до виявлення відносних змін необхідно забезпечити мінімально можливий взаємний зсув двох різночасових зображень, тому розглянемо методи, використовувані в задачах усунення взаємного зсуву зображень. Найпростішим підходом для визначення параметрів неузгодженості є кореляційні методи (Форсайт; Понс, 2008). Для оцінки точності суміщення зображень  $L_1$  і  $L_2$  використовуються різні міри, наприклад, взаємна кореляційна функція:

$$R(x, y) = \sum_{x', y'} I_1(x', y') I_2(x + x', y + y')$$

чи коефіцієнт кореляції (Brown, 1992). Зазначена функція розраховується для всіх можливих значень взаємного зсуву зображень  $x'$ ,  $y'$  і має пік у тому місці, де зображення збігаються.

До статистичних методів визначення параметрів взаємного зсуву зображень також належать методи, засновані на розрахунках евклідової міри неузгодженості зображень:

$$D(x, y) = \sum_{x', y'} [L_1(x', y') - L_2(x + x', y + y')]^2$$

і міри  $L_1$  (Barnea; Silverman, 1972) (міра також може бути нормалізована шляхом вирахування середніх значень по локальному вікню):

$$S(x, y) = \sum_{x', y'} |L_1(x', y') - L_2(x + x', y + y')|^2$$

При всіх можливих зсувах зображень  $(x, y)$  обчислюється сумарний добуток яскравості відповідних точок  $(x', y')$ . Максимальне значення кореляції відповідає найкращому суміщенню.

Для оцінки параметрів неузгодженості також використовуються Фур'є-методи. Метод фазової кореляції дозволяє визначити зсув. Поворот зображення в площині  $XU$  і його масштабування можуть бути визначені за допомогою методу (Castro; Morandi, 1987) і перетворення Фур'є-Мелліна.

В даному дослідженні застосовано взаємну кореляційну функцію (1), яка розраховується для всіх можливих значень взаємного зсуву зображень на один піксель. Визначається максимум кореляційної функції, який і означає, що зображення збігаються.

$$R(x, y) = \sum_{x'} \sum_{y'} L_1(x', y') L_2(x + x', y + y'). \quad (1)$$

## 2. Район дослідження

Методи апробовано на території біля смт. Солотвино Тячівського району Закарпатської області, де знаходиться Солотвинське родовище кам'яної солі. Останніми роками на Солотвинському родовищі кам'яної солі активізувалася надзвичайна екологічна ситуація, результатом чого стала втрата діючих шахт, повна аварійна зупинка роботи солевидобувного підприємства, деградація ландшафту, виникнення деградаційного рельєфу, розвиток величезних провалів навіть за межами гірничого відводу діючих шахт. В роботі (Шехунова та ін., 2015) запропонована інтегральна цифрова геологічна модель Солотвинської структури, як інструмент оцінки геоекологічного стану та визначення заходів з відновлення рівноваги в геологічному середовищі. Аналіз моделі свідчить про відсутність сучасної геологічної інформації про стан геологічного середовища для визначення критичних параметрів геологічного середовища. Адаптивні методи виявлення змін довокільця за допомогою мультиспектральних космічних знімків Землі допоможуть визначити місця вказаних критичних параметрів, за умови проявлення їх на поверхні Землі.

За результатами систематизованих попередніх досліджень та власних візуальних маршрутних обстежень у 2017–2018 рр. розроблено схему зональності території смт. Солотвина як основа для забезпечення безпеки життєдіяльності та організації системи постійного геоекологічного моніторингу Солотвинської солянокупольної структури та прилеглих територій (Шехунова та ін., 2019). З огляду на складну геоекологічну ситуацію створення системи дистанційного моніторингу Солотвинської солянокупольної структури та прилеглих територій є першочерговим завданням.

В роботі (Stoeckl et al., 2020) описано гідрогеологічне

дослідження гірського району Солотвино, включаючи річку Тису та гори Магура, яке було проведено європейською командою цивільного захисту (*European Civil Protection Team*). Були відвідані всі потенційні місця відбору проб у досліджуваній зоні, наприклад, різні свердловини підземних вод, шахтні шахти та кратери, поглиблення, озера та річки. Тим не менше, деякими місцями довелося знехтувати для відбору проб з міркувань безпеки, наприклад, різні занедбані шахтні стволи. Наведені в роботі аерофотознімки для порівняння кратерів на шахтах в 2012 та 2016 роках дають візуальне відображення ситуації, але для точного визначення змін необхідно застосувати адаптивні методи виявлення змін довкілля за допомогою мультиспектральних космічних знімків Землі.

Використовуючи технології космічного моніторингу та з виконанням ГІС-моделювання було проведено аналіз динаміки просідань земної поверхні над Солотвинським солерудником. З'ясовано, що на родовищі поширені поверхневі та підземні прояви соляного карсту (Готинян та ін., 2008). На денній поверхні поверхневі форми соляного карсту представлені карами, понорами, лійками, блюдцеподібними пониженнями рельєфу, колодзями й печерами (Tomchenko та ін., 2019). Виділені типи екзогенних процесів наведено на фрагменті космічного знімку високого розрізнення WorldView 2 (Рис. 1).

Для дослідження знімків супутників Sentinel-2 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>) були вибрані канали з просторовим розрізненням 10 м і 20 м (Таблиця 1).

На Рис. 2 наведено синтезовані знімки Sentinel-2 за серпень 2015 та 2019 років на територію Солотвинського солерудника на основі яких було апробовано 3 методи виявлення змін довкілля, розглянуті нижче.

Далі представлено три методи (індекси) виявлення відносних змін довкілля за двома мультиспектральними космічними знімками Землі, отриманими через певний проміжок часу. Всі методи побудовані на знаходженні оптимального рішення, яке максимізує відносні зміни за двома мультиспектральними космічними знімками Землі. При цьому перший метод вибирає один оптимальний канал зі всіх каналів знімка, другий метод — два оптимальні канали зі всіх каналів і третій — чотири оптимальні канали зі всіх каналів. Індекси можуть приймати додатні та від'ємні значення, які відображають тенденцію змін на місцевості.

### 3. Методи дослідження

#### 3.1. Індекс виявлення відносних змін довкілля за одним каналом мультиспектральних космічних знімків Землі

Індекс виявлення відносних змін довкілля за одним каналом, або диференційний нормалізований (*Index differential normalized — IDN*) пікселів двох різночасових знімків визначається як відношення різниці яскравості відповідних пікселів першого і другого знімків до суми їх яскравості. Позначимо яскравості пікселів двох різночасових мульти-

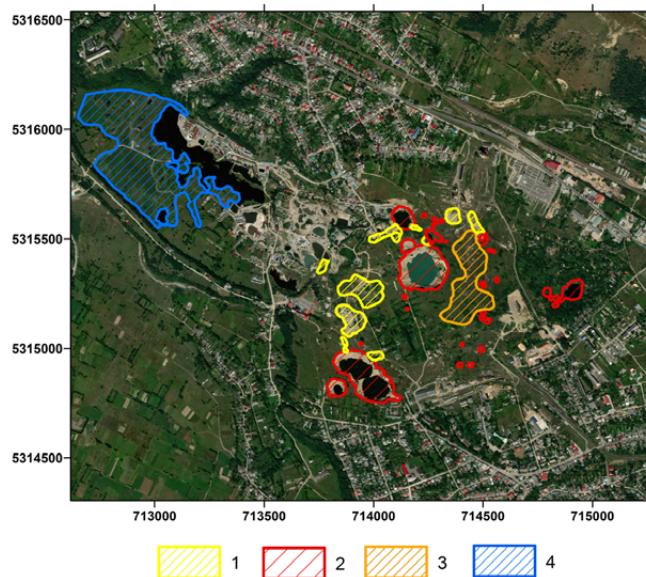


Рис. 1. Фрагмент космічного знімка WorldView-2 (2019 р.) з виділеними проявами екзогенних процесів на території Солерудника: 1 — зсуви; 2 — провали; 3 — карстові поля; 4 — заболочені ділянки

Таблиця 1.

Смуги і центральна довжина хвилі супутників Sentinel-2

Смуги Sentinel-2	2	3	4	5	6	7	8	11	12
	Синя	Зелена	Червона	Вегетаційний червоний край	Вегетаційний червоний край	Вегетаційний червоний край	NIR	Короткохвильовий інфрачервоний	SWIR
Центральна довжина хвилі (nm)	0.490	0.560	0.665	0.705	0.740	0.783	0.842	1.610	2.190

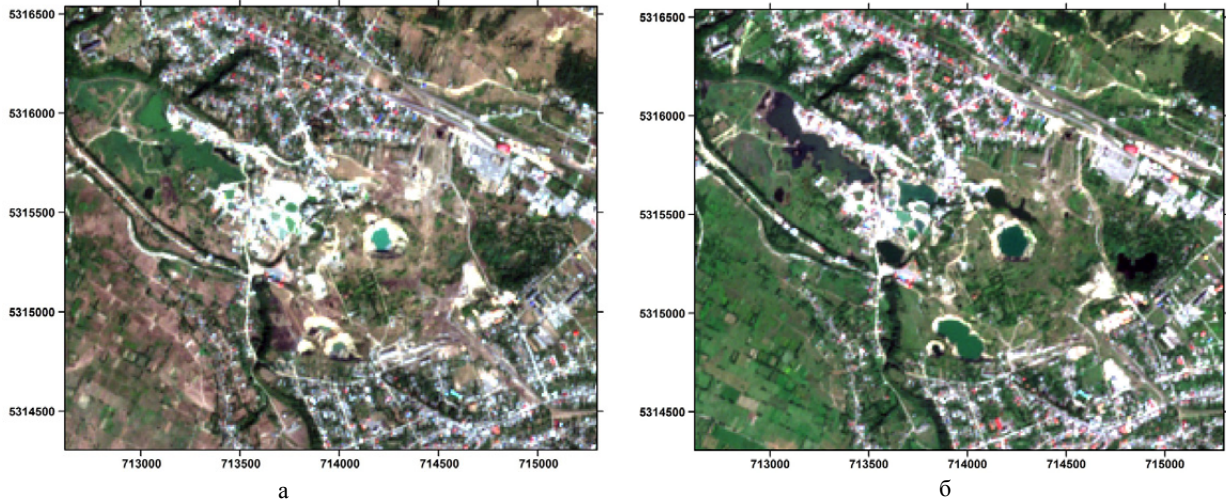


Рис. 2. Фрагменти синтезованих знімків Sentinel-2 в комбінації каналів 432 за наступні дати: а — 31 серпня 2015; б — 27 серпня 2019

спектральних космічних знімків  $L'_{i1}(x, y), L'_{i2}(x, y)$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ),  $I$  — кількість каналів знімка,  $x = 1, 2, \dots, X; y = 1, 2, \dots, Y$  — координати пікселів знімків.

Спочатку необхідно виконати нормалізацію яскравості пікселів двох різночасових мультиспектральних космічних знімків  $L'_{i1}(x, y), L'_{i2}(x, y)$ , що дозволить погодити діапазони їх змін. Щоб одержати розподіл значень у межах інтервалу  $[0; 1]$ , скористуємося так званою мінімаксною формулою:

$$L_{i1}(x, y) = \frac{L'_{i1}(x, y) - \min[L'_{i1}(x, y)]}{\max[L'_{i1}(x, y)] - \min[L'_{i1}(x, y)]},$$

$$L_{i2}(x, y) = \frac{L'_{i2}(x, y) - \min[L'_{i2}(x, y)]}{\max[L'_{i2}(x, y)] - \min[L'_{i2}(x, y)]}.$$

Індекс виявлення відносних змін довкілля за одним каналом  $i$ -го каналу визначаємо відповідно до виразу

$$IDN_i(x, y) = \frac{L_{i1}(x, y)L_{i2}(x, y)}{L_{i1}(x, y) + L_{i2}(x, y)}, \quad (2)$$

$$x = 1, 2, \dots, X - M; y = 1, 2, \dots, Y - N \quad (i = 1, 2, \dots, I).$$

Визначаємо суми модулів  $IDN$

$$S_i = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y |IDN_i(x, y)| \quad (i = 1, 2, \dots, I)$$

та максимальне значення  $S^* = \max(S_i)$ , а відповідний цьому максимальному значенню канал позначимо  $i^*$  та індекс позначимо  $IDN^*(x, y)$ .

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

$$IDN_n^*(x, y) = \max \left( -1, \min \left( 1, \frac{IDN^*(x, y)}{K_{1n}} \right) \right) \cdot (2^C - 1), \quad (3)$$

де  $IDN_n^*(x, y)$  — нормовані значення,  $K_{1n} = \max \left( \left| \overline{IDN}^*(x, y) + 3\sigma \right|, \left| \overline{IDN}^*(x, y) - 3\sigma \right| \right)$  — середнє значення,  $\sigma$  — середньоквадратичне відхилення. А потім перетворюємо значення (3) в спектральні яскравості шляхом округлення до найближчого цілого.

Спектральні яскравості (3) ілюструють наявність змін адаптивного індексу (Рис. 3), їх значення і напрямок та можуть бути використані для подальшої інтерпретації змін. Аналіз результатів застосування індексу виявлення відносних змін довкілля за одним каналом наведено далі.

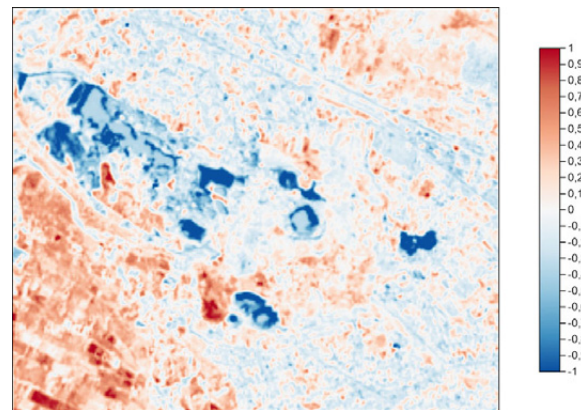


Рис. 3. Індекс виявлення відносних змін довкілля за каналом  $i^* = 8$ , визначений по формулі (3), за двома знімками Sentinel-2 2015 та 2019 років

### 3.2. Індекс виявлення відносних змін довкілля за двома каналами мультиспектральних космічних знімків Землі

В роботі (Федоровский и др., 2010) для пошуку покладів вуглеводнів за спектрограмами рослинності застосовано адаптивний спектральний індекс, що відповідає оптимальним довжинам хвиль спектрограм, які визначаються за максимальним модулем різниці між значеннями індексів для території з покладами та без покладів.

В даній роботі розглянуто індекс змін за двома каналами

(Index 2 Band- $I2B$ ) для виявлення відносних змін довкілля за мультиспектральними космічними знімками Землі. Позначимо множини спектральної яскравості двох різночасових мультиспектральних космічних знімків однієї території  $L_{1i}(x, y)$  та  $L_{2i}(x, y)$ , де  $i = 1, 2, \dots, I$  — канали знімка,  $x = 1, 2, \dots, X$ ;  $y = 1, 2, \dots, Y$  — координати пікселів знімків.

Алгоритм визначення адаптивного індексу змін побудований на оцінці по знімку відстані між значеннями спектральних індексів. Визначення оптимальних номерів каналів  $p$  і  $q$  ( $p = 1, 2, \dots, P - 1, q = 2, 3, \dots, P$ ), де  $P$  — кількість спектральних каналів, проводиться по представленому далі алгоритму.

Позначимо індекс першого знімка  $I2B_{1(p,q)}(x, y)$ , індекс другого знімка  $I2B_{2(p,q)}(x, y)$  та введемо загальне позначення для двох знімків  $I2B_{t(p,q)}(x, y)$  ( $t = 1, 2$ ), індекси визначаються відповідно до виразу

$$I2B_{t(p,q)}(x, y) = \frac{L_{tp}(x, y) - L_{tq}(x, y)}{L_{tp}(x, y) + L_{tq}(x, y)}, \quad (4)$$

де  $L_{tp}(x, y)$ ,  $L_{tq}(x, y)$  — значення спектральної яскравості пікселів  $p$ -го і  $q$ -го каналів знімків,  $p = 1, 2, \dots, P - 1, q = 2, 3, \dots, P, x = 1, 2, \dots, X; y = 1, 2, \dots, Y$  — координати пікселів знімків.

Далі визначаються модулі різниць  $|I2B_{2(p,q)}(x, y) - I2B_{1(p,q)}(x, y)|$  відповідних пікселів двох різночасових знімків та сума модулів за формулою

$$\begin{aligned} |\Delta I2B_{p,q}(x, y)| &= \sum_{x,y} |I2B_{2(p,q)}(x, y) - I2B_{1(p,q)}(x, y)| = \\ &= \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \left| \frac{L_{2p}(x, y) - L_{2q}(x, y)}{L_{2p}(x, y) + L_{2q}(x, y)} - \frac{L_{1p}(x, y) - L_{1q}(x, y)}{L_{1p}(x, y) + L_{1q}(x, y)} \right|. \end{aligned}$$

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  $p^*, q^*$ , які дають найбільші відносні зміни для двох різночасових знімків.

Різниця  $\Delta I2B_{p^*,q^*}(x, y)$  досліджуваної території за двома каналами мультиспектральних космічних знімків Землі визначається за формулою

$$\Delta I2B_{p^*,q^*}(x, y) = I2B_{2(p^*,q^*)}(x, y) - I2B_{1(p^*,q^*)}(x, y). \quad (5)$$

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

$$\Delta I2B_{p^*,q^*}(x, y)_n = \max \left( -1, \min \left( 1, \frac{\Delta I2B_{p^*,q^*}(x, y)}{K_n} \right) \right) \cdot (2^C - 1), \quad (6)$$

де  $I2B_{p^*,q^*}(x, y)_n$  — нормовані значення,

$$K_n = \max \left( \left| \overline{\Delta I2B_{p^*,q^*}(x, y)} + 3\sigma \right|, \left| \overline{\Delta I2B_{p^*,q^*}(x, y)} - 3\sigma \right| \right),$$

$\overline{\Delta I2B_{p^*,q^*}(x, y)}$  — середнє значення,  $\sigma$  — середньоквадратичне відхилення. А потім перетворюємо значення (6) в спектральні яскравості шляхом округлення до найближчого цілого.

Для оцінки результату застосування індексу виявлення змін за двома каналами (6) в порівнянні з індексом

диференційним нормалізованим (3) необхідно обчислити різницю

$$diff_{2,1} = \Delta I2B_{p^*,q^*}(x, y)_n - IDN_n^*(x, y). \quad (7)$$

Спектральні яскравості (6) ілюструють наявність змін адаптивного індексу (Рис. 4), їх значення і напрямки та можуть бути використані для подальшої інтерпретації змін. Аналіз результатів застосування індексу виявлення відносних змін за двома каналами наведено далі.

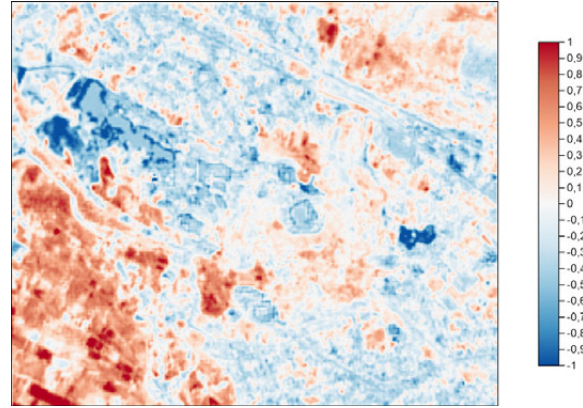


Рис. 4. Індекс виявлення відносних змін довкілля за двома каналами  $p^* = 8, q^* = 12$ , визначений по формулі (6), за двома знінками Sentinel-2 2015 та 2019 років

### 3.3. Індекс виявлення відносних змін довкілля за чотирима каналами мультиспектральних космічних знімків Землі

Позначимо індекс змін за чотирима каналами  $I4B_{p,q,y,s}^1(x, y)$  для першого знімка,  $I4B_{p,q,y,s}^2(x, y)$  для другого знімка та введемо загальне позначення для двох знімків  $I4B_{t(p,q,y,s)}(x, y)$  ( $t = 1, 2$ ), індекси визначаються відповідно до виразу

$$I4B_{t(p,q,y,s)}(x, y) = \frac{L_{tp}(x, y) - L_{tq}(x, y)}{L_{ty}(x, y) + L_{ts}(x, y)}, \quad (8)$$

де  $L_{tp}(x, y)$ ,  $L_{tq}(x, y)$  — значення спектральної яскравості пікселів  $p$ -го і  $q$ -го каналів знімків,  $p = 1, 2, \dots, P - 1, q = 2, 3, \dots, P, L_{ty}(x, y)$ ,  $L_{ts}(x, y)$  — значення спектральної яскравості пікселів  $t$ -го і  $s$ -го каналів знімків,  $r = 1, 2, \dots, P - 3, s = 2, 3, \dots, P - 2, x = 1, 2, \dots, X; y = 1, 2, \dots, Y$  — координати пікселів знімків.

Далі визначаються модулі різниць  $|I4B_{2(p,q,r,s)}(x, y) - I4B_{1(p,q,r,s)}(x, y)|$  відповідних пікселів двох різночасових знімків та сума модулів за формулою

$$\begin{aligned} |\Delta I4B_{p,q,r,s}(x, y)| &= \sum_{x,y} |I4B_{2(p,q,r,s)}(x, y) - I4B_{1(p,q,r,s)}(x, y)| = \\ &= \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \left| \frac{L_{2p}(x, y) - L_{2q}(x, y)}{L_{2r}(x, y) + L_{2s}(x, y)} - \frac{L_{1p}(x, y) - L_{1q}(x, y)}{L_{1r}(x, y) + L_{1s}(x, y)} \right| \end{aligned}$$

Для множини  $N^4$  впорядкованих пар значень  $p$  і  $q$  та  $r$  і  $s$  складаємо декартовий добуток  $N^4$  і обчислюємо значення  $|\Delta I4B_{p,q,r,s}(x, y)|$ . З отриманих значень  $|\Delta I4B_{p,q,r,s}(x, y)|$  ви-

бираємо найбільші, за якими визначаються пари каналів  $p^*$ ,  $q^*$  та  $r^*$ ,  $s^*$ , які дають найбільші відносні зміни для двох різночасових знімків.

Різниця  $\Delta I4B_{p^*,q^*,y^*,s^*}(x,y)$  досліджуваної території за чотирма каналами мультиспектральних космічних знімків Землі визначається за формулою

$$\Delta I4B_{p^*,q^*,y^*,s^*}(x,y) = I4B_{2(p^*,q^*,y^*,s^*)}(x,y) - I4B_{1(p^*,q^*,y^*,s^*)}(x,y). \quad (9)$$

Для візуалізації  $\Delta I4B_{p^*,q^*,y^*,s^*}(x,y)$  досліджуваної території виконано нормування з використанням середньоквадратичного відхилення за формулою та приведення до розрядності  $C$  зображення

$$\Delta I4B_{p^*,q^*,y^*,s^*}(x,y)_n = \max \left( -1, \min \left( 1, \frac{\Delta I4B_{p^*,q^*,y^*,s^*}(x,y)}{K_{4n}} \right) \right) \cdot (2^C - 1),$$

де  $\Delta I4B_{p^*,q^*,y^*,s^*}(x,y)_n$  — нормовані значення,

$$K_{4n} = \max \left( \left| \overline{\Delta I4B_{p^*,q^*,r^*,s^*}}(x,y) + 3\sigma \right|, \left| \overline{\Delta I4B_{p^*,q^*,r^*,s^*}}(x,y) - 3\sigma \right| \right),$$

$\overline{\Delta I4B_{p^*,q^*,r^*,s^*}}(x,y)$  — середнє значення,  $\sigma$  — середньоквадратичне відхилення.

А потім перетворюємо значення (10) в спектральні яскравості шляхом округлення до найближчого цілого.

Для оцінки результату застосування індексу виявлення змін за чотирма каналами (10) в порівнянні з індексом виявлення змін за двома каналами (6) необхідно обчислити різницю

$$diff_{4,2} = \Delta I4B_{p^*,q^*,r^*,s^*}(x,y)_n - \Delta I2B_{p^*,q^*}(x,y)_n. \quad (11)$$

Спектральні яскравості (10) ілюструють наявність змін адаптивного індексу, їх значення і напрямки та можуть бути використані для подальшої інтерпретації змін. Аналіз результатів застосування індексу виявлення відносних змін за чотирма каналами наведено далі.

#### 4. Результати дослідження

Для адаптивного індексу виявлення відносних змін довкілля за одним каналом для знімків Sentinel-2 за серпень 2015 та 2019 років було визначено канал = 8 (0.842 nm). Індекс відображає тенденцію змін на місцевості та може приймати додатні та від'ємні значення. Найбільш наглядно проявляються додатні значення при збільшенні площ рослинності та від'ємні — при зменшенні площ рослинності (див. Рис. 3).

Для адаптивного індексу виявлення відносних змін довкілля за двома каналами для знімків Sentinel-2 за серпень 2015 та 2019 років було визначено канали  $p^* = 8$ ,  $q^* = 12$  (0.842 nm, 2.190 nm). Індекс виявлення відносних змін за двома каналами (6) в порівнянні з індексом за одним каналом (3) має краще просторове розрізнення, зберігаючи, в загальному, тенденцію змін на місцевості (див. Рис. 4).

Результати застосування індексу виявлення змін за двома каналами (6) в порівнянні з індексом виявлення змін довкілля за одним каналом (3), визначені за формулою (7) наведено на Рис. 5. Можна вважати, що індекс виявлення змін (6) дає більш обґрунтовану картину змін, тому що аналізуються два канали.

Для адаптивного індексу виявлення відносних змін довкілля за чотирма каналами для знімків Sentinel-2 за серпень 2015 та 2019 років було визначено канали  $p^* = 8$ ,  $q^* = 12$ ,  $r^* = 7$  і  $s^* = 8$  (0.842 nm, 2.190 nm, 0.783 nm і 0.842 nm). Цікаво, що

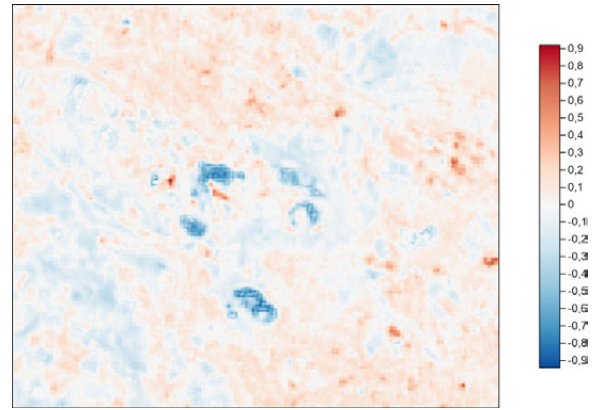


Рис. 5. Результат попіксельного віднімання від індексу виявлення відносних змін довкілля за двома каналами, визначеного за формулою (6) індексу виявлення відносних змін довкілля за одним каналом, визначеного за формулою (3).

канал 8 було визначено для чисельника і знаменника індексу. Результати виявлення відносних змін довкілля за чотирма каналами (Рис. 6), визначені за формулою (10), за картинками досить близькі до результатів за двома каналами, тому необхідно їх порівняти.

Результати порівняння застосування індексу виявлення змін за чотирма каналами (10) в порівнянні з індексом вияв-

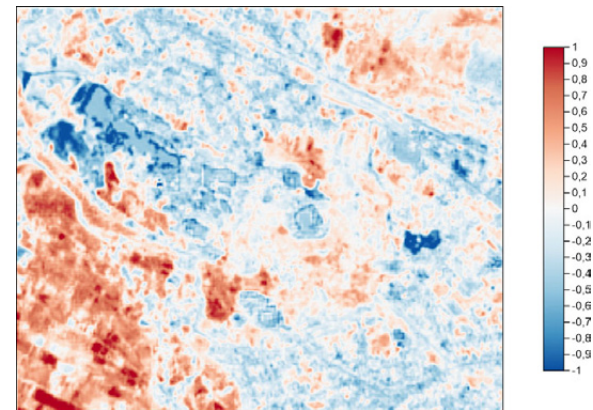
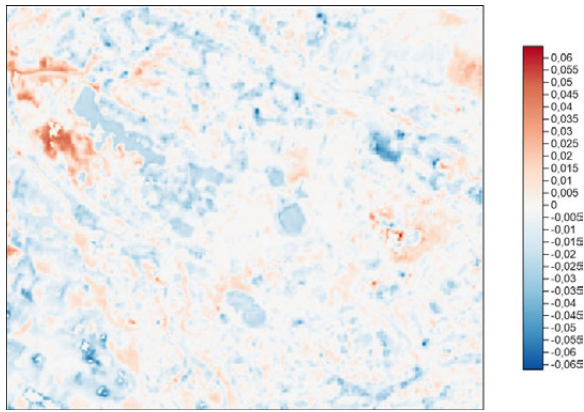


Рис. 6. Індекс виявлення відносних змін довкілля за чотирма каналами  $p^* = 8$ ,  $q^* = 12$ ,  $r^* = 7$  і  $s^* = 8$ , визначений по формулі (10), за двома зніманнями Sentinel-2 2015 та 2019 років

лення змін за двома каналами (6), визначені за формулою (11) наведено на Рис. 7. Очевидно, що індекс виявлення змін (10) дає більш обґрунтовану картину змін, тому що аналізуються чотири канали.

#### 5. Висновки

Адаптивні методи виявлення змін еколого-геологічної обстановки використовують два, рознесених в часі, космічні знімки однієї території поверхні Землі. В цих методах визначається індекс змін, який може мати додатні і від'ємні значення, тобто визначити напрямки змін. Застосування адаптивних методів виявлення змін довкілля за допомогою мультиспектральних космічних знімків Землі на території Солотвино дозволило виділяти в межах території ділянки змін, викликаних різними процесами.



**Рис. 7.** Результат попіксельного віднімання від індексу виявлення відносних змін довкілля за чотирма каналами, визначеного за формулою (10) індексу за двома каналами, визначеного за формулою (6)

Результати показали цікаві закономірності щодо вибору оптимальних каналів Sentinel-2 в розглянутих адаптивних індексах. Так 8-й канал (0.842 nm, NIR — ближній інфрачервоний) присутній у трьох індексах: з одним, двома і чотирма каналами; 12-й канал (2.190 nm, SWIR — короткохвильовий інфрачервоний) — у індексах з двома і чотирма каналами; і 7-й канал (0.783 nm, вегетаційний червоний край) у індексі з чотирма каналами. Ці закономірності потребують подальшого дослідження. Від’ємні значення адаптивних індексів на Рис. 3, 4 і 6 відповідають ділянкам з найбільш динамічними змінами довкілля таких екзогенних процесів як карстові воронки та озера.

Для продовження досліджень території смт Солотвино шляхом виявлення відносних змін за різночасовими мульти-спектральними космічними знімками Землі доцільно було б для конкретизації цих змін спробувати розрізнити техногенну та природну складові та встановити фактори, які впливають на адаптивні спектральні індекси (пігменти, біохімія, клітинна структура та вміст води листя рослин, а також погодні умови, антропогенна діяльність і стихійні лиха).

## Література

- Гиенко Г. А., Гиенко А. Я. Картографирование изменений местности с использованием разновременных материалов космической съемки, 2013. <https://cyberleninka.ru/article/v/kartografirovaniye-izmeneniy-mestnosti-s-ispolzovaniem-raznovremennykh-materialov-kosmicheskoy-semki>.
- Готинян В. С., Томченко О. В., Рябенко Ю. М., Добридень Л. Д. Оцінка тенденцій прояву небезпечних природних процесів (на прикладі південної частини Тячівського району Закарпатської області). Матеріали регіональної наради: Можливості супутникових технологій у сприянні вирішенні проблем Закарпаття. Ужгород, 11 грудня, 2008. С. 27–28.
- Станкевич С. А., Пестова И. А. Картирование изменений растительного покрова Киевской агломерации на основе долговременных временных рядов многоспектральных космических снимков Landsat. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 2. С. 187–196.
- Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Архипов А. И., Порошкевич А. Ю., Станкевич С. А., Суханов К. Ю., Титаренко О. В. Прогнозирование и поиск месторождений нефти и газа на основе спектрофотометрирования растительного покрова. *Геоинформатика*. 2010. № 3. С. 44–47.

- Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс. 2004. 928 с.
- Шапар А. Г., Тараненко О. С. Визначення техногенних та природних змін на порушених гірничими роботами землях за даними ДЗЗ. *Екологічна безпека*. 2018, № 2 (26). С. 64–69. <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.2.64-69>.
- Шехунова С. Б., Алексеевкова М. В., Стадніченко С. М., Сюмар Н. П. Интегральная геологическая модель Солотвинской структуры как инструмент оценки геоэкологического статуса Солотвинского родовища кам'яної солі. *Збірник наукових праць інституту геологічних наук НАН України*. 2015. № 8. С. 233–252. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146791>.
- Шехунова С. Б., Алексеевкова М. В., Стадніченко С. М. Закономірності розвитку природних та природно-техногенних небезпечних геологічних процесів на території містечка Солотвино (Закарпаття, Україна). *Збірник наукових праць інституту геологічних наук НАН України*. 2019. № 12. С. 70–83. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185745>.
- Barnea D. I., Silverman H. F. A class of algorithms for fast digital registration. *IEEE Transactions on Computer*. Vol. 21. 1972. 179–186.
- Brown L.G. A survey of image registration techniques. *ACM Computing Surveys*. 1992. 24 (4) 325–376.
- Castro, E. Morandi C. Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1987. Vol. 9. No. 5. P. 700–703.
- Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E. Change detection techniques. *Intern. Journ. of Remote Sensing*, 2004. Vol. 25. No. 12, P. 2365–2401.
- MultiSpectral Instrument (MSI) SENTINEL-2 Overview. 2020. Retrieved from: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>.
- Process and analyze all types of imagery and data. (2020). Retrieved from: [www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI](http://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI).
- Radke R. J., Andra S., Al-Kofahi O., Roysam B. Image change detection algorithms: a systematic survey. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005. Vol. 14. No. 3, P. 294–307.
- Stoeckl L, Banks V, Shekhunova S, Yakovlev Y. The hydrogeological situation after salt-mine collapses at Solotvyno, Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. Vol. 30. Article 100701. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100701>.
- Tomchenko O., Zhyrnov P., Pidlisetska I., Mykolaenko O. 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. 12–15 November, 2019, Kiev, Ukraine. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903269>.

## References

- Barnea, D. I., Silverman, H. F. (1972). A class of algorithms for fast digital registration. *IEEE Transactions on Computer*, 21, 179–186.
- Brown L.G. (1992). A survey of image registration techniques. *ACM Computing Surveys*, 24 (4) , 325–376.
- Castro, E. Morandi, C. (1987). Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9 (5), 700–703.
- Fedorovsky, O. D., Yakymchuk, V. G., Arkhipov, A. I., Porushkevych, A. Yu., Stankevych, S. A., Sukhanov, K. Yu., Titarenko, O. V. (2010). Forecasting and searching for oil and gas deposits based on vegetation spectrophotometry. *Geoinformatics*, 3, 44–47. (in Ukrainian).
- Forsyth, D. A., Ponce, J. (2004). *Computer Vision: A Modern Approach*. Prentice Hall.
- Gienco, G. A., Gienco, A. Y. (2013). Mapping spatial changes using multi-temporal satellite images. <https://cyberleninka.ru/article/v/kartografirovaniye-izmeneniy-mestnosti-s-ispolzovaniem-raznovremennykh-materialov-kosmicheskoy-semki>. (in Russian).

- Gotinyan, V. S., Tomchenko, O. V., Ryabenko, Y. M., Dobridnik, L. D. (2008, December). Estimation of tendencies of manifestation of dangerous natural processes (on the example of the southern part of Tyachiv district of Zakarpattia region). *Proceedings of the regional meeting: Opportunities for satellite technologies to help solve the problems of Transcarpathia. Uzhhorod*, 27–28. (in Ukrainian).
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., Moran, E. (2004). Change detection techniques. *Intern. Journ. of Remote Sensing*, 25 (12), 2365–2401.
- MultiSpectral Instrument (MSI) SENTINEL-2 Overview. (2020). Retrieved from: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>.
- Process and analyze all types of imagery and data. (2020). Retrieved from: [www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI](http://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI).
- Radke, R. J., Andra, S., Al-Kofahi, O., Roysam, B. (2005). Image change detection algorithms: a systematic survey. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14 (3), 294–307.
- 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. <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.2.64-69>. (in Ukrainian).
- Shekhunova, S. B., Alekseyenkova, M. V., Stadnichenko, S. M., Siumar, N. P. (2015). The integrated geological model of Solotvino structure as a tool to assess geoeological sustainability of Solotvynorocksalt deposit. *Collection of Scientific Works of the Institute of geological Sciences NAS of Ukraine*, 8, 233–250. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146791>. (in Ukrainian).
- Shekhunova, S. B., Alekseyenkova, 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 NAS of Ukraine*, 12, 70–83. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185745>.
- Stankevich, S. A., Piestova, I. A. (2014). Vegetation cover changes mapping within Kiev metropolis agglomeration using long-term time series of Landsat multispectral satellite imagery. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 11 (2), 187–196. (in Russian).
- Stoeckl L, Banks V, Shekhunova S, Yakovlev Y. (2020). The hydrogeological situation after salt-mine collapses at Solotvino, Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 30, Article 100701. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100701>.
- Tomchenko, O., Zhyrnov, P., Pidlisetska, I., Mykolaenko, O. (2019, November). Remote assessment of earth's surface deformation dynamics above Solotvino salt mine. 13th International Scientific Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. Kiev. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903269>.

#### АДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ЗЕМЛИ НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ СОЛОТВИНО

В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов, О. В. Томченко

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины”, ул. О. Гончара 55 Б, Киев 01054, Украина

Описаны методы выявления изменений окружающей среды с помощью двух разновременных мультиспектральных космических снимков Земли, который может быть использован для оценки изменений эколого-геологической обстановки и контроля динамики процессов в реальном масштабе времени, с целью предупреждения чрезвычайной экологической ситуации. Создание и функционирование системы постоянного геоэкологического мониторинга на основе космической информации предполагает выявление относительных изменений окружающей среды по двум мультиспектральным космическим снимкам Земли, полученными через определенный промежуток времени. Для этого необходимо разработать и применить адаптивные методы (индексы) выявления относительных изменений. Предлагаются три метода, которые адаптируются к конкретным космическим снимкам, для нахождения оптимального решения, максимизирующего относительные изменения по двум разновременным мультиспектральным космическим снимкам Земли. При этом первый метод выбирает один оптимальный канал из всех каналов снимка, второй метод — два оптимальные каналы из всех каналов и третий — четыре оптимальные каналы из всех каналов. Известны методы, дающие оценку наличия или отсутствия изменений на двух разновременных изображениях, но они не дают информации о направлении изменений. Предлагаемые индексы могут принимать положительные и отрицательные значения, которые отражают тенденцию изменений на местности. Отрицательные значения индексов, полученные на территории возле пгт Солотвино Тячевского района Закарпатской области, соответствуют участкам с наиболее динамичными изменениями окружающей среды таких экзогенных процессов как карстовые воронки и озера, а положительные значения соответствуют увеличению площадей растительности. Результаты сравнения применения индексов выявления изменений на двух разновременных мультиспектральных космических снимках Земли по четырем, двум каналам и одному каналу показали, что увеличение числа каналов может дать более обобщенную картину изменений, но для конкретизации этих изменений необходимы материалы наземных наблюдений.

**Ключевые слова:** разновременные космические снимки, изменения окружающей среды, адаптивные методы

#### ADAPTIVE METHODS OF DETECTING ENVIRONMENTAL CHANGES USING MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES ON THE EARTH FOR EXAMPLE TERRITORY SOLOTVYNO

V. G. Yakimchuk, K. Yu. Sukhanov, O. V. Tomchenko

Scientific Center for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geology Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 55 B O. Gonchar st., Kyiv 01054, Ukraine

The methods for detecting environmental changes using two multispectral multispectral space images of the Earth, which can be used to assess changes in the ecological and geological environment to control the dynamics of processes in real time, in order to prevent environmental emergencies. The creation and operation of a system of continuous geoeological monitoring based on space information involves the detection of relative changes in the environment on two multispectral space images of the Earth, obtained after a certain period of time. To do this, it is necessary to develop and apply adaptive methods (indices) for detecting relative changes. Three methods are proposed that are adapted to specific images to find the optimal solution that maximizes the relative changes in two different time multispectral space images of the Earth. The first method selects one optimal channel from all channels of the space image, the second method — two optimal channels from all channels and the third — four optimal channels from all channels. There are known methods that assess the presence or absence of changes in two space images at different times, but they do not provide information about the direction of changes. The proposed indices can take positive and negative values, reflecting the trend of changes on the ground. The negative values of the indices obtained in the area near the village of Solotvino, Tyachiv district, Zakarpat region, correspond to the areas with the most dynamic changes in the environment of such exogenous processes as karst funnels and lakes, and positive values correspond to increasing vegetation areas. The results of comparing the application of the change detection index on two different multispectral space images of the Earth on four, two channels and one channel showed that increasing the number of channels can give a more reasonable picture of changes, but to interpret these changes requires ground-based observations.

**Keywords:** multitemporal satellite images, environmental changes, adaptive methods

*Рукопис статті отримано 20.10.2020*