

С.В. Скакун

Інститут космічних досліджень НАНУ–НКАУ, Київ

ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ СЕРВІС МОНІТОРИНГУ ПАВОДКІВ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ



Наведено результати виконання науково-технічного проекту НАН України, пов'язані з наданням геоінформаційних сервісів моніторингу повеней за радіолокаційними супутниковими даними для території України та інших регіонів світу. Розроблені сервіси функціонують в операційному режимі та забезпечують автоматичне отримання, обробку супутникових даних та надання цифрових карт у стандартизованому вигляді через мережу Internet. За основу геоінформаційних сервісів взято інтелектуальні методи обробки даних, а саме нейронні мережі.

Ключові слова: інформаційні технології, обробка геопросторових даних, розподілена система, моніторинг надзвичайних ситуацій.

Зміни клімату зумовлюють збільшення числа надзвичайних ситуацій природного характеру. За даними міжнародних організацій найбільших збитків в усіх регіонах світу, зокрема і в Україні, щороку завдають повені [1]. Найбільш вірогідними джерелами інформації щодо раннього попередження, моніторингу розвитку та мінімізації можливих збитків є супутникові, особливо радіолокаційні дані. На базі Інституту космічних досліджень (ІКД) НАНУ–НКАУ створено регіональний центр підтримки програми ООН з використання супутникових даних для моніторингу стихійних лих UN-SPIDER, який надає геоінформаційні сервіси моніторингу повеней за супутниковими даними як для України, так і для інших регіонів світу. Впровадження автоматичного циклу отримання та обробки супутникових даних здійснювалося в контексті науково-технічного проекту НАНУ, який виконувався в 2009 р. Інститутом космічних досліджень НАНУ–НКАУ та Інститутом кібернетики НАНУ.

Дана стаття містить опис результатів проекту автоматизації обробки супутникових даних та надання геоінформаційного сервісу. Проект виконувався у тісній співпраці з міжнародними організаціями UN-SPIDER та NASA, які надавали доступ до супутникових даних при виникненні надзвичайних ситуацій.

ПРИНЦИПИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ

Радіолокатори бічного огляду є природною модифікацією імпульсних радіолокаційних станцій кругового огляду при їх розміщенні на літальному апараті. На відміну від радіолокаційних станцій кругового огляду антена радіолокатора бічного огляду нерухома щодо корпусу літального апарату, і розгортання радіолокаційного зображення поверхні Землі забезпечується його рухом. Радіолокаційне зображення ділянки поверхні Землі, що опромінюється, формується з амплітуди перевідбитих у зворотному напрямку зондувальних імпульсів радіолокаційних станцій і є модулем комплексного коефіцієнта зворотного розсію-

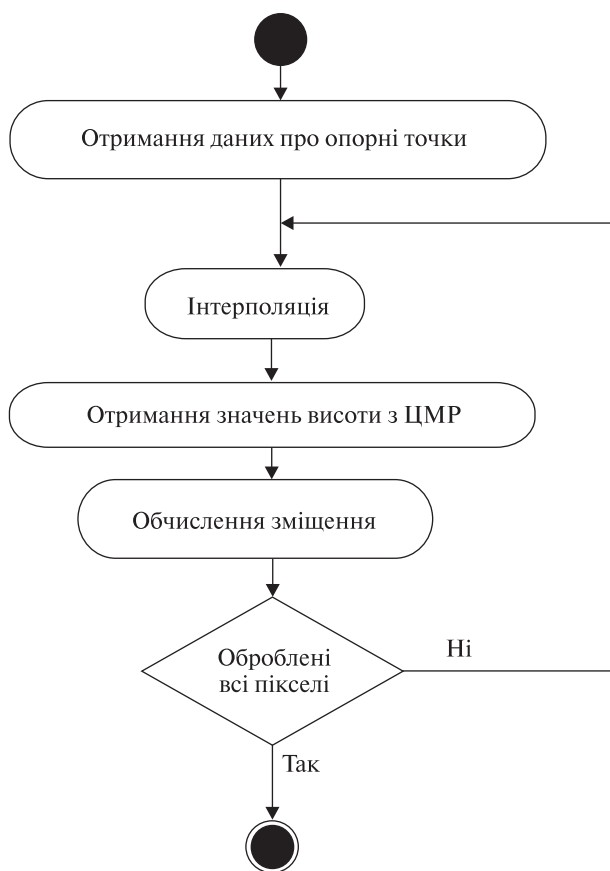


Рис. 1. Блок-схема алгоритму автоматичної орторектифікації (на мові UML)

вання поверхні Землі. Радіолокатор бічного огляду, що використовує метод синтезування апертури для формування зображення поверхні з високою розрізненістю, називається *радіолокатором із синтезованою апертурою* (РСА).

Дані РСА стають придатними до використання після їхнього перетворення у картографічну проекцію. Така корекція називається орторектифікацією або геометричною корекцією. Орторектифікація, або ортотрансформація (orthorectification, orthotransformation, orthofototransformation) — це усунення на зображенні геометричних спотворень, викликаних рельєфом [2]. На радіолокаційних зображеннях спотворення, обумовлені рельєфом, виявляються в зміні довжин схилів залежно від кута візування, що призводить до ефектів перспективного

скорочення. Крім того, значення коефіцієнта оберненого розсіювання для затінених областей подібне до значення для водних територій. Тому для ефективного використання даних РСА при розв'язанні прикладних задач (в тому числі картографування затоплень) необхідно розробити методи попередньої обробки даних, зокрема орторектифікації [3]. Геометричні ефекти, які виникають при зйомці РСА, можуть призводити до зсуву в сотні метрів, що, в свою чергу, дає неточну геоприв'язку. Тому важливим є включення інформаційних технологій орторектифікації до загального ланцюга обробки даних ENVISAT/ASAR. Ці методи детально розглянуті в наступних підрозділах.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧНОЇ ОРТОРЕКТИФІКАЦІЇ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ

Для орторектифікації даних РСА нами було використано цифрову модель рельєфу (ЦМР) SRTM DEM v4 з просторовим розрізненням 90 м. Перевага у використанні SRTM DEM полягає у глобальності: ці дані безкоштовно доступні для суші з широтою від -60 до $+60^\circ$.

Існують певні труднощі у застосуванні даних SRTM DEM при розв'язанні прикладних задач. Значення висот ЦМР дискретні і доступні тільки для певних значень широти і довготи. Тому виникає задача інтерполяції значень висот ЦМР. В загальному випадку задача знаходження значень деякої поверхні за набором точок (регулярним або нерегулярним) формулюється таким чином [4]: маючи набір точок (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, необхідно знайти функцію $z = f(x, y)$, яка обчислюватиме значення z для будь-яких інших значень (x, y) .

На сьогодні існують різні методи інтерполяції для розв'язання цієї задачі, в тому числі і в контексті обробки ЦМР [4, 5, 6, 7]. Для згладжування рельєфу (інтерполяції даних ЦМР) застосовувалася білінійна інтерполяція. У цьому випадку інтерполюючий поліном є лінійним не як функція двох змінних, а

за кожною змінною окремо, коли значення іншої змінної фіксоване.

Незважаючи на те, що збільшення порядку інтерполюючого поліному забезпечує підвищення точності, не виправдано зростає обчислювальна складність алгоритму. Тому інтерполяція поліномами більш високого порядку недоцільна.

Розглянемо підхід до автоматичної орторектифікації радіолокаційних зображень супутника ENVISAT з середнім просторовим розрізненням (150 м, режими WSM та IMM). Автоматизація запропонованого підходу можлива завдяки точній інформації про геоприв'язку зображення ASAR. Крім того, варто відзначити можливість розподіленої обробки зображення завдяки відповідній структурі зберігання даних ASAR [8]. Якщо для території, яку покриває радіолокаційне зображення, існує ЦМР, можна застосувати процедуру орторектифікації, що дасть можливість частково компенсувати наявність топографічних спотворень [9, 10, 11]. Зазвичай процедура орторектифікації PCA зображень складається з таких дій:

- ✦ на основі наявної ЦМР та інформації про орбіту супутника моделюється радіолокаційне зображення;
- ✦ реальне та змодельоване PCA зображення кореєструються (вручну або автоматично);
- ✦ для кожного пікселя реального зображення знаходиться топографічна висота з ЦМР;
- ✦ на основі ЦМР та змодельованого зображення кожен піксель реального зображення корегується, тобто компенсується значення різниці Δr .

Завдяки наявності точних опорних точок (GCP — *Ground Control Points*) всередині файлу-зображення ASAR стає можливим автоматизувати орторектифікацію, причому не моделюючи нове зображення.

Загальна блок-схема алгоритму наведена на рис. 1.

Крім компенсації зміщення в межах процедури орторектифікації створюються карта затінення та карта, яка відображає ефекти перекриття [12]. Ці регіони обумовлені не фізичними харак-

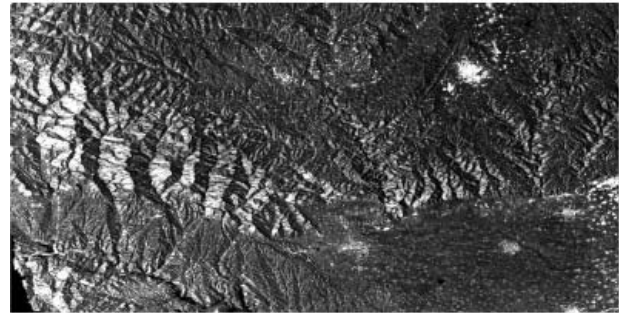
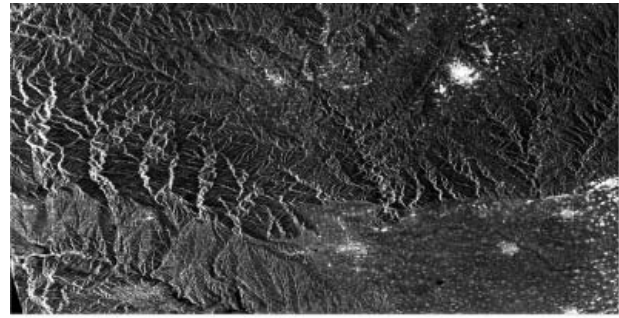


Рис. 2. Результати орторектифікації радіолокаційних зображень ENVISAT

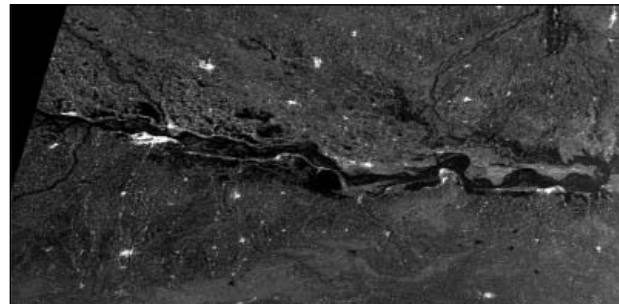


Рис. 3. Зображення ENVISAT/ASAR під час повені на р. Коші. Дата зйомки: 20.08.2008. (© ESA, 2008)

теристиками місцевості, а лише особливостями радіолокаційної зйомки. Тому ці регіони зображення необхідно вилучити з подальшого розгляду при розв'язанні прикладних задач.

Приклади результатів застосування процедури орторектифікації до радіолокаційних зображень наведено на рис. 2.

ОПИС СУПУТНИКОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ДАНИХ

Для моніторингу паводків використовуються радіолокаційні дані трьох різних PCA приладів, які встановлено на таких супутниках:

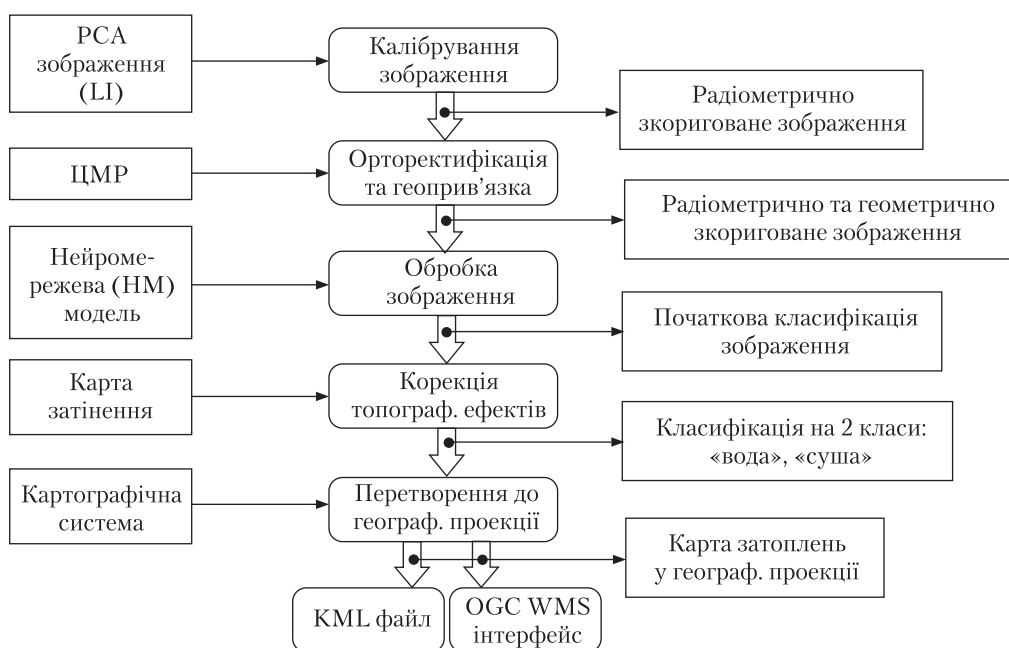


Рис. 4. Алгоритм картографування затоплень на основі радіолокаційних зображень

- ✦ ERS-2 SAR з просторовим розрізненням 8 м;
- ✦ ENVISAT ASAR WSM (Advanced SAR Wide Swath Mode) з просторовим розрізненням 150 м;
- ✦ RADARSAT-1 та RADARSAT-2 з просторовим розрізненням 25 та 3 м відповідно.

Ці дані були використані для визначення затоплених територій під час повеней на річках: Тиса (Україна та Угорщина), 2001 р.; Хуанхе (Китай, 2007 р.); Меконг (Таїланд та Лаос), 2008 р.; Коші (Індія та Непал), 2008 р. (рис. 3); Замбезі (Намібія), 2009 р. та оцінки вологозапасів снігу на території України в 2010 р.

Таблиця 1

Розподіл пікселів для даних супутників ERS-2, ENVISAT та RADARSAT-1

Супутник/регіон	Кількість пікселів по класах		
	«Суша»	«Вода»	Всього
ERS-2/Україна	148182	153096	301278
ENVISAT/Китай	60575	34493	95068
RADARSAT-1/ Китай	135263	130244	265507

Дані з європейських супутників були надані ЄКА в межах гранту ESA Category-1 «Wide Area Grid Testbed for Flood Monitoring using Spaceborne SAR and Optical Data». Причому дані супутника ENVISAT ASAR в режимі WSM отримали з архівів ЄКА в оперативному режимі — затримка в отриманні даних складає 2–4 год після зйомки. Дані RADARSAT-1/2 надано іноземними партнерами в межах міжнародного співробітництва.

Для кожного PCA-приладу будується своя нейронна мережа. Для навчання нейронної мережі вибрано пікселі, які відповідають як територіям з водою (умовно позначимо через клас «Вода»), так і без води (клас «Суша»). Розподіл таких пікселів наведений в табл. 1. Для кожного зображення ці дані були випадковим чином розбиті на дві вибірки: навчальну (становить 75 % від загальної кількості) та тестову (становить 25 %). Дані з навчальної вибірки використовувалися для навчання нейронної мережі, тобто налаштування вагових коефіцієнтів. Дані з тестової вибірки використовувалися для перевірки узагальненої здатності нейронних мереж,

тобто можливості нейронної мережі адекватно працювати на незалежних даних [13].

АВТОМАТИЧНЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ПОВЕНЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

Процес визначення затоплених повенями територій [14, 15, 16, 17] складається з попередньої тематичної обробки, яка полягає у сегментації і класифікації зображення з використанням нейронних мереж Кохонена (рис. 4).

1. Калібрування зображення. Для калібрування радіолокаційних зображень ENVISAT/ASAR використовується стандартна процедура, описана в роботі [18]. Відповідно до неї вихідне значення інтенсивності пікселя DN (digital number) перетворюється у коефіцієнт зворотного розсіювання σ_0 за формулою

$$\sigma_0 = \frac{[DN]^2}{K} \cdot \sin(\alpha), \sigma_0, dB = 10 \log(\sigma_0),$$

де α – локальний кут нахилу, K – константа калібрування, значення якої можна отримати з файлу-зображення.

2. Географічна прив'язка. Вихідні супутникові дані ENVISAT/ASAR поставляються в форматі Envisat [8] з регулярною сіткою опорних (контрольних) точок GCP (Ground Control Point). Ці точки використовуються для геоприв'язки. Для знаходження широти та довготи пікселів зображення, для яких невідомі географічні координати, використовується білінійна інтерполяція.

3. Обробка зображення. Для кожного РСА будується своя нейронна мережа, яка використовується для сегментації та класифікації зображення. В результаті отримуємо зображення, значення пікселів якого приймають два значення: 1 для позначення класу «Вода» і 0 – для класу «Суша».

4. Визначення територій затоплення. Необхідно вилучити області, які відповідають ефектам затінення і не обумовлені наявністю водних поверхонь. Для цього використовуються карти затінення, які створюються в процесі орторектифікації.

5. Перетворення до географічної проекції. Для використання карт затоплень в стандартному програмному забезпеченні створені карти необхідно перетворити до відповідної проекції. У даному випадку використовується географічна проекція з еліпсоїдом WGS-84.

6. Візуалізація результатів обробки. Для візуалізації результатів використовуються інтерфейси, які відповідають міжнародним стандартам консорціуму OGC. Зокрема, використовуються стандарти WMS (Web Map Server), за допомогою яких дані можна інтегрувати до будь-якої геоінформаційної системи (ГІС), та формат KML (Keyhole Markup Language) для візуалізації в системі Google Earth.

Важливим аспектом при обробці зображень є вибір інформативних ознак, що будуть використані як вхідні значення для нейронної мережі. Причому зазвичай застосовують не попиксельну обробку зображення, а використовують

Результати класифікації зображень запропонованим методом

Таблиця 2

		Супутникове зображення		
		ERS-2	ENVISAT	RADARSAT-1
Розмірність входу		7 × 7	3 × 3	7 × 7
Розмірність виходу		10 × 10	7 × 5	5 × 5
Навчальна вибірка	«Суша»	79,40 %	100,0 %	99,99 %
	«Вода»	90,99 %	95,64 %	91,93 %
	Всього	85,29 %	98,41 %	96,04 %
Тестова вибірка	«Суша»	79,57 %	100,0 %	99,99 %
	«Вода»	91,06 %	95,90 %	91,89 %
	Всього	85,40 %	98,52 %	95,99 %

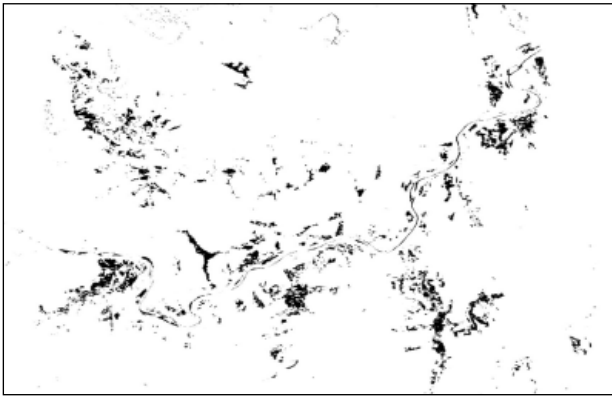


Рис. 5. Результат обробки зображення ENVISAT/ASAR під час повені на р. Меконг. Дата зйомки: 20.08.2008. (© ESA, 2008)

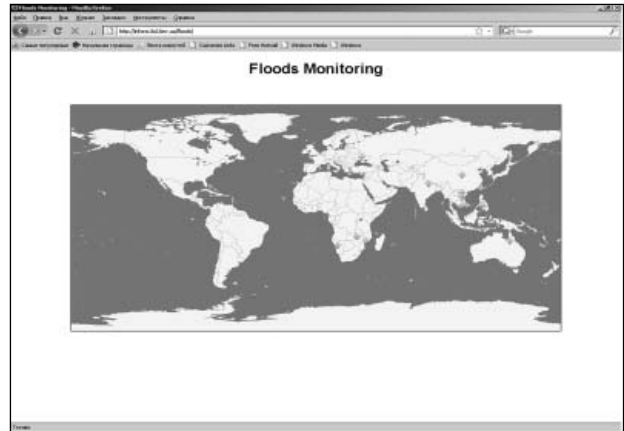


Рис. 8. Перелік регіонів, для яких побудовані карти затоплень

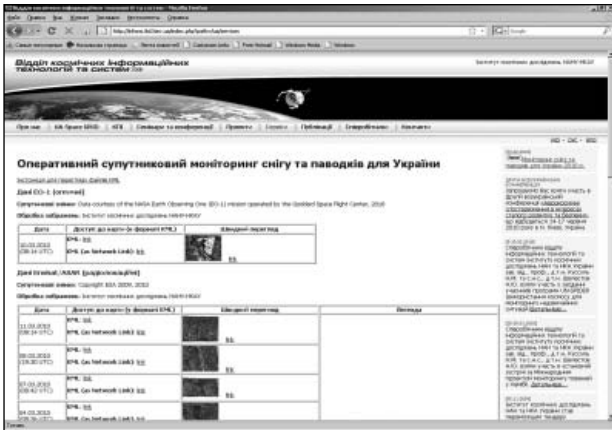


Рис. 6. Копії екрану Web-ресурсу <http://inform.ikd.kiev.ua/index.php?path=/ua/services>

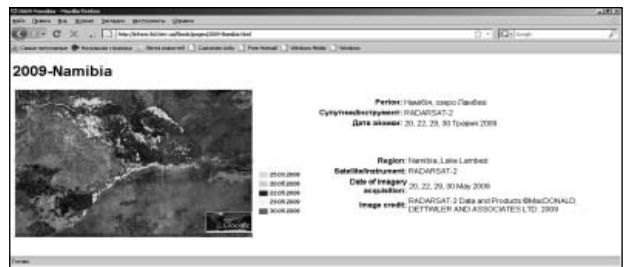


Рис. 9. Карта затоплень для о. Ламбезі, Намібія (травень 2009 р.)

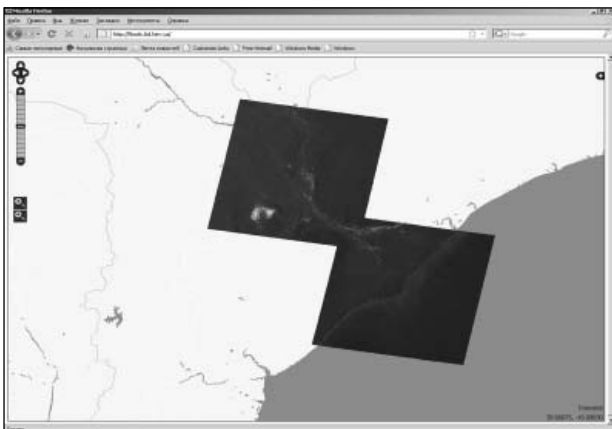


Рис. 7. Копії екрану Web-ресурсу <http://floods.ikd.kiev.ua>

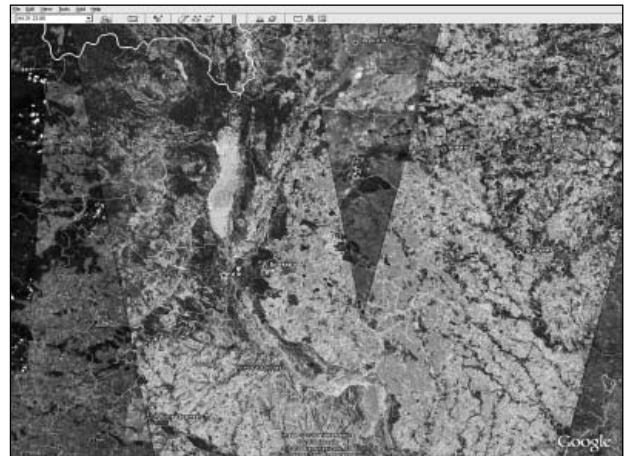


Рис. 10. Карта снігового покриву України

деякий окіл пікселя. Як інформативні ознаки можна вибрати значення інтенсивності пікселів, значення похідних, різноманітні фільтри,

перетворення (наприклад, перетворення Фур'є) тощо [20]. В даній роботі на вхід нейронної мережі подаються значення інтенсивностей пікселів деякого околу (розмір околу складає 3×3 ; 5×5 ; 7×7 ; 9×9 ; 11×11 ; 13×13).

Для оцінки якості навчання нейронної мережі Кохонена використовувалися такі параметри:

- ✦ похибка дискретизації або квантування (quantization error) навченої мережі Кохонена [19];
- ✦ процент вірно класифікованих образів, тобто результати класифікації нейронної мережі на тестових даних.

Для визначення оптимальної архітектури та параметрів нейронної мережі Кохонена була проведена серія експериментів, причому варіювався такий набір параметрів: розмір околу кожного пікселя радарного зображення, що визначав кількість нейронів у вхідному шарі нейронної мережі; кількість нейронів вихідного шару, що відповідає кількості кластерів, на які буде сегментоване зображення.

Початкові значення вагових коефіцієнтів, які використовувалися при навчанні нейронної мережі, вибиралися таким чином. Спочатку застосовувався метод аналізу головних компонентів для визначення двох векторів, які відповідають найбільшому значенню сукупної дисперсії. Ці вектори використовувалися як базис для генерації вагових коефіцієнтів, що представляють собою лінійну оболонку двох головних компонентів [19]. Застосування цієї процедури дає можливість значно зменшити час навчання нейронної мережі. Результати класифікації супутникових зображень наведені в табл. 2.

Для зображень з більшим просторовим розрізненням (ERS-2 та RADARSAT-1) найкращі результати отримано для вхідного вікна розміром 7×7 . В свою чергу, для даних супутника ENVISAT/ASAR WSM використано вхідне вікно з мінімальним розміром 3×3 . Застосування більшого розміру призводить до погіршення розрізненості результуючої карти затоплень та зменшення точності класифікації. Приклади результатів обробки супутникових зображень наведено на рис. 5.

ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СЕРВІСИ ДЛЯ ОЦІНКИ ПЛОЩ ЗАТОПЛЕНИХ ТЕРИТОРІЙ

Розроблені в межах даного проекту геоінформаційні сервіси для оцінки площ затоплених територій надаються через мережу Internet і доступні на Web-ресурсах <http://inform.ikd.kiev.ua/index.php?path=/ua/services> (рис. 6) та <http://floods.ikd.kiev.ua> (рис. 7).

На рис. 8 наведено карту, де позначено регіони, для яких було побудовано карти затоплень з використанням радіолокаційних супутникових даних.

Приклади геоінформаційних продуктів, які були надані у 2009 р., наведено на рис. 9.

У зв'язку з підвищенням небезпеки виникнення повеней в Україні було створено операційний геопросторовий сервіс для моніторингу снігового покриву на території України за даними ENVISAT/ASAR, отриманими в реальному режимі часу в межах гранту Європейського космічного агентства. Сервіс надається через мережу Internet (<http://inform.ikd.kiev.ua>) з використанням стандартизованого надання інформації у форматі *kml* або будь-якому WMS-сумісному форматі (рис. 10).

ВИСНОВКИ

У роботі представлені результати виконання науково-технічного проекту НАНУ, пов'язані з наданням геоінформаційних сервісів для моніторингу повеней за радіолокаційними супутниковими даними для території України та інших регіонів світу. Сервіси функціонують в операційному режимі та забезпечують автоматичне отримання, обробку супутникових даних та надання цифрових карт у стандартизованому вигляді через мережу Internet. За основу геоінформаційних сервісів взяты інтелектуальні методи обробки даних, а саме карти Кохонена. За результатами виконання проекту в Державному департаменті інтелектуальної власності зареєстровано авторське право на комп'ютерну програму автоматичного картографування повеней на основі радіолокаційних супутникових

даних ENVISAT. Отримані результати використовуються для прийняття рішень в межах програми ООН UN-SPIDER.

ЛІТЕРАТУРА

1. Scheuren J.-M., le Polain de Waroux O., Below R., et al. Annual Disaster Statistical Review – The Number and Trends 2007 // Center for Research of the Epidemiology of Disasters (CRED), Jacoffsset Printers, Melin, Belgium. – 2008.
2. Ulander L.M.H. Radiometric slope correction of synthetic-aperture radar images // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 1996. – Vol. 34. – P. 1115–1122.
3. Cossu R., Brito F., Fusco L., et al. Global automatic orthorectification of ASAR products in ESRIN GPOD // 2007 ESA ENVISAT Symposium, Montreux Switzerland. – 23–27 April 2007.
4. Leberl F. Interpolation in Square Grid DTM // The ITC Journal. – 1973.
5. Schut G.H. Review of Interpolation Methods for Digital Terrain Models // Canadian Surveyor. – 1976. – Vol. 30, № 5. – P. 389–412.
6. Petrie G., Kennie T.J.M. Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering // Computer-Aided Design. – 1987. – Vol. 19, № 4. – P. 171–187.
7. Davis D.M., Downing J., Zoraster S. Algorithms for Digital Terrain Data Modeling // Technical Report DAAK70-80-C-0248, U.S. Army Engineer Topographic Laboratories, Fort Belvoir, Virginia, 1982.
8. ASAR Product Handbook. // http://envisat.esa.int/pub/ESA_DOC/Envisat/ASAR/asar.ProductHandbook.2_2.pdf.
9. Curlander J.C., McDonough R.N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing // Wiley Series in Remote Sensing. – 1991. – ISBN: 0-471-85770X.
10. Sheng Y., Alsdorf D.E. Automated georeferencing and orthorectification of Amazon Basin-wide SAR Mosaics using SRTM DEM Data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – **43 (8)**. – P. 1929–1940.
11. Pierce L., Kellndorfer J., Ulaby F. Practical SAR Orthorectification // IGARSS. – 1996. – 4. – P. 2329–2331.
12. Kropatsch W.G., Strobl D. The Generation of SAR Layover and Shadow Maps From Digital Elevation Models // IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing. – 1990. – Vol. 28, № 1.
13. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999.
14. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Grid System for Flood Extent Extraction from Satellite Images // Earth Science Informatics. – 2008. – Vol. 1, № 3. – P. 105–117.
15. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Intelligent Computations for Flood Monitoring // International Book Series

- «Advanced Research in Artificial Intelligence» (ed. Markov K., Ivanova K., Mitov I.). – 2008. – 2. – P. 48–54.
16. Куссульт Н.Н., Луцян Е.А., Шелестов А.Ю. и др. Нейросетевой метод мониторинга затопленных территорий с использованием радиолокационных спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. – 2008. – 4. – С. 29–35.
 17. Скакун С.В. Нейромережевий метод картографування повеней на основі супутникових зображень // 3-к наукових праць ДонНТУ. Сер. «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2009. – Вип. 10 (153). – С. 115–120.
 18. Rosich B., Meadows P. Absolute calibration of ASAR level 1 products generated with PF-ASAR. ESA-ESRIN, ENVI-CLVLEOPG-TN-03-0010, 07 October 2004.
 19. Kohonen T. Self-Organizing Maps. Series in Information Sciences, – Vol. 30. Springer, Heidelberg, – 1995.
 20. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing // Prentice Hall: Upper Saddle River, New Jersey, 2002. – 793 p.

С.В. Скакун

ГЕОІНФОРМАЦІОННИЙ СЕРВІС МОНІТОРИНГА НАВОДНЕНИЙ ПО СПУТНИКОВИМ ДАНИМ

Представлены результаты выполнения научно-технического проекта НАН Украины, связанные с предоставлением геоинформационных сервисов мониторинга наводнений с использованием радиолокационных спутниковых данных для территории Украины и других регионов мира. Разработанные сервисы функционируют в операционном режиме и обеспечивают автоматическое получение, обработку спутниковых данных и предоставление цифровых карт в стандартизированном виде через сеть Internet. В основу геоинформационных сервисов положены интеллектуальные методы обработки данных, а именно нейронные сети.

Ключевые слова: информационные технологии, обработка геопространственных данных, распределенная система, мониторинг чрезвычайных ситуаций.

S. Skakun

GEOINFORMATION SERVICE FOR FLOOD MONITORING USING SATELLITE DATA

The results of the scientific and technological project of NAS of Ukraine on the development of geoinformation services for flood monitoring for Ukraine and other regions using satellite data are presented. The services are run in operational mode and provide automatic acquisition and processing of satellite data, and delivery of digital maps through the Internet. The intellectual methods for data processing, namely neural networks, were based into geoinformation services.

Key words: information technology, geospatial data processing, distributed system, disaster management.

Надійшла до редакції 23.03.10