

УДК 528.8.04:504.064.2.001.18:(502.58:550.344.4)

**В. І. Лялько, Ю. В. Костюченко, М. В. Ющенко, Ю. Г. Білоус**

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, Київ

**Використання систем супутникового спостереження Землі для моніторингу природних катастроф: аналіз наслідків цунамі у Південно-Східній Азії**

*Надійшла до редакції 23.02.05*

Розглядається потенціал систем супутникового спостереження Землі в задачах моніторингу природних катастроф на прикладі аналізу наслідків цунамі у Південно-Східній Азії у грудні 2004 року. За результатами вивчення матеріалів супутникової зйомки постраждалих регіонів продемонстровано роль і місце різних методів ДЗЗ для моніторингу природних катастроф. Окреслено напрями використання систем ДЗЗ при плануванні підготовчих заходів, поточному моніторингу та розробці довгострокових стратегій управління ризиками. Визначено інформаційні потреби систем управління ризиками катастрофічних цунамі та безпеки берегових зон і джерела даних з точки зору забезпеченості даними ДЗЗ. Запропоновано методологічні підходи до прогнозування катастроф такого роду, створення системи поточного моніторингу та принципи побудови системи довгострокового управління ризиками.

## ВСТУП

Протягом останніх кількох років спостерігається драматична ескалація загрозливих природних феноменів. Ще не відновлено господарство після ураганів у Центральній Америці, не забути наслідки руйнівних повеней у Західній та Центральній Європі, зокрема на Закарпатті 1998 та 2001 рр., як рівно через рік після руйнівного землетрусу у Туреччині та Ірані велетенська морська хвиля, породжена землетрусом в Андаманському морі, практично змила прибережну смугу кількох держав Південно-Східної Азії. Хвиля мала висоту близько 20 м і виникла в результаті потужного землетрусу, що стався в точці з координатами 3.32N, 95.85E 26 грудня 2004 р. о 00:58:53 UTC (07:58:53 за місцевим часом). Постраждали Індонезія, Таїланд, Бірма, Індія, Шрі-Ланка, меншою мірою — африканське узбережжя. Загальна кількість людей, що загинули та вважаються зниклими безвісті в 12 постраждалих країнах, досягла 305 тисяч. Втрати від цунамі склали більш як 14 млрд доларів.

В цьому регіоні це була найбільша катастрофа з 1900 року. Природа поставила перед людством

новий виклик. Але проблема полягає не тільки у швидкому відновленні важливого регіону, але й в розумінні необхідності інтенсивнішого розвитку систем і технологій попередження катастроф та управління їхніми ризиками в глобальному масштабі.

Саме використання сучасних наукових та технологічних розробок в галузі глобального моніторингу та глобальної безпеки стало найважливішим в контексті розробки глобальних стратегій сталого розвитку. Серед найбільш перспективних та високотехнологічних засобів, що швидко розвиваються останнім часом, можна виділити технології супутникового спостереження Землі. У поєднанні з сучасними інформаційними технологіями та науково обґрунтованими аналітичними підходами методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стали важливим джерелом інформації та інструментом прийняття рішень у різних галузях суспільного життя.

Мета цього огляду — продемонструвати потенціал технологій ДЗЗ у вирішенні задач моніторингу прибережних зон і цунамі та показати місце супутниковых технологій у системах управління ризиками природних катастроф.



Умовні позначення:

- Епіцентр землетрусу
- Столиці держав
- Великі міста
- Кордони держав
- Постраждалі території

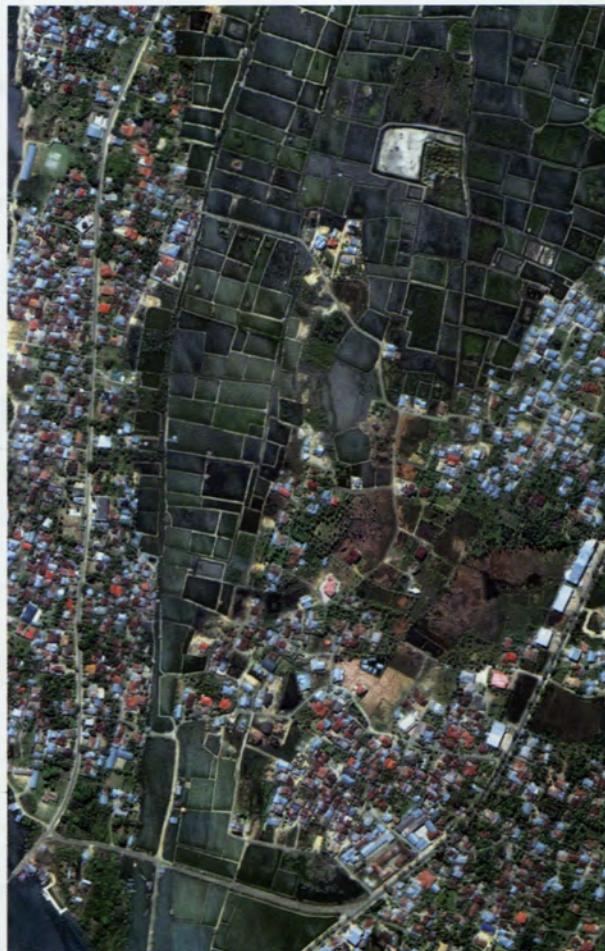
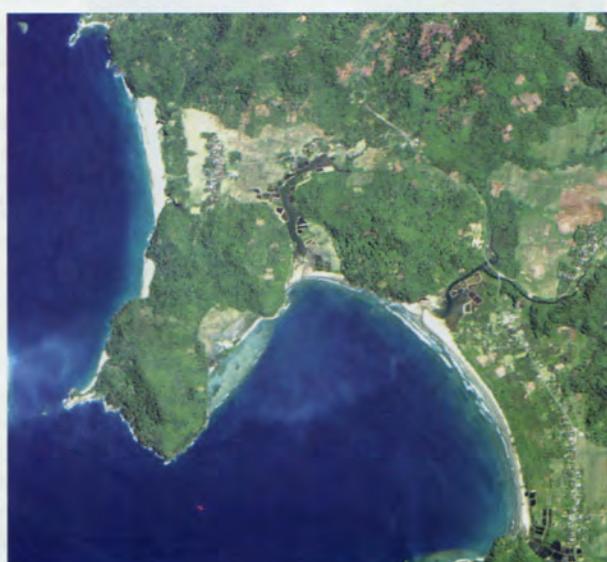
Рис. 1. Оглядова карта регіону, що зазнав впливу цунамі 26 грудня 2004 р. із зазначенням постраждалих територій



а

б

Рис. 2. Територія, що постраждала внаслідок катастрофічного цунамі (м. Банда Ачех, о-в Суматра, Індонезія; джерело даних: Digital Globe):  
а - берегова лінія та прибережна зона. Дані зйомки QuickBird від 23 червня 2004 р.; б - ураження берегової лінії та прибережної зони. Дані зйомки QuickBird від 28 грудня 2004 р. На звороті: в - міська агломерація і сільськогосподарські угіддя. Дані зйомки QuickBird від 23 червня 2004 р.; г - ураження міської території і сільськогосподарських угідь. Дані зйомки QuickBird від 28 грудня 2004 р.; д - південна частина околиць міста. Дані зйомки QuickBird від 23 червня 2004 р.; е - ураження південної частини околиць міста. Дані зйомки QuickBird від 28 грудня 2004 р.

*б**в**г**д*

*a**b*

Рис. 3. Територія, що постраждала внаслідок катастрофічного цунамі (м. Калутара, о-в Шрі-Ланка; джерело даних: Digital Globe): *a* - берегова лінія та прибережна зона. Дані зйомки QuickBird від 1 січня 2004 р.; *b* - ураження берегової лінії та прибережної зони. Дані зйомки QuickBird від 26 грудня 2004 р.

*a**b*

Рис. 4. Територія, що постраждала внаслідок катастрофічного цунамі (м. Мелабу, о-в Суматра, Індонезія; джерело даних: CRISP, National University of Singapore): *a* - берегова лінія та прибережна зона. Дані зйомки IKONOS від 17 серпня 2004 р.; *b* - ураження берегової лінії та прибережної зони. Дані зйомки IKONOS від 7 січня 2005 р.



Рис. 5. Територія, що постраждала внаслідок катастрофічного цунамі (острів Катчал, Нікобарські острови, Індія; джерело даних: EARSeL); а - дані зйомки SPOT 5 від 10 липня 2004 р.; б - ураження берегової лінії та прибережної зони. Дані зйомки SPOT 5 від 28 грудня 2004 р.

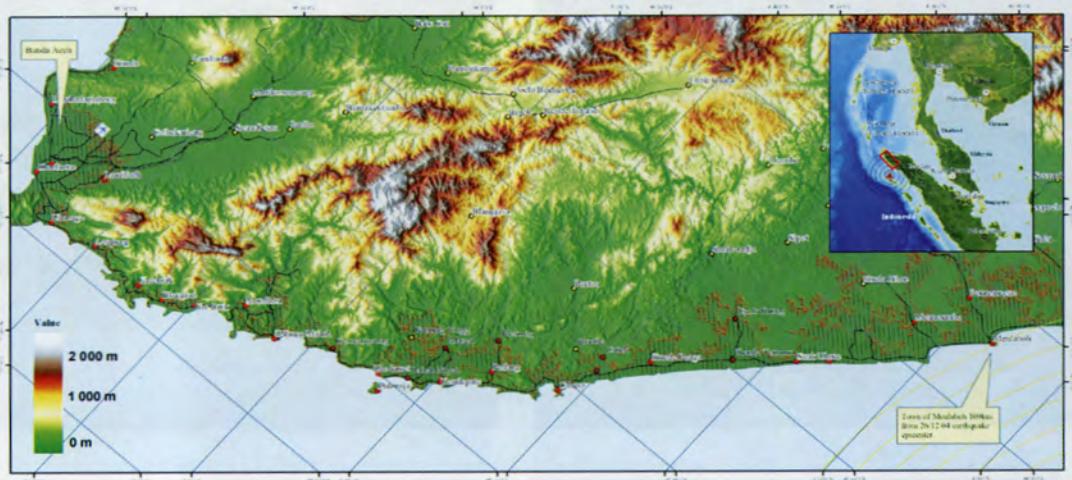


Рис. 6. Модель рельєфу території північної частини острова Суматра, Індонезія за результатами обробки даних космічної зйомки SRTM; джерело даних: USGS і UNOSAT (в рамках International Charter on Space and Major Disasters)

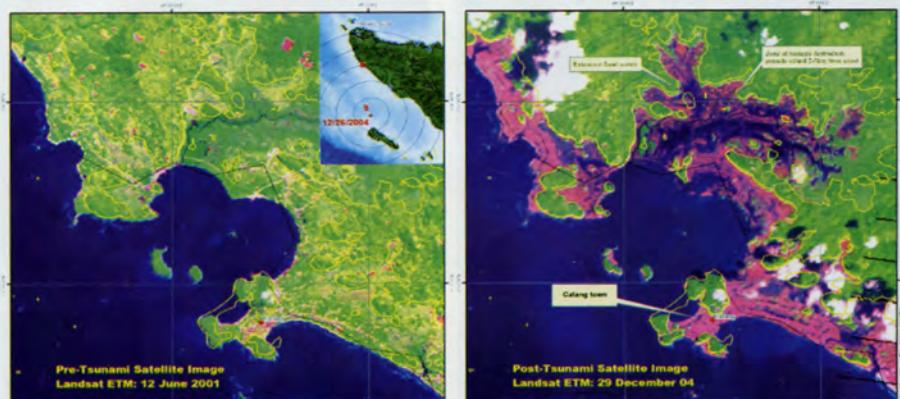


Рис. 7. Визначення меж постраждалої території північної частини острова Суматра, Індонезія. Результат спільної інтерпретації даних космічної зйомки SRTM (роздільна здатність 90 м горизонтальна і 16 м - вертикальна) і Landsat ETM (роздільна здатність 28 м) від 12 червня 2001 і 29 грудня 2004 р.; джерело даних USGS і UNOSAT (в рамках International Charter on Space and Major Disasters)

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАУВАЖЕННЯ

Цунамі, як і землетруси, є найнепередбачуванішими природними явищами. Позаяк проблеми прогнозування цих явищ не можна адекватно розв'язати, науково-технологічний потенціал ДЗЗ необхідно спрямовувати у сферу координації підготовчих заходів та швидкого реагування на катастрофічні події, тобто у сферу управління ризиками і зменшення збитків [5, 8]. Принаймні постійна просторова локалізація потенційної загрози сприяє підвищенню ефективності використання супутникової інформації в системах моніторингу і контролю катастрофічних цунамі. Так, зони затоплення та руйнації уздовж берегової лінії можуть бути детально картовані, що надасть можливість завчасно дотримання визначення соціо-економічних ризиків, та мінімізації небезпеки для мешканців цих зон.

Катастрофи такого масштабу, як остання, ставлять на порядок денний світової спільноти задачу формування транс-регіональних та глобальних планів зменшення ризиків цунамі в рамках глобальної стратегії сталого розвитку. Основою такого плану можуть стати розробки відповідних національних агенцій, наприклад розпочата під егідою NOAA у 1994 р. Національна програма зменшення небезпеки цунамі [www.pmel.noaa.gov/tsunami]. Першим кроком реалізації такої діяльності має стати створення комплексу карт затоплення в рамках розповсюджених ГІС загального доступу [5]. Дані ДЗЗ, зокрема високого розділення, мають стати базовим інструментом при розробці та вдосконаленні адекватних регіональних цифрових карт територій з високим ризиком затоплення та руйнування.

Важливим є також створення баз даних міждисциплінарного характеру щодо природних та антропогенних характеристик особливо небезпечних регіонів [9]. Поєднання можливостей ДЗЗ- та ГІС-технологій дасть змогу розробити якісно нові підходи та інструменти оцінки ризиків та на їхній основі вдосконалити стратегії управління ризиками природних катастроф [4, 5, 9].

## МОЖЛИВОСТІ ДЗЗ У ВИРІШЕННІ ЗАДАЧ КАТАСТРОФІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

З точки зору загального феноменологічного аналізу важливо визначити просторову локалізацію та можливі масштаби затоплень та руйнувань, що могли бути спричинені природною катастрофою. Для цього розглянемо карту регіону (рис. 1). На цій карті жовтим кольором позначені території, які за умовами рельєфу були затоплені хвилею цунамі,

і зазнали, таким чином, найбільших руйнувань і збитків.

Використовуючи дані ДЗЗ (рис. 2—5), розглянемо детальніше окремі регіони, що зазнали найбільшого впливу стихії, а саме, райони міст Банда-Ачех та Мелабо, які розташовані на північному краю острова Суматра (Індонезія), окіл міста Калутара на острові Шрі-Ланка, та острів Катчал (Нікобарські острови, Індія).

Бачимо, що берегова лінія зазнала значних втрат, зокрема практично повністю зруйнована вся інфраструктура, будинки, змито частину берега (рис. 2, а, б). Спостерігається повне затоплення полів, руйнування будинків і інфраструктури (рис. 2, в, г). Видно втрати берегової зони, пляжів, руйнування гирла річок, знищення рослинності на рівнинних територіях (рис. 2, д, е). Втрачено близько 300 м берегової зони, наявні значні пошкодження інфраструктури (рис. 3). Спостерігається значне руйнування будівель, інфраструктури, берегових споруд, відслідковується зміна гідрологічного режиму (рис. 4).

У правому верхньому куті рис. 5 наведено загальний обрис острова. Спостерігається повне руйнування територій і значне ушкодження земних покровів вздовж певної орографічної лінії, яка приблизно відповідає ізогіпсі 30 м над рівнем моря.

Порівняння різночасових зображень за допомогою сучасних систем обробки даних та геоінформаційних систем дозволяє швидко оцінити масштаби катастрофічного впливу, визначити точну просторову локалізацію руйнувань, оцінити таким чином прямі збитки та оперативно визначити оптимальні транспортні шляхи в уражених регіонах. Навіть просте візуальне порівняння цих зображень дає можливість оцінити загальні масштаби катастрофи. Ми покажемо далі, як застосування простих методик інтерпретації космічних зображень сприяє вирішенню задачі оцінки збитків та мінімізації наслідків природної катастрофи.

На рис. 6 і 7 наведено приклади тематичної обробки та проблемно-орієнтованої інтерпретації супутникової інформації.

На рис. 7 жовтою лінією позначена територія з висотами менше 30 м над рівнем моря, відтінки пурпурового визначають локалізацію руйнувань. Таким чином, як можна бачити, зона ураження збігається з регіональною орографічною границею.

Вивчаючи дані космічної зйомки можна дійти висновку, що не всі втрати адекватно враховані. Зокрема не вивчено інtrузію морських вод на суходіл або зміну фізичних властивостей та хімічного режиму прибережних вод океану тощо. Відповідні соціо-екологічні ризики також не мають

належної оцінки. Однак за даними деяких дослідників [1] відкладений вплив наслідків природних катастроф може скласти в середньостроковій перспективі близько 40 % прямих втрат. Як показує відповідний досвід [6], в оцінці цих показників методи супутникового спостереження ще мають зіграти визначальну роль.

#### РОЛЬ СУПУТНИКОВИХ МЕТОДІВ В УПРАВЛІННІ РИЗИКАМИ ПРИРОДНИХ КАТАСТРОФ

Таким чином, на базі продемонстрованих підходів до інтерпретації космічної інформації, може бути сформована супутникова складова системи управління ризиками катастрофічних цунамі. Основною сферою діяльності тут має стати розробка сценаріїв

використання систем супутникового спостереження Землі за відповідними напрямами заходів безпеки [5, 6]. Загальна структура цих напрямів наведена на рис. 8. В таблиці наведено інформаційні потреби та зазначено місце супутниковых даних [2, 7, 8, 10].

Моніторингова система такого плану буде сприяти розробці адекватної стратегії управління ризиками катастрофічних цунамі. Однак створення такого роду стратегії є проблемою, яка поки що не має адекватної постановки. Організація підготовчих заходів, діяльності під час подій та відновлювальних робіт базується як правило [5] на різносторокових моделях катастроф, що мають за основу статистичні підходи. Зокрема, цунамі можуть розглядатися як окремі незалежні випадки з просторово розподіленою ймовірністю виникнення. Таке уявлення дозволяє побудувати прикладні розрахункові

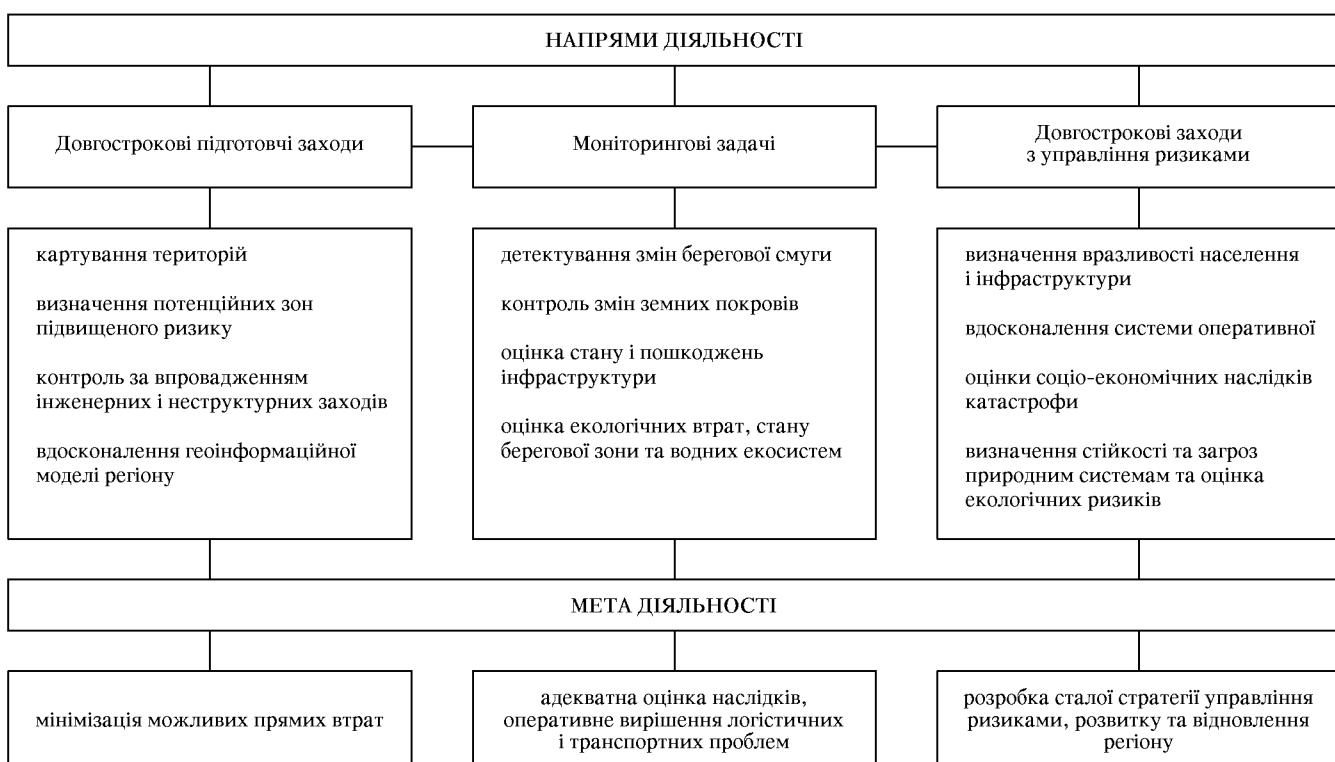


Рис. 8. Напрями використання систем ДЗЗ в контексті управління небезпекою природних катастроф

#### Інформаційні потреби системи управління ризиками катастрофічних цунамі та безпеки берегових зон і джерела даних

Потрібна інформація	Джерело даних
Інфраструктура	Картографічні дані, супутникові дані IKONOS, SPOT 1/2/3/4/5, Landsat TM
Структура землекористування	Картографічні дані, супутникові дані IKONOS, SPOT 1/2/3/4/5, Landsat TM
Демографічна структура	Регіональна та державна статистика
Сейсмічна історія регіону та статистика цунамі	Відомча статистика
Неотектоніка, літологія, положення розломних зон	Картографічні дані, супутникові дані SPOT 1/2/3/4/5, Landsat TM, RADARSAT
Особливості рельєфу	Картографічні дані, супутникові дані ERS SAR (ASAR ENVISAT), InSAR
Ландшафтна структура, рослинність та гідробіота	Картографічні дані, супутникові дані SPOT 1/2/3/4/5, Landsat TM, ENVISAT

моделі розподілу ризиків та визначити певні часові закономірності катастроф [2, 9]. Тут слід зазначити, що пряме використання супутниковых зйомок для детектування цунамі не можна вважати ефективним. Звичайно, виникнення та розповсюдження гігантської хвилі можна визначити за допомогою дистанційного зондування, але періодичність відповідних зйомок і оперативність передачі інформації не є задовільними для такого роду задач. Сучасні системи отримання та передачі космічних зображень мають оперативність від 3 до 6 год, тоді як часовий масштаб руху цунамі складає від кількох десятків хвилин до двох-трьох годин. Звичайно, такі умови не дозволяють побудувати функціональну систему завчасного попередження про небезпеку цунамі за допомогою супутниковых методів на сталому базисі.

Інший, загалом більш обґрутований підхід базується на генетичному уявленні про виникнення цунамі, тобто на статистичних моделях землетрусів. Застосування статистики землетрусів та сценарій виникнення цунамі в розрахунках ризиків дозволяє певною мірою підвищити коректність прогнозування та уточнити просторовий розподіл небезпеки виникнення катастрофічних цунамі [10]. Методи аналізу та передбачення сейсмічної небезпеки лежать за межами цього огляду, але зазначимо, що такий підхід вимагає створення та вдосконалення розгалуженої мережі пунктів сейсмічного спостереження на базі існуючих регіональних систем та створення безперервної системи координації попереджувальних заходів. Зокрема, важливим кроком можна вважати розповсюдження на інші сейсмонебезпечні території системи попередження, яка наразі існує в Тихоокеанському регіоні.

Однак з точки зору парадигми сталого розвитку, тобто створення системи, стійкої до зовнішніх збурень, найприйнятнішим є шлях аналізу наслідків. Найефективніше зменшення збитків катастрофічної події буде полягати у створенні стратегії довгострокового управління ризиками. Таким чином, ми переходимо до аналізу наслідків події та оперування відповідною статистикою. Це дозволяє нам проводити дослідження закономірностей розповсюдження цунамі в рамках методологічних підходів аналізу ризиків повеней [3].

## ВИСНОВКИ

Як свідчать дані багаторічного моніторингу [3], небезпека затоплень територій внаслідок активізації природних процесів різного походження, як кліматичних, так і геологічних (залишаючи поза

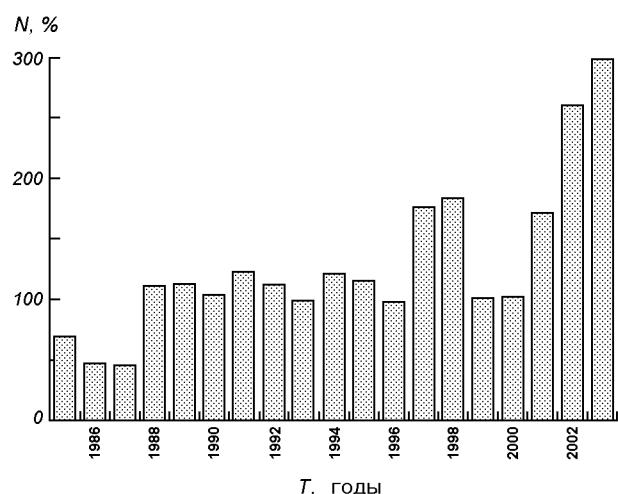


Рис. 9. Річна кількість випадків затоплення територій, включаючи наслідки цунамі, за період з 1985 до 2003 р.

увагою можливий взаємозв'язок цих феноменів, особливо цікавий в контексті дослідження глобальних змін), зростає щороку (рис. 9). Тому проблема створення масштабної системи моніторингу природних катастроф у рамках глобальної стратегії управління ризиками є вкрай актуальною. Це, зокрема, зафіксовано у міжнародній програмі GMES, спрямованій на розвиток глобальної системи моніторингу екологічної безпеки.

Крім того, потрібно визначити додаткову важливу складову. Одним із трагічних уроків цієї катастрофи стала актуальність певного перегляду існуючої системи взаємодії різних національних агенцій з контролю небезпечних природних явищ та вдосконалення глобальної системи завчасного попередження. Як показало попереднє розслідування обставин катастрофи, вчасна передача даних про наявність землетрусу, а відтак і можливість цунамі, яка могла за умов прийняття оперативних заходів врятувати більшість постраждалих, не відбулася через недосконалу координацію регіональних центрів геофізичних спостережень. З моменту зареєстрованого багатьма світовими сейсмологічними станціями першого поштовху до того, як цунамі досягло материкового узбережжя, пройшло 50–110 хв. Цього часу достатньо для часткової евакуації. Виходячи з таких міркувань, на нещодавньому самміті з питань зменшення збитків від природних катастроф прийнято рішення про створення системи завчасного попередження на базі мережі сейсмічного контролю території Індійського океану. Прототипом було обрано систему, яка функціонує в Тихому океані. Система базуватиметься на мережі датчиків на суходолі, спеціалізованих морських

бакенів, станцій збору та оперативного аналізу супутникової інформації (зокрема даних альтиметричного спостереження водної поверхні). Особливу увагу буде приділено вдосконаленню регіональної інформаційної інфраструктури.

На щастя, загроза таких катастроф, яка сталася у Південно-Східній Азії минулого року, не є актуальну для сучасної України, але, користуючись увагою світової спільноти до проблем безпеки берегових зон, наші науковці мають наголосити на необхідності концентрації зусиль на розв'язанні проблем охорони берегових смуг та розробці інтегрованих стратегій управління ризиками природних катастроф. Крім того, слід зауважити, що досвід вітчизняних фахівців у міжнародних проектах з координації космічних науково-технологічних програм може бути корисним у контексті інтеграції нашої дослідницької інфраструктури в світову систему екологічної безпеки.

Автори щиро вдячні своїм колегам з міжнародних та національних організацій NOAA, USGS, UN Office for Outer Space Affairs, DLR, Digital Globe і Страсбурзького університету за люб'язно надані матеріали. Особлива подяка Європейській асоціації лабораторій з дистанційного зондування (EARSeL) за інформаційну підтримку.

1. Дорогунцов С. І., Ральчук О. М. Управління техногенно-екологічною безпекою у парадигмі сталого розвитку. — К.: Наук. думка, 2001.—172 с.
2. Bernard E., Milburn H. Improved satellite — based emergency alerting system // J. Atmos. and oceanic technology.—1991.—8 (6).—P. 879—883.
3. Brakenridge G. R., Anderson E., Caquard S. Flood Inundation Map DFO 2003-282. — Dartmouth Flood Observatory, Hanover, USA, 2003.
4. Challenges for GIS in Emergency Preparedness and Response // ESRI White Paper, May 2000.

5. Greene R. W. Confronting Catastrophe. A GIS Handbook. — Redland, California: ESRI Press, 2003.—140 p.
6. Lyalko V. I., Kostyuchenko Yu. V., Kitchka A. A. Landscape management strategy improvement based on the remote sensing: flood risk policy in the Upper Tisza basin // Abstracts of the Second International Conf. «Interfaces Against Pollution (IAP-2002)» and NATO ARW «Role of interfaces in Environmental Protection», May 27–30, Miskolc-Lillafured, Hungary, 2002 — Univ. Miscolc Print, 2002.—P. 56.
7. Statement of guidance regarding how well satellite and in situ sensors capabilities meet WMO user requirements in several application areas // WMO Tech. Doc # 1052, SAT-26, WMO, 2001.—185 p.
8. The Use of Earth Observing satellites for Hazard Support: Assessments & Scenarios // Report of CEOS; publ. NOAA, 2003.—218 p.
9. Trudeau M. Weathering National Hazards with Information Technology // Geo Info Systems.—1998.—8 (10).—10 p.
10. Victor L., Baptista M., Simoes J. Destructive earthquakes and tsunami warning system // Terra nova.—1991.—3 (2).—P. 119—121.

---

#### SATELLITE EARTH OBSERVATION SYSTEMS APPLICATION FOR THE NATURAL CATASTROPHES MONITORING: AN ANALYSIS OF THE SOUTHERN-EAST TSUNAMI IMPACT

V. I. Lyalko, Yu. V. Kostyuchenko, M. V. Yuschenko,  
Yu. H. Bilous

The capabilities of Earth Observation Systems for the natural disaster monitoring are discussed as the case study of tsunami in Southern-East Asia in December 2004. On the basis of satellite information investigation, the remote sensing techniques role and place in the natural disaster monitoring are demonstrated. The directions of remote sensing data utilization in the framework of preparing actions, disaster monitoring and long-term risks strategy development are framed. The remote sensing information needs of the management systems for the tsunami risks and coastal zones security are determined. Some methodological approaches to forecasting and long-term managing of the tsunami and inundation risks are proposed.