

УДК 504.064.3; 621.22: 532.537; 528.8

А.М. ЛАГОДНЮК, В.М. КОРБУТЯК, Д.В. СТЕФАНИШИН

ІДЕНТИФІКАЦІЯ КОЕФІЦІЄНТА ШОРСТКОСТІ РІЧКОВИХ ЗАПЛАВ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ ПІДТРИМКИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НЕУСТАЛЕНОГО РУХУ ВОДИ ПРИ ПОВЕНЯХ

***Анотація.** Розглядається задача ідентифікації коефіцієнта шорсткості річкових заплав за даними дистанційного зондування для підтримки математичного моделювання неусталеного руху води, що виникає при природних та штучних паводках, з метою кількісної оцінки повеневої небезпеки та пов'язаного з нею ризику. Проаналізовано основні алгоритми контрольованої і неконтрольованої класифікації геопросторових даних для розв'язання задач структурної ідентифікації рослинного покриву території річкових заплав.*

***Ключові слова:** вегетаційний індекс, дистанційне зондування, геопросторові дані, ідентифікація, коефіцієнт шорсткості заплави, контрольована і неконтрольована класифікація, повені.*

Вступ

Одним з ключових факторів ризику, що стримує та обмежує господарську діяльність на прирічкових територіях, є повені. За кількістю жертв і постраждалих, економічними збитками тощо вони поступаються лише катастрофічним землетрусам [1–3].

Поняття повені як стихійного лиха так чи інакше пов'язане з людиною та її діяльністю. Повені на ріках відбуваються тоді, коли при природних паводках та водопіллях, штучних попусках гідроелектростанцій (ГЕС), проривах напірних гідроспоруд тощо затоплюються території, на яких проживає людина або які використовуються людиною.

За деякими оцінками [4] площа земель в Україні, на яких регулярно проявляються катастрофічні наслідки лише від повеней гідрометеорологічного походження, становить майже 165 тис. км² (це більше 27% всієї території), де проживає близько третини всього населення країни. Найбільшої шкоди від таких повеней в Україні зазнають гірські та передгірські райони Карпат (Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська, Чернівецька області), деякі райони Поділля (Тернопільська, Хмельницька та Вінницька області), Полісся (Волинська, Рівненська області), придунайські та придніпровські території, а також Донбас. Існує і потенційна небезпека виникнення штучних повеней в країні внаслідок аварій на напірних гідроспорудах гідровузлів – об'єктах критичної інфраструктури [5]. Наразі в Україні нараховується 1153 гідровузли, напірні гідроспоруди яких створюють водосховища об'ємом 1 млн м³ і більше, які, згідно з п. 13 «Методики ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів» [6], відносяться до потенційно небезпечних об'єктів. З них 93 гідровузли мають водосховища об'ємом від 10,1 до 100 млн м³, а 14 – водосховища об'ємом більше 100 млн м³ (табл. 1) [7, 8].

Таблиця 1 – Найбільші гідровузли України
(F – площа водного дзеркала, W – об’єм, h_{\max} – максимальна висота греблі, НПР – нормальний підпірний рівень)

№ з/п	Гідровузол	Розташування (область)	Ріка	F при НПР, км ²	W при НПР, млн. м ³	h_{\max} греблі, м
1	Каховський	Херсонська	Дніпро	2155,0	18200,0	30,0
2	Кременчуцький	Кіровоградська	Дніпро	2250,0	13520,0	29,5
3	Київський	Київська	Дніпро	922,0	3730,0	22,0
4	Дніпровський	Запорізька	Дніпро	410,0	3300,0	62,0
5	Канівський	Черкаська	Дніпро	675,0	2500,0	25,0
6	Дніпродзержинський	Дніпропетровська	Дніпро	567,0	2460,0	28,0
7	Дністровський	Чернівецька	Дністер	142,0	3000,0	60,0
8	Червонооскільський	Харківська	Оскіл	122,0	477,0	20,0
9	Краснопавлівський	Харківська	Попільня	35,0	410,0	37,0
10	Печенізький	Харківська	Сіверський Донець	86,2	383,0	22,0
11	Карачунівський	Дніпропетровська	Інгuleць	44,8	308,5	22,5
12	Ладижинський	Вінницька	Південний Буг	22,3	148,1	18,0
13	Водосховище Хмельницької АЕС	Хмельницька	Гнилий Ріг	20,0	120,0	13,0
14	Олександрівський	Миколаївська	Південний Буг	12,0	114,0	25,0

Основи математичного моделювання неусталеного руху води

Задачі математичного моделювання неусталеного руху води, що виникає при паводках, попусках ГЕС, гідродинамічних аваріях, розв’язувалися досить давно [9]. З появою сучасної обчислювальної техніки й розвитком чисельних методів розв’язання диференціальних рівнянь з’явилися і відповідні комп’ютерні програми. Чисельні алгоритми, що використовуються при цьому, перевіряються на модельних прикладах з верифікацією отриманих чисельних розв’язків на задачах, для яких існують аналітичні розв’язки, при зіставленні з даними експериментальних досліджень в гідравлічних лабораторіях та з натурними даними.

Нестационарний (неусталений) рух води у відкритих руслах описується системою рівнянь Сен-Венана [9–12]. У більшості практичних випадків параметри хвиль неусталеного руху води у відкритому руслі (глибина, швидкість водного потоку, час переміщення фронту хвилі, які далі використовуються при оцінці ймовірних збитків, втрат та слугують вихідною інформацією для розробки заходів щодо захисту господарських об’єктів, сповіщення та евакуації населення тощо [9]) розраховуються на основі одновимірної моделі, для якої система рівнянь Сен-Венана може мати наступний вигляд [9]:

рівняння динамічної рівноваги:

$$\frac{\partial(V \cdot \Omega)}{\partial t} + \frac{\partial(V^2 \cdot \Omega)}{\partial s} = -g \cdot \Omega \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left(v \cdot \Omega \frac{\partial V}{\partial s} \right) - \frac{g \cdot \Omega}{C^2 \cdot R} V \cdot |V|, \quad (1)$$

рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial(V \cdot \Omega)}{\partial s} = q, \quad (2)$$

де t – час; s – координата вздовж напрямку течії; V – осереднена по перерізу повздовжня компонента швидкості потоку; $\Omega = \Omega(H)$ – площа живого перерізу; H – відмітка вільної поверхні води; v – коефіцієнт в'язкості; C – коефіцієнт Шезі, яким характеризують гідравлічний опір водному потоку; $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}$ – прискорення вільного падіння; q – питомий притік води на одиницю довжини русла; врахування місцевих втрат енергії при різкій зміні геометричних параметрів русла зазвичай здійснюється введенням в рівняння (1) додаткових складових, які визначають імпульсну дію на потік з боку перешкод, що обтікаються водним потоком.

Розрахунки на основі двовимірної (планової) моделі водного потоку використовуються менше, оскільки вони вимагають значно більшого об'єму різного роду геопросторових даних, які не завжди можуть бути в наявності і достатньої точності. Зокрема, це стосується коефіцієнта Шезі C , який є одним з найважливіших параметрів математичної моделі руху води і від якого залежить пропускна здатність русла. Зазвичай його визначають за формулою:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}, \quad (3)$$

де n – безрозмірний коефіцієнт шорсткості (коефіцієнт Гоклера-Манінга); R – гідравлічний радіус, який для широкого русла замінюють глибиною h .

Загальна постановка задачі досліджень

Визначення об'єктивних значень коефіцієнта шорсткості n , що входить в рівняння динамічної рівноваги (1) і який є емпірично розрахунковим коефіцієнтом, що залежить від багатьох факторів, в тому числі і від особливостей поверхні русла, його звивистості, характеру рослинності в руслі і на заплаві тощо, може викликати значні труднощі. Зазвичай, при призначенні n використовують довідкові таблиці [13, 14], де він визначається в залежності від складу ґрунтів ложа і берегів русла, характеру рослинності в руслі і на заплаві, наявності руслових та інших перешкод тощо. Коли натурні дослідження русел неможливі, найкращим методом для визначення коефіцієнта n є використання фотографій річкових русел і, зокрема, у випадку протяжних ділянок річкових долин, які мають досліджуватися при моделюванні хвиль поширення природних та штучних паводків, – дані дистанційного зондування Землі

(спутникові та аерофотознімки). Відповідно, серед задач, пов'язаних зі встановленням коефіцієнта шорсткості n , постає задача ідентифікації структури рослинного покриву території заплави, що може динамічно змінюватися, в тому числі і протягом року, яку пропонується вирішувати за даними дистанційного зондування.

Основи ідентифікації структури рослинного покриву території за даними дистанційного зондування

З метою картографування та ідентифікації типів рослинності за даними дистанційного зондування вдаються до створення так званих «індексних» зображень [15–18]. Відповідні спектральні індекси, які використовуються для вивчення та оцінки стану рослинності, отримали загальноприйняту назву вегетаційних індексів. Останні підбираються експериментально (емпіричним шляхом), виходячи з відомих особливостей кривих спектральної відбивної здатності рослинності і ґрунтів. Зокрема, одним з найпоширеніших при дистанційній характеристиці рослинного покриву є індекс *NDVI*.

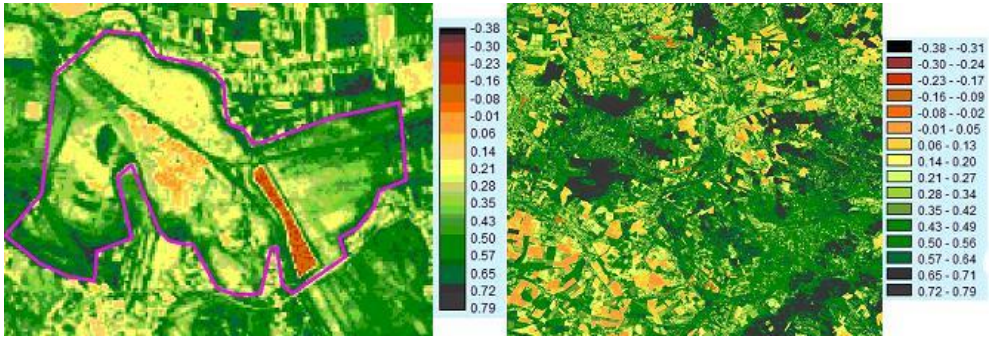
Веgetаційний індекс *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index, нормалізований відносний індекс рослинності) – досить простий кількісний показник кількості фотосинтетичної активної біомаси. Використовується для вирішення задач, метою яких є кількісна оцінка структури та стану рослинного покриву. Визначають цей індекс за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (4)$$

де *NIR* – відображення в ближній інфрачервоній, *RED* – в червоній областях спектра, які можуть змінюватися в залежності від стану рослинності та кількості біомаси.

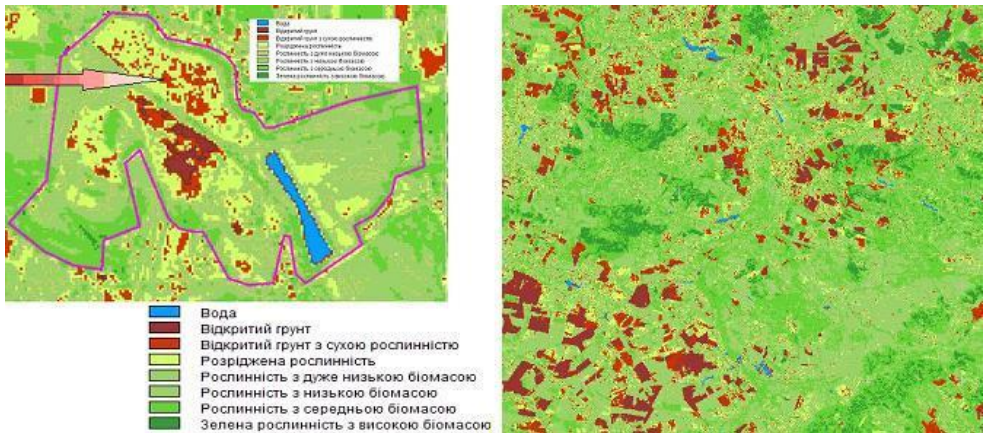
Розрахунок *NDVI* базується на двох найбільш стабільних (незалежних від інших факторів) ділянках спектральної кривої відбиття судинних рослин. У червоній області спектра (0,6–0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин, а в інфрачервоній області (0,7–1,0 мкм) знаходиться область максимального відображення клітинних структур листка рослини (рис. 1а). Відношення цих показників один до одного дозволяє чітко відокремлювати й аналізувати рослинні угруповання від інших природних об'єктів. Використання нормалізованої різниці між мінімумом і максимумом відображень збільшує точність виміру, дозволяє зменшити вплив таких явищ, як розходження в освітленості знімка, хмарності, димки, поглинання радіації атмосферою й ін.

На рис. 1 наведено результати застосування *NDVI* при визначенні стану та видів рослинності на ділянках повторно-заболочених гідроморфних ґрунтів заплави. Використовувались знімки середньої роздільної здатності LANDSAT за травень місяць за декілька років та польові дослідження для верифікації рослинності та умов її росту. Комбінації каналів камер супутників були наступними: TM Landsat (5) – 3 (0,63–0,69 мкм), 4 (0,76–0,90 мкм).



а) карта розподілу індексу *NDVI* на тестовій ділянці

б) розподіл *NDVI* на досліджуваній території



в) виділення поверхні відкритого ґрунту із сухим очеретом на тестовій ділянці

г) класифікація рослинності за значеннями *NDVI* за біомасою

Рис. 1 – Використання індексу *NDVI* при ідентифікації структури рослинного покриву території річкової заплави

Для кількісної оцінки індексу *NDVI* використовувалась стандартизована безперервна градієнтна шкала, що відображає його значення в діапазоні від -1 до 1 . Завдяки особливості відображення в *NIR - RED* областях спектра, природні об'єкти, які не пов'язані з рослинністю, мають фіксоване (постійне, незмінне) значення *NDVI*, що дозволяє використовувати цей параметр і для їхньої ідентифікації. Класи за індексом вегетації показано на рис. 1б. Це зображення можна використати для картографування рослинного покриву, виявлення площ покритих і не покритих рослинністю, оцінки стану рослинного покриву, його продуктивності та біомаси і, відповідно, – для оцінки коефіцієнта шорсткості поверхні.

Класифікація рослинності на досліджуваній території за індексом *NDVI* здійснювалась за наступними критеріями: 1) стан рослинності (табл. 2); 2) кількість біомаси (табл. 3). Результати класифікації наведено на рис. 1г. Зокрема, аналіз зображень за індексом *NDVI* показав наявність відкритого ґрунту з сухою рослинністю на території заболочених ділянок. Натурні тестові дослідження підтвердили, що це ділянки з сухим минулорічним очеретом (рис. 1в).

Таблиця 2 – Стан рослинності у відповідності зі значеннями вегетаційних індексів

Значення <i>NDVI</i>	Стан рослинності
< 0,00	Вода
0,00-0,20	Відкритий ґрунт
0,21-0,30	Розріджена рослинність
0,31-0,40	Дуже поганий
0,41-0,55	Задовільний
0,56-0,70	Хороший
0,71-1,00	Дуже хороший

Таблиця 3 – Класифікація значень *NDVI* за біомасою

Клас	Значення <i>NDVI</i>	Тип поверхні за кількістю біомаси
1	< 0,00	Вода
2	0,00-0,10	Відкритий ґрунт
3	0,11-0,20	Відкритий ґрунт з сухою рослинністю
4	0,21-0,30	Розріджена рослинність
5	0,31-0,40	Рослинність з дуже низькою біомасою
6	0,41-0,55	Рослинність з низькою біомасою
7	0,56-0,70	Рослинність з середньою біомасою
8	0,71-1,00	Рослинність з високою біомасою

За даними табл. 2 було проведено перекласифікацію зображення *NDVI* з виділенням двох класів: ділянки з рослинністю та ділянки, що не містять рослинність (відкритий ґрунт, вода, забудова) (рис. 1в). Дане зображення, так звана «маска ґрунту», в подальшому використовувалось для проведення класифікації поверхні за різними видами рослинності.

Для зменшення впливу різних факторів, що створюють перешкоди при визначенні *NDVI*, застосовують його модифікації різного виду. Наприклад, для зменшення впливу на ідентифікацію ефекту відбивання електромагнітних хвиль від ґрунтової поверхні можна використати індекс *PVI 2* (Perpendicular Vegetation Index 2).

На першому кроці для побудови зображення індексу *PVI 2* здійснюється виділення ділянок відкритого ґрунту (рис. 2а). Після їх ідентифікації встановлюється рівняння регресії для обчислення лінії ґрунту (рис. 2б) – рівняння, яке описує зв'язок між величинами відбивання в червоній та інфрачервоній смугах для пікселів, що зображують тільки ґрунт. Ця лінія визначається простою лінійною регресією між червоною та інфрачервоною смугами на вибірці ґрунтових пікселів. Після встановлення регресійного зв'язку всі невідомі пікселі, що мають таку ж залежність між смугами, відносяться до ґрунтових пікселів. Пікселі, які знаходяться далеко від лінії ґрунту в сторону інфрачервоного каналу, відносять до рослинності, а ті, що далеко в сторону червоного каналу – до водної поверхні. В цілому на зображенні *PVI 2* (рис. 3) можна побачити менше неперервних площинних ділянок з високим значенням індексу рослинності, ніж на зображенні індексу *NDVI* (рис. 1б).

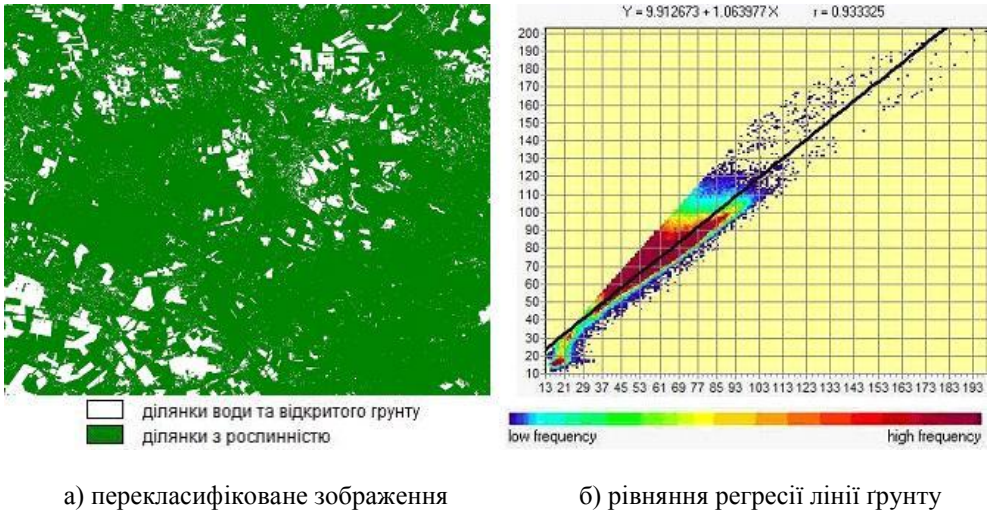


Рис. 2 – Виділення покритих рослинністю ділянок за допомогою індексу *PVI 2*

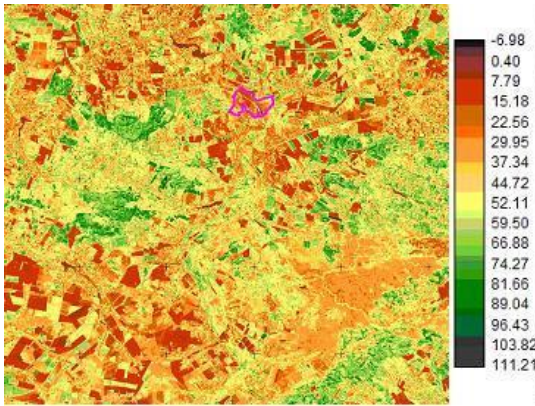


Рис. 3 – Розподіл індексу *PVI 2* на досліджуваній території

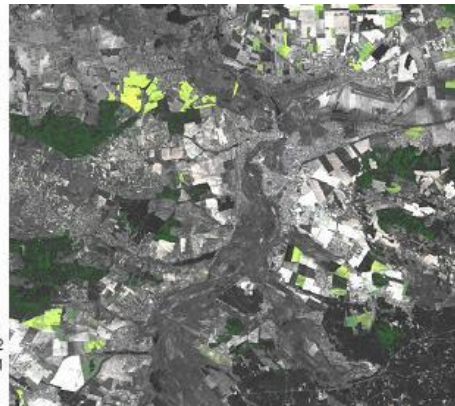


Рис. 4 – Синтезоване повнокольорове зображення каналів 3, 2, 1

Використання неконтрольованої та контрольованої класифікації

Задача класифікації зображень полягає в розбитті деякої групи об'єктів на окремі класи. При цьому, до одного й того ж класу відносяться об'єкти, що мають однакові загальні властивості (відбивальні характеристики), наприклад: ліс, сільськогосподарські угіддя, водні поверхні тощо. Більшість класифікацій зображень базуються на визначенні спектральних відповідей (сигнатур – описів ступеня відбиття енергії в різних областях спектра) класів земного покриття. Зображення розбивається на елементи, для кожного з яких визначають числові значення ознак. Задача класифікації полягає в розділенні простору ознак на локальні області, що відповідають одному класу об'єктів. Для підвищення достовірності збільшують кількість ознак, наприклад, збільшують кількість каналів при багатозональному зніманні, а також на додачу до

спектральних використовують додаткові ознаки – просторові чи часові, що підвищує надійність класифікації [15–18].

Для проведення машинної класифікації існують апробовані алгоритми, що реалізують різні класифікації: 1) неконтрольовану (без навчання); 2) контрольовану (з навчанням).

При відсутності апріорних даних про об'єкт змінання використовують алгоритми неконтрольованої класифікації, яка не вимагає додаткових натурних даних. Її методологічною основою є кластерний аналіз, що здійснюється автоматично. Нижче, на рис. 5–7, наведено результати розв'язання задачі неконтрольованої класифікації з використанням трьох алгоритмів: CLUSTER, ISOCLUST та ISODATA. Розглядався знімок LANDSAT. Знімання містить 7 каналів, для класифікації було використано 6, за виключенням теплового каналу. Фрагмент синтезованого повнокольорового зображення в природних кольорах показано на рис. 4.

Аналіз зображень показав, що модуль CLUSTER (рис. 5) об'єднав класи хвойного лісу, води та заболочені території без рослинності в один клас, тоді як модуль ISODATA чітко відокремив ці території (рис. 6).



Рис. 5 – Результат застосування модуля CLUSTER (14 класів)

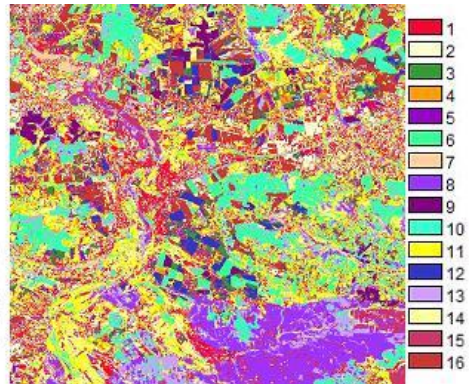
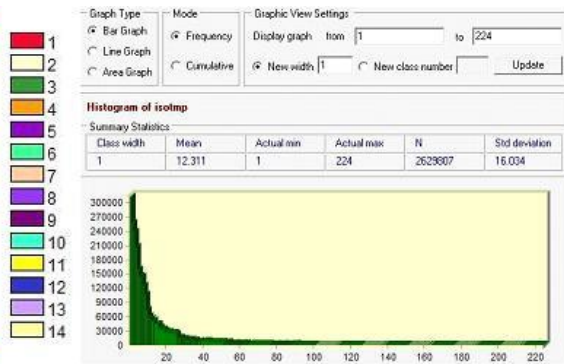


Рис. 6 – Результат застосування модуля ISODATA (16 класів)



а) результат застосування модуля ISOCLUST з виділенням 14 класів



б) гістограма класів за модулем ISOCLUST

Рис. 7 – Неконтрольована класифікація з використанням ISOCLUST

В цілому ISODATA чітко кластеризує відкритий ґрунт, воду, хвойний та листяний ліс, оброблювані ділянки сільськогосподарських угідь. Дослідження показали, що проблемними класами при застосуванні алгоритму ISODATA можуть бути канали осушувальної системи та населені пункти, оскільки в них присутні представники майже усіх класів. Застосування модуля ISOCLUST з різною кількістю класів показало, що вибір менше ніж 12 класів проводити не доцільно, оскільки це ускладнює класифікацію – помилково об'єднуються різні класи, наприклад вода та хвойний ліс. З метою отримання додаткової інформації про поверхні, що потребують ідентифікації, проводилося синтезування каналів. Інтерпретацію комбінацій каналів, що використовувались, та фрагменти зображень наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Інтерпретація комбінацій каналів для синтезу зображень

Канали RGB	Ідентифікована інформація	Фрагмент зображення
4, 3, 2	Вивчення стану рослинного покриву, дренажу, мозаїки агрокультур. Рослинність – відтінки червоного. Хвойні ліси – темно-червоні. Трав'яна або кущова рослинність – рожева. Забудова – зелено-голуба. Відкритий ґрунт – відтінки коричневого.	
3, 2, 1	Комбінація «природні кольори». Використовуються канали видимого діапазону, об'єкти земної поверхні виглядають так, як вони сприймаються людським оком. Рослинність – зеленою, прибрані поля – світлими, рослинність з низькою біомасою – коричневою і жовтою, дороги – сірими, берегові лінії – білявими.	
7, 5, 3	Чітко виділяється берегова лінія та підкреслюються водні об'єкти. Рослинність – відтінки темно- та світло-зеленого. Урбанізовані території – білі, зелено-голубі та малинові. Водні об'єкти – темно-сині, майже чорні. Ґрунти, пісок – різних кольорів.	
4, 5, 1	Здорова рослинність – відтінки червоного, коричневого, помаранчевого та зеленого. Ґрунти – зелені або коричневі кольори, вологі ґрунти – темні. Розріджена рослинність – яскраво-червоні відтінки. Чиста глибока вода – темно-синя (майже чорна). Мілководдя – світлі сині відтінки.	
5, 4, 3	Можливість аналізу сільськогосподарських угідь. Вивчення рослинного покриву. Сільськогосподарська рослинність – яскраво-зелені кольори. Ґрунти – рожево-бузкові кольори.	

Контрольована класифікація потребує значних машинних ресурсів, є більш трудомісткою, але дає більш точні результати. Навчання відбувається з використанням даних натурних досліджень, може відбуватися безпосередньо по зображенню, де необхідно виділити еталонні ділянки (набори пікселів, які представляють досліджуваний клас та служать його ідентифікатором). Разом з результатами натурних спостережень в якості вихідних даних для створення еталонних ділянок для контрольованої класифікації можуть також використовуватися результати неконтрольованої класифікації, а також результати синтезування каналів, з метою підкреслення певних ознак.

Порядок контрольованої класифікації може бути наступним.

1. Вибір еталонних ділянок. Це набори пікселів, які представляють досліджуваний клас та служать його ідентифікатором. Від якості еталонів залежить точність класифікації. При виборі еталонних пікселів бажано використовувати канал зі стійким контрастом – інфрачервоний, результати синтезування каналів (табл. 4), апріорні дані, серед джерел яких виділяються дані польових досліджень, дані аерофотознімання, топографічні карти, результати візуального дешифрування, а також результати кластерного аналізу.

В якості еталонних ділянок на заплавах пропонується обирати наступні класи: луки-сіножаті; вологі луки; заболочений ґрунт з сухою рослинністю; відкритий ґрунт; листяний ліс; хвойний ліс; відкриті водойми; відкритий ґрунт з сухою рослинністю; сільськогосподарські угіддя з низьким індексом *NDVI*; деградовані пасовища; населені пункти.

2. Створення файлів сигнатур для кожного класу: назва каналів, мінімальні, максимальні та середні значення в кожному каналі.

3. Оцінка сигнатур. Проводиться шляхом побудови скаттерограми та гістограм спектральних кривих. Скаттерограма відображає положення всіх пікселів у двох каналах, де відбиття одного каналу – на осі X , іншого – на осі Y . Частота пікселів у кожній точці (X, Y) положення відмічається відповідним кольором палітри у кількісному вигляді.

4. Вибір класифікатора. Можуть застосовуватися як жорсткі класифікатори, зокрема метод класифікації за мінімальною відстанню, метод паралелепіпеда, метод максимальної подібності, лінійний дискримінантний аналіз, або метод Фішера, а також більш гнучкі класифікатори, що ґрунтуються на методі максимальної подібності Байєса та теорії Демпстера-Шафера.

5. Оцінка точності класифікації. Оцінка точності класифікації являє собою оцінку точності співпадіння отриманих класів і класів на місцевості. Оскільки межі класів на місцевості, як правило, достовірно не відомі, оцінюють такий показник, як достовірність класифікації, який визначають як процент пікселів, що вірно віднесені до класів, заданих як еталони.

Оцінка коефіцієнта шорсткості

Результати класифікації надалі використовуються для кількісної оцінки середньозважених на розрахункових ділянках чисельної схеми математичної моделі неусталеного руху води значень коефіцієнта шорсткості в залежності від стану заплави (див. табл. 5) з врахуванням долі пікселів, які віднесені до кожного з класів зображень в масиві геопросторових даних.

Таблиця 5 – Значення коефіцієнта шорсткості для ділянок заплави

Тип поверхні та її опис		Мін	Норм	Макс
Луки, без кущів	Низькорослі трави	0,025	0,030	0,035
	Високорослі трави	0,030	0,035	0,050
Культивовані землі, угіддя	Без врожаю, рілля	0,020	0,030	0,040
	Зрілі просапні культури	0,025	0,035	0,045
	Зрілі польові культури	0,030	0,040	0,050
Кущова рослинність	Поодинокі кущі, важкі бур'яни	0,035	0,050	0,070
	Проріджені кущі, взимку	0,035	0,050	0,060
	Проріджені кущі, влітку	0,040	0,060	0,080
	Щільні зарослі кущів, взимку	0,045	0,070	0,110
	Щільні зарослі кущів, влітку	0,070	0,100	0,160
Лісові насадження	Густі прямі верби, влітку	0,110	0,150	0,200
	Вирубки, без проростань	0,030	0,040	0,050
	Вирубки, зі зростанням пагонів	0,050	0,060	0,080
	Деревостій, крона вище води	0,080	0,100	0,120
	Деревостій, вода сягає крони	0,100	0,120	0,160

Висновки

1. Викладено загальну концепцію використання неконтрольованої та контрольованої класифікації зображень для підготовки геопросторових даних, які необхідні для ідентифікації коефіцієнта шорсткості n річкової заплави з метою математичного моделювання неусталеного руху води по заплаві при повенях, викликаних паводками, попусками ГЕС, проривами гідроспоруд тощо. Показано, що поставлена задача вирішується шляхом застосування класифікації зображень за даними дистанційного зондування Землі на основі використання різного виду вегетаційних індексів.

2. Визначення коефіцієнта шорсткості n шляхом ідентифікації структури рослинного покриву території заплави, що може динамічно змінюватися, в тому числі і протягом року, за даними дистанційного зондування, відкриває нові можливості для складення як оперативних, так і довгострокових прогнозів повеневої небезпеки на основі математичного моделювання. При цьому таке моделювання може успішно проводитися і на ріках, на яких відсутні гідрометричні пости і не проводиться наземний моніторинг.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Авакян А.Б. Наводнення. Концепция защиты / А.Б. Авакян // Известия РАН. Серия географическая. – 2000. – № 5. – С. 40–46.
2. Лисиченко Г.В. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління / Г.В. Лисиченко, О.Л. Забулонов, Г.А. Хміль. – К.: Наукова думка, 2008. – 544 с.
3. Предупреждение и смягчение последствий природных катастроф // Бюллетень ВМО. – 2006. – Т. 55 (1). – 67 с.
4. Хлапук М.М. Обґрунтування напрямків наукового супроводу протипаводкових заходів для регіону Закарпаття / М.М. Хлапук, Л.А. Шинкарук, В.П. Чіпак, О.А. Кисіль // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 4(40). – Ч. 2. – Рівне. – 2007. – С. 183–189.

5. Стефанишин Д.В. Методологічні підходи до оцінки та врахування ризику в задачах забезпечення надійності і безпеки гребель / Д.В. Стефанишин, О.М. Трофимчук // Концепція захисту критичної інфраструктури: Стан, проблеми та перспективи її впровадження в Україні. Зб. Матеріалів міжнародної науково-практичної конференції. Національний інститут стратегічних досліджень. Серія «Національна безпека». Вип. 5. – К.: 2014. – С. 88–98.
6. Методика ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів / Затверджена наказом МНС України від 23.02.2006 р. за № 98. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України від 20.03.2006 р. за № 286/12160.
7. Водний фонд України: Штучні водойми – водосховища і ставки: Довідник / За ред. В.К. Хільчевського, В.В. Гребеня. – К.: Інтерпрес, 2014. – 164 с.
8. Паламарчук М.М. Водний фонд України / М.М. Паламарчук, Н.Б. Загорчевна // Довідковий посібник. – К.: Ніка-Центр, 2001. – 388 с.
9. Векслер А.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002. – 591 с.
10. Грушевский М.С. Волны попусков и паводков в реках. / М.С. Грушевский. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 340 с.
11. Грушевский М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. / М.С. Грушевский. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 288 с.
12. Семенчин Е.А. Анализ системы уравнений Сен-Венана аналитическими и численными методами / Е.А. Семенчин, Н.В. Вандина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2010. – № 64(64) – С. 34–47. – Режим доступа к статье: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sistemy-uravneniy-sen-venana-analiticheskimi-i-chislennymi-metodami>.
13. http://www.fsl.orst.edu/geowater/FX3/help/8_Hydraulic_Reference/Mannings_n_Tables.htm
14. Киселев П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
15. Красовський Г.Я. Космічний моніторинг безпеки водних екосистем із застосуванням геоінформаційних технологій / Г.Я. Красовський – К.: Інтертехнологія, 2008. – 480 с.
16. Moshynsky V. Identification of re-wetlands according to remote sensing data for greenhouse gases cadastre / O. Lahodniuk, A. Lahodniuk, V. Korbutiak, A. Kucherova // International conference «Kolkhety lowland water ecosystems – protections and efficiency». Conference workbook (Georgia, Tbilisi-Poti, 22-24 July. 2013). – Tbilisi, 2013. – 198 p.
17. Campbell J.B. Introduction to remote sensing / James B. Campbell. – 4th ed. – New York-London. The Guilford Press, 2007. – 626 p.
18. Лагоднюк А.М. Застосування вегетаційних індексів для дослідження трансформації ландшафтів Полісся / А.М. Лагоднюк, В.М. Корбутяк, Д.В. Стефанишин // V Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. Зб. наукових праць. Україна, Вінниця, 23-26 вересня, 2015 р. – Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД». 2015. – С. 139.

Стаття надійшла до редакції 07.04.2016