

УДК 528.8

## Супутниковий моніторинг повеней за даними радарної зйомки С-діапазону

Д. К. Мозговий\*

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна*

Запропоновано методику автоматизованої обробки супутникових знімків для здійснення всепогодного супутникового моніторингу повеней за радарними даними С-діапазону. Наведені результати визначення меж затоплених ділянок для оцінювання масштабів, динаміки і наслідків повеней на території моніторингу. Проведено порівняння результатів обробки сканерних і радарних знімків середнього просторового розрізнення супутників Sentinel-1 і Sentinel-2. Показані переваги радарної зйомки за наявності хмарності на території моніторингу.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, супутниковий моніторинг, повені, радарні знімки, поляризаційні композити, обробка зображень

© Д. К. Мозговий. 2018

### Вступ

Серед найбільш масштабних і небезпечних стихійних лих, які щорічно відбуваються в різних країнах, одне з перших місць за регулярністю, площею поширення та сумарним обсягом матеріальних збитків, поряд з пожежами та землетрусами, займають повені. Затоплення місцевості в містах паралізує нормальну роботу практично всіх муніципальних служб, призводить до аварій на дорогах, викликає руйнування будівель та інженерних споруд, а в особливо важких випадках і до жертв серед населення. У сільській місцевості повені призводять до знищення посівів, до загибелі тварин і порушення природних екосистем.

### Актуальність теми

Щороку повені спричиняють збитки на сотні мільярдів доларів та викликають загибель кількох сотень людей, не зважаючи на той факт, що більшість з них є сезонними, тобто очікуваними і прогнозованими. Тому своєчасна і достовірна оцінка масштабів, динаміки і наслідків повеней є важливим і актуальним завданням, вирішення якого дозволяє більш ефективно та оперативно організувати роботу рятувальних служб під час стихії, а також більш продуктивно проводити заходи по ліквідації наслідків повеней.

### Постановка проблеми

Наземні методи контролю динаміки повеней і оцінки їх наслідків пов'язані з різними труднощами, обумовленими такими факторами як:

- неможливість або низька ефективність плануван-

ня робіт, обумовлена раптовістю стихійного лиха (у випадках, коли повені викликані ураганами, цунами та ін. стихійними явищами);

- велика площа постраждалих територій з великою кількістю контрольованих ділянок, що знаходяться на великій відстані одна від одної;
- складність доступу до постраждалих об'єктів, що вимагає використання спецтехніки та підготовленого персоналу;
- висока швидкість зміни меж затоплення, що вимагає багаторазових періодичних вимірювань;
- наявність ризиків для життя і здоров'я персоналу, який контролює динаміку розвитку надзвичайної ситуації.

### Поточний стан

Останнім часом для оцінки масштабів, динаміки і наслідків техногенних і природних надзвичайних ситуацій все частіше використовуються дані дистанційного зондування Землі [4, 8, 12], зокрема, супутникові знімки, які в порівнянні з наземними методами вимірювань мають незаперечні технічні, організаційні та економічні переваги, зокрема:

- об'єктивність і достовірність (супутникові знімки дозволяють повністю виключити помилки людей, а також навмисне спотворення або замовчування важливої інформації);
- оглядовість і інформативність (можливе спостереження будь-якої, навіть важкодоступної території на Землі з охопленням в тисячі кілометрів);
- актуальність і оперативність (можлива доставка знімків користувачу без затримки в разі безпосереднього прийому на абонентські станції);
- висока періодичність (до декількох знімків на добу);
- багатогалузевість (використання одних й тих же знімків для вирішення широкого спектру при-

\* E-mail: m-d-k@i.ua

кладних задач в інтересах різних державних структур і приватних компаній);

- багатоспектральний характер спостережень при використанні оптико-електронних сканерів (синхронна зйомка в декількох спектральних каналах у видимому та інфрачервоному діапазонах);
- багатополаризаційна зйомка при використанні радарів з синтезованою апертурою (зйомка в різних поляризаціях на передачу і прийом в L-, C- та X- діапазонах);
- абсолютна безпека (відсутність ризиків для здоров'я і життя людей в порівнянні з наземними методами);
- висока економічна ефективність (істотно менші витрати в порівнянні з наземними методами);
- максимальна доступність та конфіденційність (простота отримання даних і мінімізація ризиків витоку інформації).

### Недоліки існуючих методів

Як відомо, найбільш поширена та інформативна багатоспектральна супутникова зйомка у видимому та інфрачервоному діапазонах [2, 3, 6] має два суттєвих обмеження під час зйомки:

- необхідність у достатній освітленості території, (як правило, якісна зйомка можлива при кутах Сонця, більших за 30°);
- дуже сильна залежність від наявності хмарності над територією, що знімається (максимально допустимий відсоток хмарності зазвичай повинен бути не більше 2...5%).

### Можливі шляхи розв'язання проблеми

Протягом останніх 10 років були введені в експлуатацію понад 14 супутників ДЗЗ високого і середнього просторового розрізнення, які мають бортові

радары з синтезованою апертурою в L-, C- та X- діапазонах (табл. 1). Ці супутники вже досить широко використовуються для ефективного вирішення багатьох актуальних науково-прикладних задач [1, 11]. Тому для забезпечення всепогодного супутникового моніторингу динаміки і наслідків повеней, крім супутникових знімків у видимому та інфрачервоному діапазонах, необхідно використовувати двополяризаційні дані радарної зйомки, отримані з діючих супутників ДЗЗ.

### Мета і завдання досліджень

Основним завданням досліджень є розробка методики автоматизованої обробки супутникових знімків для здійснення всепогодного супутникового моніторингу повеней за радарними даними C-діапазону з метою підвищення оперативності та достовірності визначення меж і площ затоплених ділянок при оцінюванні масштабів, динаміки і наслідків повеней.

### Вихідні дані для досліджень

Найбільші повені з людськими жертвами в 2017 р. відбувалися майже на всіх континентах: в Азії (Індія, Китай, В'єтнам, Філіппіни, Таїланд), в Європі (Італія та Греція), а також у Північній Америці (США і Нікарагуа) та у Південній Америці (Бразилія і Перу). Для проведення автоматизованого всепогодного супутникового моніторингу повеней в якості тестової ділянки була обрана територія міста Х'юстон (штат Техас, США), де в результаті сильного урагану "Харві" в серпні 2017 р. відбулася катастрофічна повінь з масштабними наслідками та збитками на десятки мільярдів доларів. В якості основних вихідних даних були використані безкоштовні двополяризаційні радарні знімки C-діапазону, отримані супутниками Sentinel-1A/B. В якості додаткових вихідних даних

**Таблиця 1.** Супутники ДЗЗ, що мають радари з синтезованою апертурою [10]

Супутник	Рік запуску	Країна оператор	Маса супутника, кг	Висота орбіти, км	Діапазон частот	Смуга захвату**, км	Просторове розрізнення**, м
Radarsat-2	2007	Канада	2300	798	C	20..500	1,6..160
SkyMed-1, 2	2007	Італія	1900	619	X	10..200	1..100
TerraSAR-X	2007	Німеччина	1250	514	X	4..270	0,25..40
SkyMed-3	2008	Італія	1900	619	X	10..200	1..100
TanDEM-X	2010	Німеччина	1250	514	X	4..270	0,25..40
SkyMed-4	2010	Італія	1900	619	X	10..200	1..100
RISAT-1	2012	Індія	1858	536	C	10..220	1..50
KOMPSAT-5	2013	Півд. Корея	1400	550	C	5..100	1..20
Sentinel-1A	2014	ESA*	2280	693	C	80..400	4..20
ALOS-2	2014	Японія	2000	628	L	25..350	1..100
Gaofen-3	2016	Китай	2950	758	C	10..650	1..500
Sentinel-1B	2016	ESA*	2280	693	C	80..400	4..20
Iceye-X1	2018	Фінляндія	70	505	X	200	10

\*ESA – Європейське космічне агентство

\*\*В залежності від режиму знімання

(для порівняння) були використані багатоспектральні сканерні знімки у видимому та інфрачервоному діапазонах, отримані із супутників Sentinel-2A/B, які також є у відкритому доступі.

### Методологія досліджень

Роботи, проведені в рамках експериментальних досліджень під час розроблення та тестування методики, включали такі етапи обробки та аналізу радарних знімків:

- операції попередньої обробки (рис. 1), що виконуються в автоматичному режимі (розпакування знімків HV і VV поляризацій та метаданих до них, географічна прив'язка за орбітальними даними, радіометрична і геометрична корекція, перетворення в задану картографічну проекцію);
- операції тематичної обробки (рис. 2), що виконуються у напівавтоматичному режимі (розрахунок відношень для каналів HV і VV поляризацій, формування RGB-комpositу та візуалізація, настройка порогів бінаризації, виділення класу води, морфологічна фільтрація і векторизація, формування тематичної карти підтоплень та експорт результатів в стандартні растрові і векторні формати).

### Вимоги до програмного та апаратного забезпечення

Обсяги файлів радарних даних, отримані із супутників Sentinel-1A/B, досить великі — одна сцена, яка знята у двох поляризаціях, може займати кілька гігабайт.

Тому для виконання оперативної обробки радарних знімків в реальному часі бажано використовувати сучасні комп'ютери з багатоядерними процесорами класу Intel I-7 або вище і об'ємом оперативної пам'яті не менше 64 Гбайт. Програмне забезпечення може бути як платним (ERDAS, ENVI, ArcGIS і т. п.), так і вільним (SNAP, SAGA, GRAAS, QGIS і т. п.), які працюють як в середовищі MS Windows, так і в середовищі Linux.

### Результати досліджень

В процесі обробки двополяризаційних радарних знімків міста Х'юстон зі супутників Sentinel-1A/B за 23 і 30 серпня 2017 року на основі відкоригованих даних каналів HV і VV поляризацій були отримані:

- псевдокольорові RGB-комpositи ділянок житлових кварталів до повені та під час повені (рис. 3);

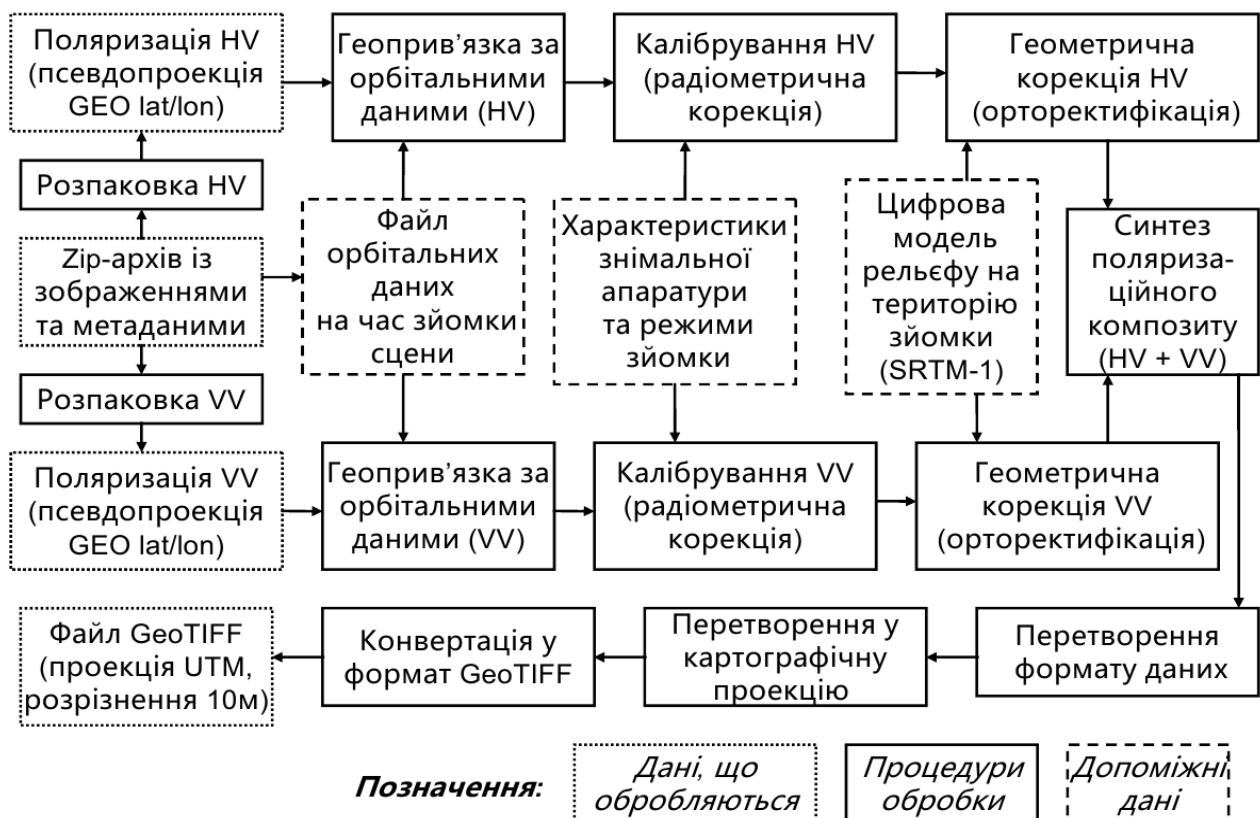


Рис. 1. Основні етапи попередньої обробки радарних знімків





- псевдокольорові RGB-композиції ділянок прибережних територій до повені та під час повені (рис. 4);
- псевдокольорові RGB-композиції ділянок сільськогосподарських районів до повені та під час повені (рис. 5);
- растрові маски води до повені і під час повені;
- векторні шари меж води до повені і під час повені;
- векторний шар меж води затоплених територій.

Аналіз результатів обробки радарних даних С-діапазону, отриманих зі супутників Sentinel-1A/B, показав досить високу (для знімків середнього просторового розрізнення) точність виділення меж водних об'єктів на великих територіях (наприклад, для режиму Stripmap середня похибка була в межах декількох метрів).

Крім того, спостерігалася досить добра відповідність (у частині виділення класу води) результатів обробки радарних знімків зі супутника Sentinel-1B з результатами обробки безхмарних і малохмарних фрагментів сканерних знімків міста Х'юстон зі супутника Sentinel-2A у видимому та інфрачервоному діапазонах, отриманих також 30 серпня 2017 року (рис. 6, 7).

Основні переваги запропонованої методики в

порівнянні з методами, що використовують тільки дані багатоспектральної супутникової зйомки у видимому та інфрачервоному діапазонах, такі:

- відсутність вимог до достатньої освітленості (можлива зйомка як в денний, так і в нічний час);
- незалежність від погодних умов над територією, (можлива зйомка навіть при 100% хмарності);
- більш висока (в порівнянні зі сканерами) достовірність виділення меж затоплених ділянок при малохмарній зйомці як житлових кварталів (рис. 8), так і сільгоспугідь (рис. 9);
- простота і можливість швидкого освоєння для нефахівців в області обробки супутникових знімків (орієнтація на масового користувача);
- високий ступінь автоматизації процесу обробки радарних даних та візуалізації результатів, що дозволяє програмно реалізувати дану методику у вигляді геоінформаційного веб-сервісу [7].

Область практичного застосування запропонованої методики досить широка, оскільки вона дозволяє проводити автоматизований всепогодний супутниковий моніторинг повеней як в інтересах державних служб (рятувальники, екологи, муніципальні служби), так і в інтересах комерційних структур (страхові компанії, туристичні агентства, фермери, будівельні фірми та ін.).

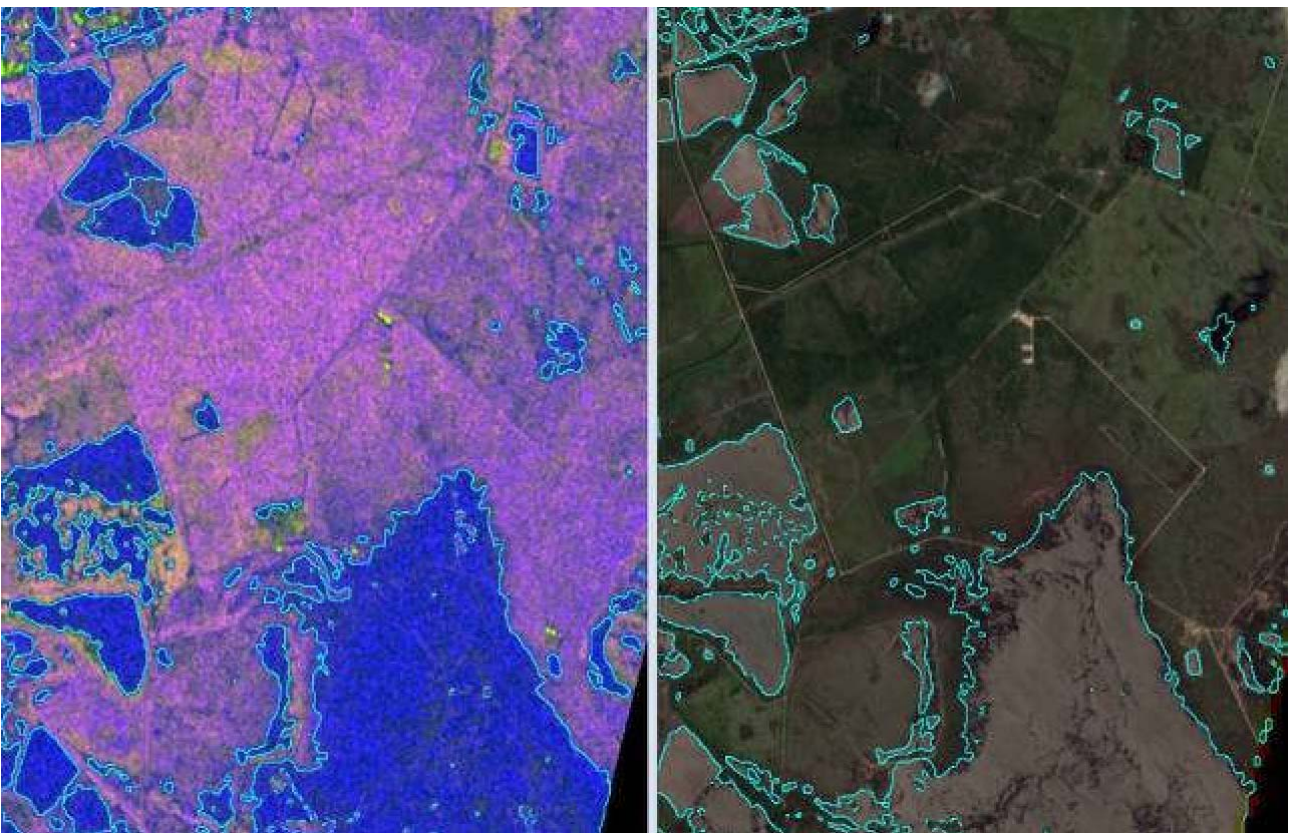


**Рис. 4.** Псевдокольорові RGB-композиції ділянок прибережних територій до повені (ліворуч) та під час повені (праворуч)



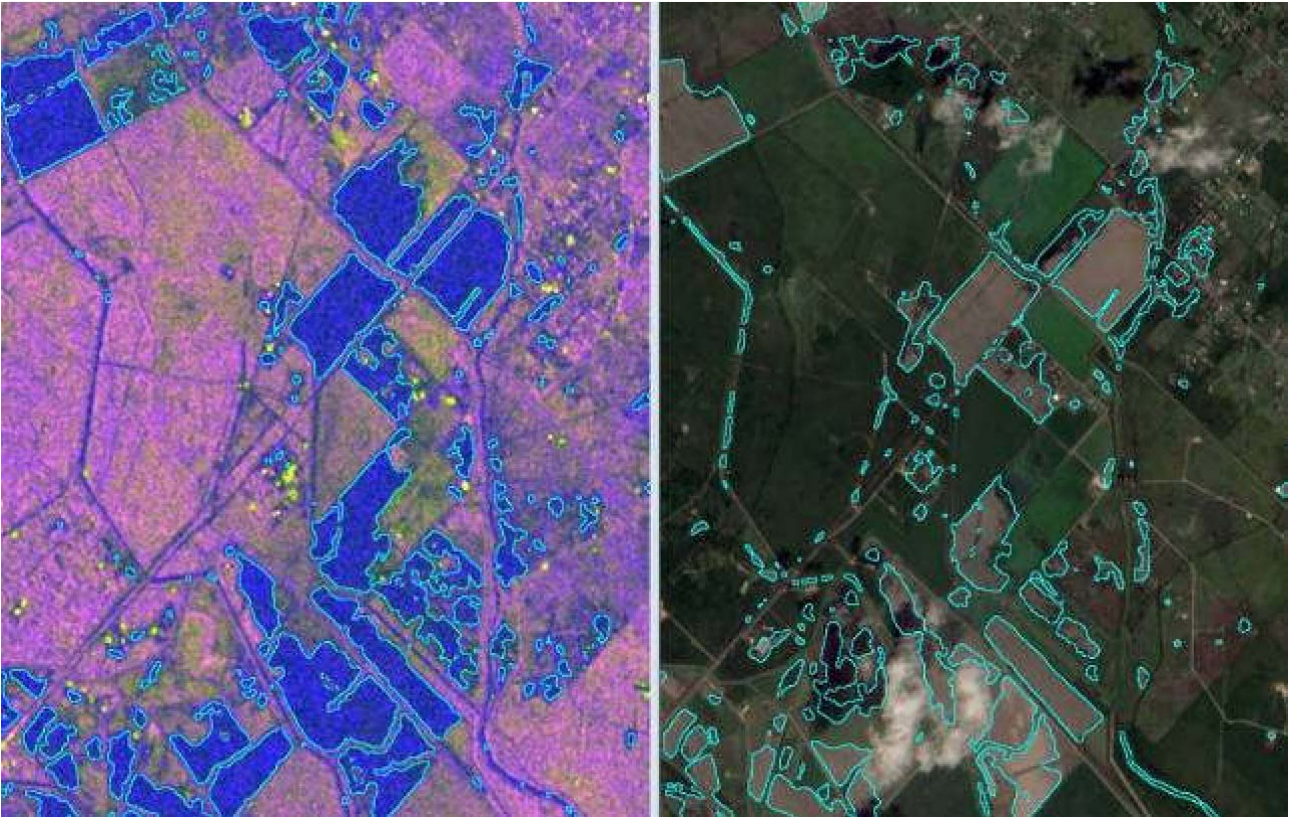


**Рис. 5.** Псевдокольорові RGB-композити ділянок сільськогосподарських районів до повені (ліворуч) та під час повені (праворуч)

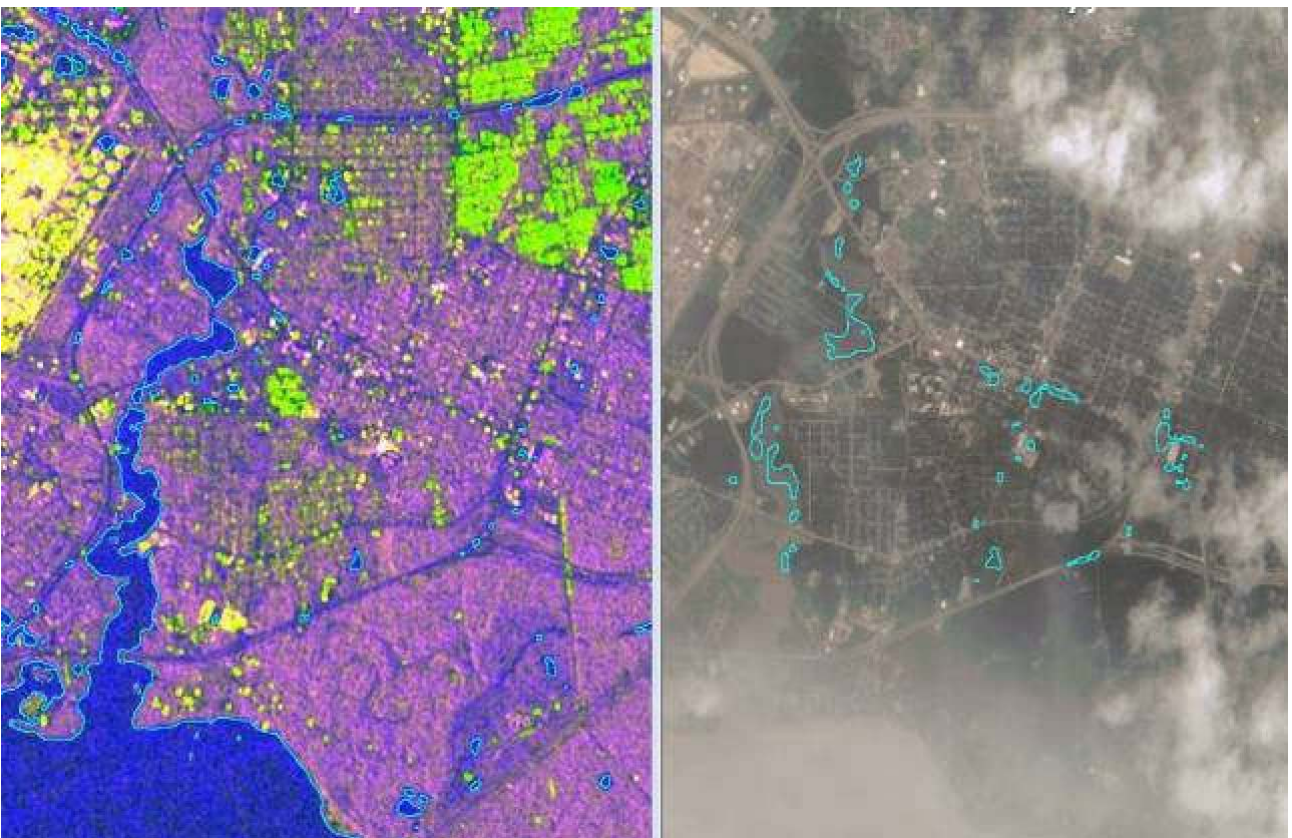


**Рис. 6.** Виділення води на безхмарних ділянках знімків за 30.08.2017 за радаром Sentinel-1B (ліворуч) та за сканером Sentinel-2A (праворуч)





**Рис. 7.** Виділення води на малошмарних ділянках знімків за 30.08.2017 за радаром Sentinel-1B (ліворуч) та за сканером Sentinel-2A (праворуч)



**Рис. 8.** Виділення води на захмарених ділянках житлових кварталів за радаром Sentinel-1B (ліворуч) та за сканером Sentinel-2A (праворуч)



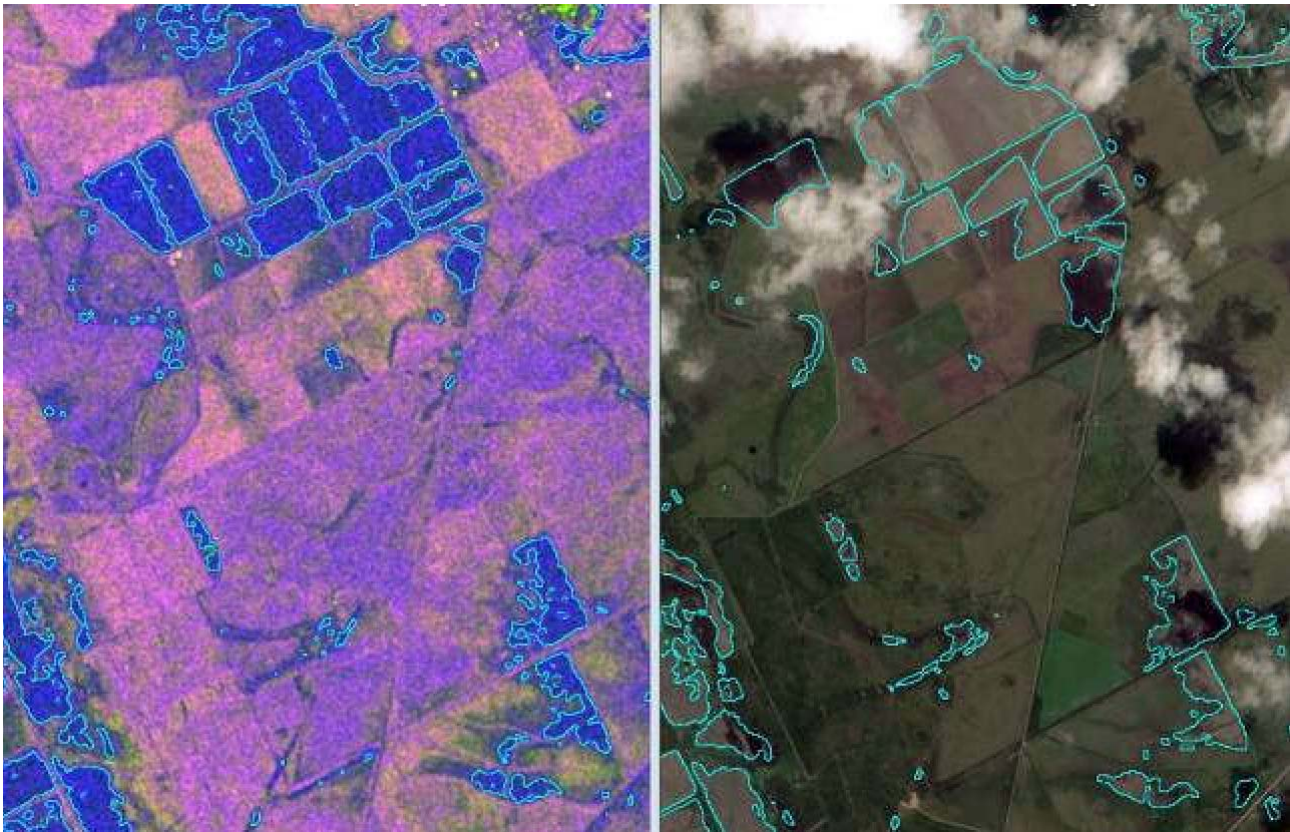


Рис. 9. Виділення води на захмарених ділянках сільгоспуділянок за радаром Sentinel-1B (ліворуч) та за сканером Sentinel-2A (праворуч)

При програмній реалізації даної методики у вигляді геоінформаційного веб-сервісу [5, 9] вона може бути використана для оперативного інформування широких верств населення — найбільш масового користувача. За матеріалами досліджень також підготовлені лекційні та лабораторні заняття, включені до складу учбово-методичного комплексу “Оброблення радарних даних ДЗЗ”, який викладається студентам старших курсів Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара в рамках навчальної дисципліни “Системи ДЗЗ”, а також використовується при написанні курсових та дипломних робіт.

### Напрямки подальших досліджень

Проводиться експериментальне відпрацювання запропонованої методики на ділянках найбільш масштабних повеней 2015...2018 рр. з використанням радарних знімків з супутників Sentinel-1A/B та сканерних знімків з супутників Landsat-7/8 та Sentinel-2A/B.

Крім того, проводиться модернізація даної методики з метою подальшої її реалізації у вигляді геоінформаційного веб-сервісу, що надасть додаткові суттєві переваги в порівнянні з існуючою версією, такі, як:

- робота безпосередньо в браузері, що не вимагає додаткового програмного забезпечення, яке встановлюється у клієнта;

- програмна і апаратна незалежність, що дозволяє використовувати даний веб-сервіс на мобільних пристроях;
- результати обробки знімків зберігаються на сервері, що дозволяє всім клієнтам користуватися веб-сервісом незалежно від їх місця знаходження;
- можливість інтеграції у існуючі відомчі та корпоративні інформаційні системи за допомогою уніфікованих програмних інтерфейсів.

### Висновки

Розроблено методику автоматизованої обробки супутникових знімків для здійснення всепогодного супутникового моніторингу повеней за радарними даними С-діапазону, яка дозволяє істотно підвищити оперативність і достовірність визначення меж та площ затоплених ділянок при оцінці масштабів, динаміки та наслідків повеней. Проведене тестування запропонованої методики на знімках супутників Sentinel-1A/B, яке підтвердило її переваги у порівнянні зі сканерною зйомкою. Завдяки високому ступеню автоматизації розроблена методика може бути програмно реалізована у вигляді геоінформаційного веб-сервісу, який може функціонувати в інтересах широкого кола державних служб і комерційних структур, а також в інтересах окремих користувачів.



## Література

1. Использование радарной съемки для мониторинга природных и техногенных ландшафтов / В. В. Васильев [та ін.] // П'ята Міжнародна конференція “Аеро-космічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки” (GEO-UA 2016). — К.: Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України. [text] <http://geoss-conf.ikd.kiev.ua/index.php/geo-conf/2016/paper/view/15/9>.
2. Мозговой Д. К. Мониторинг последствий засухи по спутниковым снимкам высокого пространственного разрешения / Д. К. Мозговой // *Екологія та ноосферологія*. — 2016. — Т. 27. — № 1–2. — Київ–Дніпропетровськ, 2016. — С. 90–95.
3. Мозговой Д. К. Обработка спутниковых снимков при решении прикладных задач / Д. К. Мозговой // *Международный научно-практический форум “Наука и бизнес”*. — 29–30 июня 2015 года, Днепропетровск — Тезисы докладов. — С. 191–194.
4. Мозговой Д. К. Спутниковый мониторинг лесных пожаров и засухи / Д. К. Мозговой // *Международная научно-практическая конференция “Передовые методы обработки и анализа космической информации”*. — 3–4 декабря 2015 года, Днепропетровск. — Тезисы докладов. — С. 48–3.
5. Мозговой Д. К. Мониторинг природных и антропогенных процессов с помощью веб-сервиса Landsat Viewer / Д. К. Мозговой, В. В. Васильев // *Вісник ДНУ. Ракетно-космічна техніка*. — 2016. — Вип. 13 — Т. 24. — № 4. — С. 95–101.
6. Мозговой Д. К. Оценка последствий лесных пожаров по данным ДЗЗ / Д. К. Мозговой, В. В. Васильев // *Інформаційні системи, механіка та керування*. — 2016. — № 14. — С. 42–52.
7. Мозговой Д. К. Геоинформационные веб-сервисы онлайн обработки спутниковых снимков / Д. К. Мозговой, М. В. Чорненко // *Вісник ДНУ. Ракетно-космічна техніка*. — 2016. — Вип. 13 — Т. 24. — № 4. — С. 89–95.
8. Мозговой Д. К. Использование данных MODIS для экологического мониторинга и контроля чрезвычайных ситуаций / Д. К. Мозговой, О. В. Кравец // *Екологія та ноосферологія*. — 2009. — Т. 20. — № 1–2. — С. 84–89.
9. Мозговой Д. К. Геоинформационные веб-сервисы EOS DA / Д. К. Мозговой, В. В. Васильев, М. В. Чорненко // *Международный научно-практический форум “Наука и бизнес”*. — 1 июля 2016 года, Днепр. — С. 54–61.
10. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>.
11. Mozgovoy D. K. Complex Processing of Radar and Optical Imagery from Sentinel Satellites / D. K. Mozgovoy, V. V. Hnatushenko, V. V. Vasyliiev. — *EO Open Science 2017 25–28 September 2017 ESA-ESRIN* [text] <http://eopopenscience.esa.int/mobile-agenda/EO-OpenScience2017.html>.
12. Remote Sensing and GIS Application for Environmental Monitoring and Accidents Control in Ukraine. Geographic Uncertainty in Environmental Security // D. K. Mozgoviy, O. I. Parshina, V. I. Voloshin, Y. I. Bushuev. / Edited by Ashley Morris, Svitlana Kokhan. — Dordrecht: Springer, Published with NATO Public Diplomacy Division, 2007. — P. 259–270.

## СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ НАВОДНЕНИЙ ПО ДАННЫМ РАДАРНОЙ СЪЕМКИ С-ДИАПАЗОНА

Д. М. Мозговий

Предложена методика автоматизированной обработки дистанционных снимков для осуществления всепогодного мониторинга наводнений по радарным данным С-диапазона, которая позволяет определить масштабы затопления. Проведено сравнение результатов обработки сканерных и радарных снимков среднего пространственного разрешения спутников Sentinel-1 и Sentinel-2. Показаны преимущества радарной съемки при наличии облачности на территории мониторинга.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, спутниковый мониторинг, наводнения, радарные снимки, поляризация компоненты, обработка изображений

## SATELLITE MONITORING OF FLOODS BY C-BAND RADAR DATA

D. K. Mozgovoy

Automated image processing methodology is proposed for all-weather satellite monitoring of floods based on C-band radar data, which allows to determine the boundaries and areas of flooded areas when assessing the magnitude, dynamics and consequences of floods. Processing results comparison of medium spatial resolution scanner and radar images from Sentinel-1 and Sentinel-2 satellites is made. The advantages of a radar survey with cloudiness in the monitoring area are shown.

**Key words:** remote sensing of the Earth, satellite monitoring, floods, radar images, polarization composites, image processing