

L. Rudenko, V. Khan, V. Kukhar

#### MIGRAION OF RADIOACTIVE NUCLIDES FROM "COVER" OBJECTS

Scientific fundamentals of liquid radioactive waste products and transuranian elements purification

#### S u m m a r y

Failure on the ChNPP caused a series of fundamental and applied problems. New information presented confirms the substantial role of a solid phase with the size of 0,1–1 micrometers and colloid particles (micro par-

ticles) in the mechanism of a transfer of radionuclides from the «Cover» industrial site in superficial layers of soil and in ground water. The new purification method of contaminated water wastes is offered which enables to remove an organic matter and transuraniums by oxidization with hydrogen peroxide and potassium permanganate in combination with a ultrafiltration on polymeric or inorganic membranes with the size of pore 0,05–0,10 micrometers. The developed oxidization purification is recommended for implementation on ChNPP.

В. ЛЯЛЬКО, О. САХАЦЬКИЙ, З. ШПОРТЮК, О. СИБІРЦЕВА, А. ХОДОРОВСЬКИЙ, О. АЗІМОВ

## «ЗЕЛЕНИЙ ЩИТ» ПРОТИ РАДІОНУКЛІДІВ

Класифікація рослинного покриття зони відчуження ЧАЕС за даними багатозонального космічного знімання

*Рослинність відіграла величезну роль для локалізації токсикантів у зоні аварії на Чорнобильській АЕС, зазнавши впливу радіоактивного забруднення. Тому для екологічних досліджень у цій зоні дуже важливий контроль стану рослинності. Його методологія ґрунтується на вивченні спектральних характеристик рослинності в різних спектральних каналах. Контроль екологічного стану довкілля здійснено з використанням багатоканальних зображень супутникових сенсорів, одержаних різними супутниками в 1980–1998 рр. Розглянуто два питання: оцінення впливу радіоактивного забруднення на стан рослинності (класифікація рослинних спільнот) та її фітосанітарний стан. Результати наземних польових досліджень використано для проведення пробних вимірів та підтвердження даних, отриманих за допомогою космічного знімання.*

© ЛЯЛЬКО Вадим Іванович. Член-кореспондент НАН України. Доктор геолого-мінералогічних наук. Директор Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі НАН України.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч. Кандидат геолого-мінералогічних наук. Провідний науковий співробітник відділу енергомасообміну в геосистемах цієї установи.

ШПОРТЮК Зіновія Михайлівна. Кандидат фізико-математичних наук. Старший науковий співробітник відділу енергомасообміну в геосистемах цієї установи.

СИБІРЦЕВА Оксана Миколаївна. Молодший науковий співробітник відділу енергомасообміну в геосистемах цієї установи.

ХОДОРОВСЬКИЙ Артур Якович. Кандидат геолого-мінералогічних наук. Старший науковий співробітник відділу енергомасообміну в геосистемах цієї установи.

АЗІМОВ Олександр Тельманович. Кандидат геолого-мінералогічних наук. Старший науковий співробітник відділу енергомасообміну в геосистемах цієї установи.

Після трагічних подій 26 квітня 1986 року на Чорнобильській АЕС Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України виконав важливу роботу з контролю радіоекологічної ситуації в зоні відчуження ЧАЕС аерокосмічними методами [1]. На початку роботи з ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи були створені оперативні наукові групи, що здійснювали традиційні наземні гідрогеолого-геофізичні дослідження. Однак, враховуючи високий рівень радіоактивного забруднення території, потрібно було як із погляду безпеки для операторів, так і для підвищення ефективності робіт перейти до дистанційних вимірювань. Доцільність використання матеріалів дистанційного знімання земних утворень у різних спектральних діапазонах для оцінення впливу радіоактивного забруднення на рослинність зумовлена тим, що, по-перше, таке знімання убезпечує персонал від наземного опромінення і, по-друге, дозволяє контролювати радіоактивне забруднення рослинності набагато оперативніше й економічніше. Обов'язкові під час подібних досліджень калібрувальні роботи на наземних тестових ділянках, площа яких зазвичай не перевищує кількох відсотків площі досліджуваної території [1].

Традиційні аерогамаспектрометричні знімання в межах зони відчуження ЧАЕС проведено вже в перші місяці після аварії. Згодом їх неодноразово повторювали, відтворюючи картину перерозподілу сумарної радіоактивності внаслідок процесів міграції та розподілу радіонуклідів.

В Інституті геологічних наук НАН України і згодом у створеному при ньому Центрі аерокосмічних досліджень Землі спеціально розроблено теоретико-методичні основи й проведено комплекс експериментальних і технологічних досліджень із виявлення механізмів впливу радіонуклідів на спектральну яскравість рослин. Уперше було

встановлено, що для доз опромінення понад 5 Гр характерне зміщення спектральних яскравостей у спектрах відбиття рослин унаслідок впливу радіонуклідного випромінювання на хлорофіл, який забезпечує процеси фотосинтезу. З огляду на цей феномен ми виконали картування зони відчуження ЧАЕС за ступенем радіонуклідного впливу на рослини на основі дешифрування матеріалів авіаційних і космічних багатозональних зніманий у видимому діапазоні спектра електромагнітних хвиль [2]. Крім того, було створено й успішно застосовано такі аерокосмічні методики: контроль вологості ґрунтів і глибин залягання ґрунтових вод; виявлення проникних розломних зон і ділянок, через які можливе потрапляння радіонуклідів у підземні води; пошук ділянок, придатних для захоронення радіоактивних відходів (РАВ); виявлення пунктів тимчасової локалізації РАВ [3].

У поданій статті пропонуємо класифікацію рослинного покриву зони відчуження ЧАЕС за даними багатозонального космічного знімання. Як відомо, одним із пріоритетних напрямів досліджень у Європі за програмою глобального моніторингу довкілля та безпеки (GMES) є картування та моніторинг землекористування і наземного покриву, важливим складником якого є рослинний покрив. Своєчасна і надійна інформація про стан наземного рослинного покриву необхідна як для потреб лісового та сільськогосподарства, так і для оцінення стану довкілля, яке зазнає неперервних змін, спричинених комбінацією техногенних, соціально-економічних та кліматичних процесів.

Дистанційне зондування Землі за допомогою супутникових сенсорів є відповідним інструментом для тривалого моніторингу рослинного покриву величезних за площею територій, як наприклад Європа, навіть у важкодоступних і небезпечних для життя людини районах (гірські масиви, зона відчуження ЧАЕС).

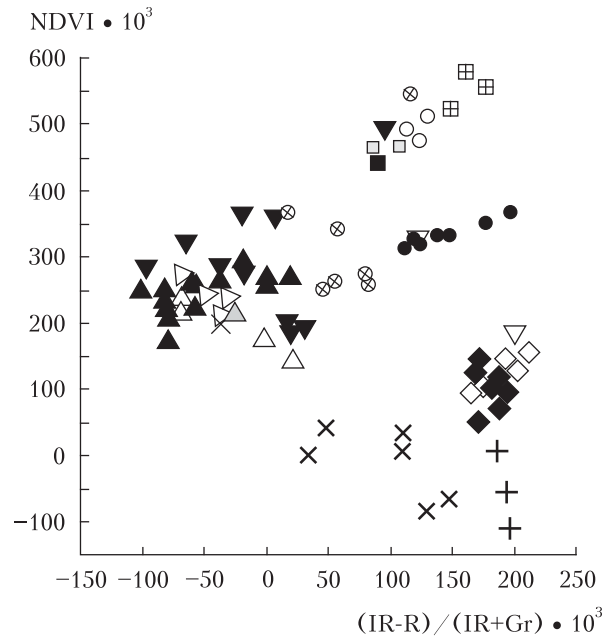


- |   |  |
|---|--|
| ■ вода  | □ заліснення перелогів та заболочених територій луки |
| ■ соснові ліси                                  | □ пісок, відкритий ґрунт, промайданчики ЧАЕС         |
| ■ листяні ліси                                  | □ тестова ділянка, див. рис. 3 та 4                  |
| ■ соснові ліси, пошкоджені сосновим шовкопрядом |  |

Рис. 1. Схема класифікації рослинності в зоні відчуження ЧАЕС

Лісові екосистеми, які мають значний вплив на людське суспільство, зазнають різноманітних деструктивних впливів як природних, серед яких провідну роль відіграє масове розмноження комах-шкідників, так і антропогенних факторів. Тому моніторинг лісового покриву, як однієї з найважливіших і динамічних компонент наземних екосистем, належить до пріоритетних напрямів використання даних супутникових спостережень.

Для контролю лісового покриву в зоні відчуження ЧАЕС використано дані космознімання супутника SPOT-4 (Франція) від 14.07.1998 р. у чотирьох каналах: зеленому (GR) у діапазоні 500–590 нм; черво-



- △ – соснові ліси віком більше ніж 60 років; ▲ – соснові ліси віком 30–60 років; ▷ – соснові ліси віком 15–30 років; ▽ – соснові ліси віком до 15 років; ▼ – ліси з переважанням сосни; × – соснові ліси, пошкоджені сосновим шовкопрядом; ⊞ – ліси з переважанням вільхи; ■ – ліси з переважанням дуба; ○ – ліси з переважанням берези віком понад 15 років; □ – ділянки перелогів із залісненням березою віком до 15 років; ⊗ – мішані соснові та листяні ліси; ● – мішані листяні ліси; + – згарища; ◇ – рослинність на перелогах; ◆ – рослинність заплавних земель.

Рис. 2. Діаграма розподілу значень індексів для різних рослинних угруповань

ному (RED) – 610–680 нм; у ближньому інфрачервоному (NIR) – 790–890 нм і в середньому інфрачервоному – 1600–1750 нм. Просторове розрізнення космознімка становить 20 м. Площа огляду – 60х60 км<sup>2</sup>, що покриває більшу частину зони відчуження.

Початкові сигнатури виділених класів об'єктів були утворені на основі наземних досліджень лісів зони: 65 тестових ділянок використано для характеристик основних типів рослинних спільнот. Виділено сигнатури 21-го класу рослинних і природних об'єктів. Проведено оцінювання сигнатур цих класів з метою забезпечення надій-

Табл. 1. Опис стану та статистичних характеристик спектральних яскравостей сосни на досліджуваних ділянках у зоні відчуження ЧАЕС

N	Коротка назва класу	Спектральні діапазони (ум. од.)						Кількість спектрів	Значення REP (нм)
		Gr (500–590)		Red (610–680)		NIR (790–890)			
		Середнє*	Стандарт**	Середнє*	Стандарт**	Середнє*	Стандарт**		
1	Сосна середнього віку	54.33	1.48	38.86	2.02	68.10	8.10	6930	719
2	Молода сосна	57.33	2.16	43.22	3.10	69.37	6.30	693	719
3	Посадка сосни	64.16	1.46	49.60	1.87	97.29	3.24	129	725
4	Сосна в несприятливих умовах	55.38	3.27	41.63	4.56	59.84	8.41	667	716
5	Сосна, уражена губкою	56.36	2.01	42.75	3.58	59.98	8.05	1492	716
6	Сосна, пошкоджена шовкопрядом	58.62	1.78	48.49	2.65	49.93	5.06	1103	707
7	Поновлення сосни слабке	66.57	2.99	56.81	4.21	81.17	9.58	3466	722
8	Мішані соснові ліси	52.53	1.36	35.33	1.42	101.83	13.45	1028	728

\* – середнє значення,

\*\* – стандартне відхилення.

Примітка: умовні одиниці спектральної яскравості космознімка в градаціях від 0 до 255.

ності прогнозування результатів різноманітних методів класифікації. Установлено, що найбільш прийнятним методом класифікації наявних даних є метод максимальної вірогідності. Це підтвержено як даними наземних польових спостережень, так і даними інших дослідників. Результати проведеної класифікації рослинності зони відчуження наведено на рис. 1.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

а) усі методи найкраще виділяють: сосну звичайну віком понад 30 років; сосну звичайну віком 15–30 років; сосну звичайну, пошкоджену сосновим шовкопрядом; лис-

тяні ліси різної структури досить надійно відокремлюються від соснових;

б) метод максимальної вірогідності точніший для класифікації листяних лісів із переважанням окремих видів. За його допомогою успішно визначено ліси з переважанням вільхи і насадженнями білої акації, насадженнями берези віком до 15 років, листяні ліси з переважанням берези;

в) менш надійно визначено такі класи: листяні ліси з переважанням дуба та осики, які можна деколи віднести до лісів із переважанням берези; спалені ділянки погано відділяються від перелогових земель; рослинність заплавлених ділянок річок подеку-

А

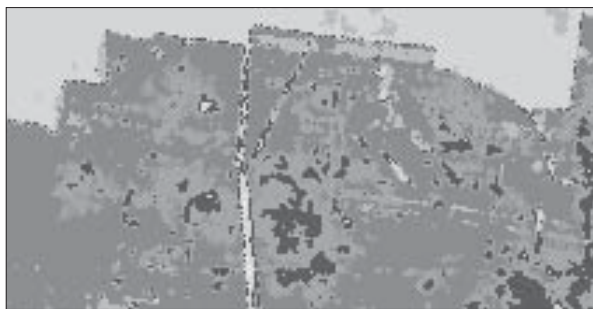


Рис. 3. Фрагмент класифікованого знімка для тестової ділянки (А)

Умовні позначення для зображення (А)

- перелоги
- сосна звичайна віком 15–30 років;
- сосна звичайна віком понад 30 років;
- сосна, пошкоджена сосновим шовкопрядом (початкова стадія);
- сосна, пошкоджена сосновим шовкопрядом.

ди не відрізняється від рослинності перелогових земель; сади погано відрізняються від насаджень білої акації, тому їх було об'єднано в один клас.

Необхідно відзначити, що одержані результати класифікації здебільшого позитивні.

Крім того, для виділення класів рослинності використано подібний до NDVI нормальний індекс I, який визначаємо за спектральними яскравостями в середньому інфрачервоному IR та в зеленому GR-каналах:

$$I = (IR - GR) / (IR + GR).$$

Для оцінювання інформаційності індексів NDVI та I побудовано діаграму (рис. 2), на якій зображено 16 класів рослинності та їхніх сукупностей. Дані польових спостережень слугували основою для віднесення рослинності до окремого класу. Модальні значення спектральної яскравості в кожному каналі використано для обчислення індексів.

Б

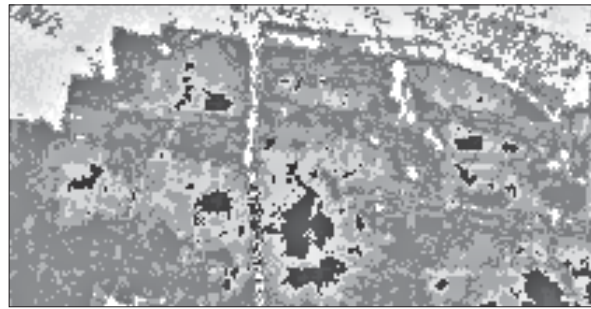


Рис. 4. REP-зображення тестової ділянки (Б)

Умовні позначення для зображення (Б)

- значення REP більше за 728 нм;
- REP – 725–728 нм;
- 722–725 нм;
- 719–722 нм;
- 716–719 нм;
- 713–715 нм;
- менше ніж 713 нм.

Аналіз діаграми показав, що з 16 класів, використаних для пробних вимірів, досить чітко визначено 8. Це такі класи: соснові ліси; соснові ліси, пошкоджені сосновим шовкопрядом; мішані ліси, у складі яких є соснові та листяні дерева; мішані листяні ліси з переважанням дуба, берези та вільхи; природні і штучні насадження берези та акації; згарища; рослинність на перелогових землях і в заплавах річок.

Штучні і природні насадження сосни віком до 15 років значно відрізняються від соснових лісів. Відзначено зростання індексів у системі дуб–береза–акація–вільха. Ділянки соснових лісів, пошкоджених сосновим шовкопрядом, відрізняються від усіх класів соснових лісів. Ділянки згарищ можна краще визначити за індексами, ніж за спектральними яскравостями. Таким чином, дослідження засвідчили, що вегетаційні індекси NDVI та I дають корисну інформацію для класифікації рослинності разом із значеннями спек-

тральних яскравостей. Згадані методи використано для визначення санітарного стану соснових лісів і природної пожежної небезпеки території зони відчуження. Визначено екологічний стан соснових лісів цієї зони: пошкодження сосновим шовкопрядом і кореневою губкою, зміни гідрологічного режиму. Ці фактори відбито в спектральних характеристиках рослинності, зафіксованих на знімку.

З метою покращення тематичної інтерпретації космічних знімків запропоновано новий метод визначення аналога позиції червоного краю (RER) спектрометричної кривої, побудованої на основі апроксимації даних SPOT-4 в GR, RED і NIR-каналах [4]. Аналог RER визначено для 8 тестових ділянок лісу із здоровою та пошкодженою рослинністю в зоні відчуження ЧАЕС. Середнє значення яскравостей пікселів у кожному каналі й для кожної тест-ділянки було визначено для обчислення RER. Результати наведено в таблиці 1.

Розроблена методика визначення RER застосована для попиксельного оброблення космознімків SPOT-4, дозволяє будувати RER-зображення рослинного покриву. Приклад побудови RER-зображення для тест-ділянки соснового лісу, виділеної на космознімку (рис. 1), для зіставлення результатів індикації фітосанітарного стану за значеннями RER та за результатами класифікації за станом ураження наведено на рисунках 3 та 4.

Зіставлення результатів індикації фітосанітарного стану соснового лісу за двома незалежними методиками свідчить про потенційну можливість виявлення пошкоджених лісових ділянок за значеннями RER, отриманими за даними космознімання. Таким чином, отримано новий інструмент для індикації вегетаційного стресу та моніторингу фітосанітарного стану хвойних лісів зони відчуження ЧАЕС за даними космознімання.

1. *Малиновський Б.М.* Академік Борис Патон — праця на все життя. — К.: Наук. думка, 2002. — С. 262—264.
2. *Lyalko V.I., Sakhatsky A., Sportjuk Z.M.* et al. Heavy Metal and Radionuclide Contamination of the Soils and vegetation within the Chernobyl Danger Zone Using Remote sensing Data // Proceedings of the XVIII th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. — Vienna, Austria. — 1996. — Vol. XXXI. — Part B7, Commission VII. — P. 454—459.
3. *Лялько В.И., Сахацький А.И.* Использование аэрокосмических данных при построении моделей энергомассообмена в геосистемах для оценки водообмена в геологической среде и радиоэкологического мониторинга // Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Часть 2. Моделирование водообмена и миграции радионуклидов в гидрогеологических структурах. — К.: ИГН НАН Украины, НИЦ РПИ, 2000. — С. 414—447.
4. *Шпортюк З.М., Сибірцева О.М.* Нова методика визначення зсувів позиції «червоного краю» за даними космознімків КА SPOT-4 // Нові методи в космічному землезнавстві. — К.: ЦАКДЗ ІГН НАНУ, 1999. — С. 113—116.

*В. Лялько, О. Сахацький, З. Шпортюк,  
О. Сибірцева, А. Ходоровський, О. Азімов*

#### «ЗЕЛЕНИЙ ЩИТ» ПРОТИ РАДІОНУКЛІДІВ

Класифікація рослинного покриву зони відчуження ЧАЕС за даними багатозонального космічного знімання

#### Резюме

У результаті проведених досліджень установлено, що всі рослинні спільноти в зоні відчуження Чорнобильської АЕС зазнали впливу радіонуклідів. Найбільші зміни виявлено в соснових лісах. Класифікація за даними космічного знімання дозволила визначити 21 клас рослинності в зоні відчуження. Результати підтверджено наземними дослідженнями.

*V. Lyalko, O. Sakhatsky, Z. Sportyuk,  
O. Sibirtseva, A. Hodorovsky, O. Azimov*

#### «GREEN SHIELD» AGAINST RADIOACTIVE NUCLIDES

Classification of Chernobyl APP exclusion zone plants as per multizone space photography data

#### Summary

As a result of investigations, it has been detected, that all vegetation communities in Chernobyl APP exclusion zone were influenced by radionuclides. The most evident changes are observed for pine forests. The 21 classes of vegetation were classified using satellite data. The results are confirmed by ground truth investigations.