

## ВПЛИВ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ НА РОСЛИННИЙ ПОКРИВ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЙ

В.П. Ландін<sup>1</sup>, О.Г. Тищенко<sup>1</sup>, В.В. Гуреля<sup>2</sup>, Т.Л. Кучма<sup>3</sup>, В.П. Фещенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України (м. Київ, Україна)

e-mail: vlad\_land@ukr.net; ORCID:0000-0003-4612-3682

e-mail: 634444@ukr.net; ORCID:0000-0002-4116-2220

<sup>2</sup> Поліський національний університет (м. Житомир, Україна)

e-mail: gurelya.v@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8283-0152

<sup>3</sup> Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: tanyakuchma@gmail.com; ORCID: 0000-0002-9328-5919,

e-mail: mr\_yp@i.ua

*Наведено результати оцінювання впливу пожеж на рослинний покрив території зони відчуження ЧАЕС і зони безумовного обов'язкового відселення (ЗВ і ЗБОВ), природно-заповідника «Древлянський» засобами дистанційного зондування Землі за період з 1986 до 2020 рр. Зазначено, що на забруднених аварійними викидами Чорнобильської АЕС територіях, природна рослинність відіграє роль стабілізатора радіоекологічної ситуації. За стабільних процесів сукцесії винесення речовин за межі ландшафту практично відсутнє і значно зменшує вторинне забруднення прилеглих територій радіонуклідами. Запропоновано методологію і критерії оцінки стану рослинного покриву засобами дистанційного зондування Землі і методами геоінформаційних технологій. Порівнянням космічних знімків території зони відчуження і зони безумовного обов'язкового відселення за 1986, 1999, 2013, 2017, 2018, 2019, 2020 рр., тобто за термін 34 роки після аварії, встановлено істотні зміни в стані земель, які належали до лісових і сільськогосподарських угідь. Виявлено зміни меж водних об'єктів різної спрямованості внаслідок: осушення штучних водойм, зміни напрямку русла річок, заболочування меліоративних каналів і суміжних до них ділянок лісу, зміни стану лісів внаслідок пошкодження пожежами, накопичення сухих лісових матеріалів, проведення лісовпорядкувальних заходів. Зазначено також, що за спектральними даними космічних знімків добре відстежуються ділянки лісу, ушкоджені шкідниками. За час, який минув після аварії, сільськогосподарські землі категорії рілля перейшли у перелogi з природним поновленням дерев, а пасовища та сіножаті у природні луки із зміною видового складу трав'янистих рослин. Отримано карту просторового розподілу ушкодженої пожежею рослинності, яка містить: типи рослинних угруповань (біоценоз), тип насаджень лісу (хвойний, листяний, мішаний) та трав'янистої рослинності, ступінь ушкодження, їх площу, часові терміни пожежі.*

**Ключові слова:** рослинний покрив, лісові пожежі, згарища, природне поновлення рослинності, дистанційне зондування Землі, геоінформаційні технології.

### ВСТУП

На забруднених аварійними викидами Чорнобильської АЕС територіях, природна рослинність відіграє роль стабілізатора радіоекологічної ситуації. Радіонукліди, які випали на земну поверхню з плином часу включаються в біологічний кругообіг, депонуються в органах і тканинах рослин, а також у лісовій підстилці. За стабільної сукцесії винесення речовини за межі ланд-

шафту практично відсутнє, що запобігає вторинному забрудненню радіонуклідами прилеглих територій [1]. Порушення цього процесу збільшує підйом аерозольних частинок із поверхні землі. Хвойні ліси є найкращим природним фільтром, але саме цей тип лісу найбільш уразливий в разі пожежі. Верхові пожежі найчастіше знищують великі ділянки хвойного лісу.

Згідно з фізико-географічним районуванням України зони відчуження ЧАЕС (далі ЗВ) і зони безумовного обов'язкового

відселення (далі ЗБОВ) та природного заповідника «Древлянський» відносяться до Центрального Полісся з характерними для цієї природної зони ландшафтними особливостями [2]. Юридичний статус цих територій визначений Постановою КМ України від 23 липня 1991 р. № 106.

На момент аварії територія зони відчуження становила 240,6 тис. га. До того ж, 151 тис. га, або 62,8% сягали землі лісового фонду вкриті лісовою рослинністю, а 60,4 тис. га земель — не вкриті лісовою рослинністю, з них 56,3 тис. га. — сільськогосподарські угіддя, а решту займали землі водного фонду, територія Чорнобильської АЕС, промислові майданчики та урбанізовані території [3].

Природний заповідник «Древлянський» організований у 2011 р. за Указом президента України в межах виведених із користування сільськогосподарських угідь агропідприємств Народицького р-ну Житомирської обл. (13,99 тис. га) та частини земель лісового фонду (16,88 тис. га) ДП «Народицьке спеціалізоване лісове господарство».

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

До 1986 р. ландшафти на території зони відчуження і безумовного відселення мали складну структуру. В населених пунктах та на незначних відстанях від них, угіддя поділялися на городи, де вирощували овочеві культурні рослини на родючих ґрунтах, кормові угіддя: з культурними травами — на сіножатях та покращених пасовищах, а на добре забезпечених вологою ділянках розміщалися пасовища з природними трав'янистими видами. За час, який минув після аварії сільськогосподарські землі, рілля перейшли у категорію перелогів із зміною видового складу рослин. Культуровані види рослин доволі швидко були витіснені природними [4]. На суходільних луках, приурочених до сухіших і бідніших ґрунтів, домінують формації костриці червоної (*Festuca rubra*), пирію повзучого (*Elytrigia repens*), тонконогу вузьколистого (*Poa angustifolia*), мітлиці тонкої (*Agrostis*

*tinuis*). У біоценозах низинних заболочених форм рельєфу переважають осоки (*carex*) та водоболотна рослинність.

Після аварії на ЧАЕС зміни в рослинному покриві та об'єктах природокористування у зоні відчуження відбувалися в двох напрямках — деструктивному та поновлювальному. У зв'язку з припиненням агровикористання на землях, які були зайняті ріллею, почали формуватися перелоги. Дослідженнями трав'янистого покриву у зоні відчуження встановлено, що трав'янисті асоціації за типами розділилися на запланні природні луки та суходільні луки (перелоги) — з чіткою залежністю від гіпсометричного рівня місцевості [5; 6].

Нині для вивчення структури рослинного покриву ефективними засобами є використання даних дистанційного зондування землі (далі ДЗЗ). Порівняння космічних знімків ЗВ і ЗБОВ за 1986 і 1999 рр., тобто за 13 років після аварії свідчить про істотні зміни в стані територій, які належали до лісових земель і сільськогосподарських угідь. З використанням матеріалів космічної зйомки були створені векторні картографічні шари структури підстильної поверхні та рослинного покриву, що фіксували стан території на відповідний момент часу. За цей період зникла мозаїчність текстури знімка, характерна для ділянок із агровикористанням. На знімках фіксувалися зміни меж водних об'єктів внаслідок осушування водойм, зміни напрямку русла річок, заболочування території меліоративних каналів із прилеглими до них ділянками лісу, зміни стану лісів внаслідок пошкодження пожежами та зрубами. Також на мультиспектральних космічних знімках добре виявляються ушкоджені шкідниками ділянки лісу.

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження стану екосистем на території зони відчуження проведено на основі геосистемного підходу та картографічних методів. Як інструментарій були використані програмні пакети для геоінформаційного аналізу — ArcGIS та MapInfo.

Засоби та інструментарій ArcGIS дають можливість проводити аналіз даних, поєднуючи різні шари картографічної інформації з точністю у відповідності до визначеного масштабу: карти річкових басейнів та їх структурних елементів, шари ґрунтів і рослинності за даними космічної зйомки, і таким чином, виявляти місцеположення, характерні для різних типів рослинних угруповань.

Для вивчення типу та стану рослинності існує декілька видів даних дистанційного зондування це: застосування мультиспектральних знімків земної поверхні в комбінаціях зон різних довжин спектра електромагнітного випромінювання та вегетаційних індексів [7–10]. Комбінація спектральних зон утворює контрастне кольорове зображення (для супутника Landsat просторове розрізнення — 30–60 м, для Sentinel — 10–20 м), таким чином, знімок містить дешифрувальні ознаки: текстуру та спектральну яскравість об'єктів на Земній поверхні, що визначена в діапазоні шкали з 255 кольорів. Індекси отримують за виразами, отриманими зіставленням відбивальної здатності об'єктів земної поверхні у різних зонах спектра [11; 12].

Для виділення області дослідження була створена векторна карта меж Чорнобильської зони відчуження, яка узгоджена із картографічним зонуванням згідно з Постановою КМУ від 1991 р. № 106. За картографічними даними площа її становила — 2182 км<sup>2</sup>, що порівняно з даними «Атласу. Україна. Радіоекологічне забруднення» мало похибку приблизно — 82 км<sup>2</sup> [13]. Така похибка дає можливість використовувати векторну версію картографічного шару для аналізу стану території.

Метою роботи була розробка методології застосування засобів дистанційного зондування Землі та розробка критеріїв для виявлення і оцінки впливу пожеж на стан рослинності на забруднених радіонуклідами територіях Центрального Полісся, тобто зони відчуження Чорнобильської АЕС та природного заповідника «Древлянський».

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Антропогенний вплив на об'єкти навколишнього середовища (ЗВ і ЗБОВ), спрямований переважно на покращення їх стану і пов'язаний з діяльністю наукових, науково-виробничих та обслуговуючих організацій, які працюють у рамках програм із мінімізації наслідків Чорнобильської аварії.

Прикладом негативного впливу на об'єкти довкілля є нелегальна туристична діяльність та самовільне проживання людей у відселених населених пунктах зони відчуження. Такі явища підвищують ризики деструктивного впливу на рослинність, зокрема, на виникнення пожеж, які відносяться до факторів прямої дії, тобто факторів, пов'язаних із фізичним знищенням рослин [14].

У зоні відчуження ЧАЕС за період з 1986 до 1999 рр. площа лісів пошкоджених унаслідок лісових пожеж досягла 18,9 тис. га. Найбільша площа насаджень пройдених пожежами — близько 3 тис. га нараховувалася в Опачицькому лісництві ДП «Чорнобильська Пуща». Під час лісових пожеж знищується не лише деревна рослинність, а також трав'яна і чагарникова рослинність, що складають лісові екосистеми загалом. Це зумовлює зміни видового складу рослинності на пройдених лісовими пожежами територіях.

У наших дослідженнях лісові насадження, пошкоджені пожежами, були виділені за мультиспектральними знімками та з використанням індексу NDVI. Як відомо, останній для пригніченої рослинності приймає низькі значення [7–9]. На космічному знімку за 1986 р. ділянка була вкрита корінним лісом, а на період 1999 р., за розрахованим індексом NDVI, який становив — менше 0,25, ділянка віднесена до класу пригніченого рослинного покриву. Знищення пожежею цієї ділянки лісу підтверджуються науковими публікаціями [15; 16].

Вивчення космічних знімків Землі із застосуванням технології порівняльного аналізу за різні періоди часу: 2013, 2017, 2018, 2019, 2020 рр. дало змогу визначити

особливості структури території, а також виявити зміни, що відбулися в межах області дослідження. Інформація з опублікованих джерел, дала можливість пояснити структурні зміни рослинного покриву зони відчуження, що сталися після аварії [3–6; 16].

Наразі основними природними комплексами зони відчуження є хвойні й мішані ліси, суходільні і перезволожені луки, біоценози боліт та водно-болотних угідь. Просторова структура рослинного покриву зони відчуження має досить строкату структуру. Векторна карта об'єктів підстильної поверхні та рослинного покриву зони відчуження станом на 2017 р., створена з використанням даних дистанційного зондування, яку наведено на рис. 1.

Аналіз наведеної карти дає змогу зробити висновок, що в складі рослинних комплексів у зоні відчуження домінують ліси, територія вкрита деревною рослинністю тут сягає 65,6%, а 34,4% віднесено до неокритих лісовою рослинністю земель, які заняті водними об'єктами, суходільними і заплавленими луками, болотними й водно-

болотними екотопами та об'єктами інфраструктури підприємств ЗВ. Згідно з матеріалами лісовпорядкування 2017 р. площа лісових насаджень у ЗВ сягає 194,2 тис. га [16]. Дані щодо розподілу площі деревної рослинності у лісництвах зони відчуження подано в табл. 1.

Аналіз породного складу лісів зони відчуження за даними обстежень ДСП «Північна пуща» 2017 р. свідчить, що в складі лісів (див. табл. 1) площа листяних насаджень коливається у межах 22,1–60,7%, а хвойних – від 39,3 до 77,9%. Тобто в складі лісів зони відчуження переважають потенційно пожежонебезпечні насадження. Це спричиняє необхідність забезпечення постійного моніторингу санітарного стану лісів, підвищення пожежної стійкості лісів та оперативного реагування лісової охорони і ДСНС зони відчуження у разі виникнення пожеж.

Зважаючи на те, що радіонукліди  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  – біологічно активні елементи, які значною мірою визначають забруднення рослинності та мають вплив на формування дози зовнішнього і внутрішнього

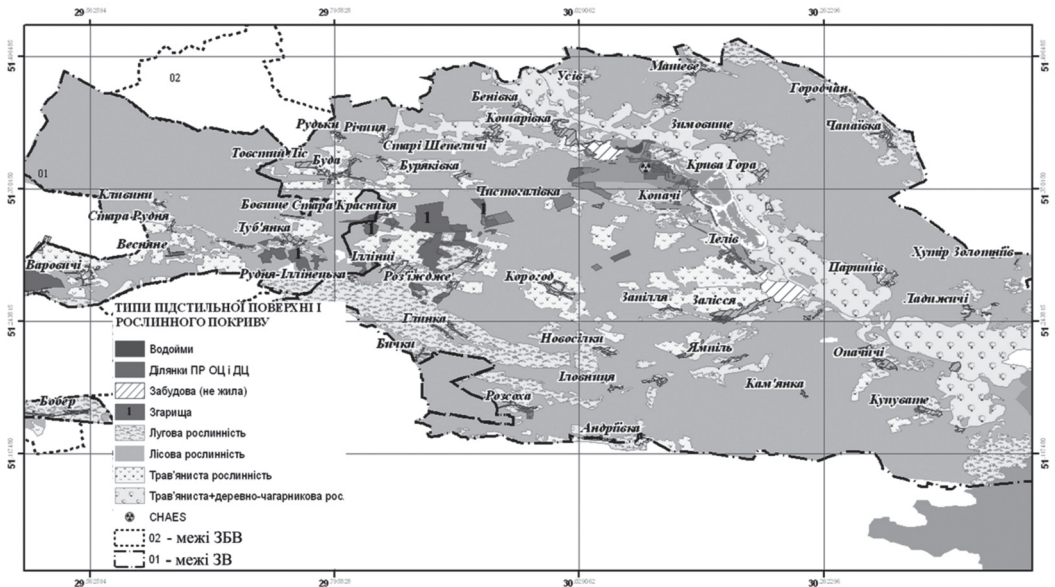


Рис. 1. Карта об'єктів підстильної поверхні та рослинності ЗВ, 2017 р. (1 – ділянки згарищ 2015–2017 рр.)

Таблиця 1. Розподіл площі лісів у зоні відчуження, станом на 2017 р.

Лісництво	Площа, га /%			
	Загальна	Лісових насаджень	Листяних насаджень	Хвойних насаджень
Денисовецьке	16416,0	12360,6/75,3	5478,4 /44,3	6882,2 /55,7
Луб'янське	48612,8	29808,5/61,3	13399,3 /45,0	16409,2 /55,0
Паришівське	46789,0	29729,9 /63,5	18051,4 /60,7	11678,5 /39,3
Корогодське	32569,0	20990,9 /64,5	4641,2 /22,1	16270,6 /77,9
Котовське	3626,0	1386,8 /38,2	801,2 /57,8	585,6 /42,2
Дитятківське	18612,0	14406,1 /77,4	3830,3 /26,6	10575,8 /73,4
Опачицьке	27588,0	18797,7 /68,1	5756,6 /30,6	13041,1 /69,4
Усього, га	194212,8	127480,5 /65,6	51157,4 /40,1	75443,0 / 59,9

опромінення людини. Рослинність у зоні відчуження, особливо ліси на території з високими рівнями забруднення, активно впливають на біогеохімічну міграцію радіоактивних речовин і виконують роль біогеохімічних бар'єрів на шляху міграції радіонуклідів [5–7].

Екологічне значення лісів пов'язано також із збереженням ґрунтів, і таким чином, із нівелюванням ерозійних процесів, зниженням вітрового підйому радіоактивних речовин, що підтверджено великою кількістю наукових публікацій [15; 17–19].

Такі показники, як лісистість (відношення площі вкритої лісовою рослинністю до загальної площі зони відчуження) і стійкість лісової рослинності щодо захворювань та ураження шкочинними комахами, відображають стан захищеності території від дії вітру й критичність до ураження пожежами. Найбільш розповсюдженою деревною породою у зоні відчуження є сосна, яка від загальної площі лісових насаджень становить 59,1%. Насадження берези повислої в лісах за розповсюдженням посідають друге місце.

За час після аварії, виведені з використання сільськогосподарські угіддя й територія нежилых населених пунктів природним шляхом заросли деревними видами та чагарниками. Ліси і перелоги зони відчуження і зони гарантованого відселення, доволі часто, піддаються впли-

ву пожеж. Згідно з даними [15] за період 1992–2018 рр. площа лісів і перелогів, пройдених пожежами, досягла 37,7 тис. га. Лише навесні 1992 р. пожежею було пройдено 17,0 тис. га території. Великі за площею пожежі на радіоактивно забрудненій території зумовлюють загрозу вторинного забруднення території радіонуклідами, в зоні і за межами зони відчуження, і докорінно змінюють характер рослинності та підстильної поверхні, знижуючи тим самим, шорсткість поверхні. Критичними з пожежестійкості та радіоекологічної точок зору є насадження сосни звичайної, оскільки соснові ліси уражаються грибовими захворюваннями та шкідниками, зокрема, короїдами, що підвищує ризики виникнення пожеж і, як наслідок, вторинного забруднення території. У той самий час, відомо, сосна добре пристосовується до різних екологічних умов і може рости на ґрунтах із низьким вмістом поживних речовин, наприклад, на піщаних ґрунтах.

Весняні лісові пожежі 2020 р. у природному заповіднику «Древлянський» і в Чорнобильській зоні відчуження та обов'язкового відселення вперше були зафіксовані 02 квітня. За даними осередків вогню NASA [20], за перший тиждень квітня 2020 р. утворилися дві великі ділянки, охоплені вогнем на віддалі 60 та 16 км і три невеликі осередки у 30 км на південь від ЧАЕС. З 02 по 17 квітня пожежа на



ділянці, що охопила перелоги і лісові масиви ЗВ, ЗДОВ, природного заповідника «Древлянський» та землі лісового фонду ДП «Народицьке спеціалізоване лісове господарство», просунулася у північно-східному напрямку до кордону з Білоруссю, вогонь на території в межах 15 км від ЧАЕС розповсюдився майже до майданчика ЧАЕС, охоплюючи правобережну частину та південну прибережну ділянку водойми охолоджувача. З 16 до 29 квітня вогонь охоплював луки у заплаві та хвойний ліс на лівому березі р. Прип'ять.

Аналіз та оцінка uszkodження рослинного покриву внаслідок лісових пожеж за даними супутникових спостережень. З метою оцінки uszkodження пожежами рослинного покриву було оброблено і проаналізовано серію космічних знімків для території дослідження. Для порівняння і аналізу підібрані знімки за період до і після uszkodження території пожежами. Обробка вхідних даних, розробка тематичних картографічних шарів та їх аналіз проводилися з використанням інструментів і технологій геоінформаційних систем (далі ГІС) професійних картографічних пакетів: ArcGIS, ERDAS IMAGEN та MapInfo.

Картування виконано інструментами картографічного редактора ArcGIS. Роботу проведено за такими кроками:

- оцифрування площі uszkodження від пожежі, визначеної за дешифрувальними ознаками мультиспектрального знімка Landsat 8 та за точковими векторними даними осередків вогню NASA [20];
- створення структури інформаційної таблиці векторного картографічного шару;
- визначення ступеня uszkodження за мультиспектральними знімками Landsat 8, Sentinel 2 та класифікацією за показником просторового розподілу вегетаційного індексу NDVI;
- внесення у таблицю картографічного шару атрибутивної, адресної інформації та ідентифікаційного номеру.

Для оцінки впливу пожеж були визначені такі об'єкти: природні біоценози — ліс, трав'яниста рослинність, деревно-чагарникова + трав'яниста рослинність, а також

ліс, uszkodжений пожежами у минулий період.

На процес згорання компонентів фітомаси біоценозів, окрім погодних умов, впливають запаси та структура горючих матеріалів, вегетаційний стан біоценозу, тип лісорослинних умов і ландшафтні особливості місцевості.

Дані щодо структури біопалива у різних біоценозах та типах пожежі отримані після аналізу наукової інформації за означеною тематикою [21; 22]. За отриманими даними був сформований класифікатор біопалива для досліджуваних біоценозів табл. 2.

В оцінці uszkodження екосистем від пожежі — стан рослинного покриву використовувався як індикатор [7–9]. Робочим форматом вхідних спектральних даних каналів є файл зображення \*.img. Растровий формат даних містить відомості про: картографічну проекцію, інформацію про шар зображення колір, статистику, дані про перетворення (\*.aux), шар пірамід — відомості про розрізнення даних (\*.rrd.ovr).

Роздільна здатність даних космічного знімання, а саме розмір пікселя, що несе інформацію — визначає можливість та точність дешифрування об'єктів місцевості за їх візуальним образом на геоприв'язаному зображенні земної поверхні [7]. Просторова роздільна здатність даних Landsat 8 для різних каналів становила: 30–60 м [11]. Дані Sentinel 2 мали високе розрізнення: 10–20 м [12]. Перелік каналів та їх характеристики для супутників Landsat та Sentinel, що задіяні для аналізу uszkodження рослинності наведені в табл. 3.

Аналіз даних космічної зйомки передбачав створення комбінацій різних спектральних каналів для отримання мультиспектрального контрастного кольорового зображення, що містить ознаки для дешифрування [7; 8]. До таких ознак належать форма, структура, текстура та колір об'єкта на зображенні. В обробці вхідних даних супутників Landsat та Sentinel застосовувався метод синтезування спектральних каналів різних за довжиною хвиль електромагнітного випромінювання з викорис-

Таблиця 2. Класифікатор біопалива для біоценозів визначених у карті

Назва біоценозу	Компоненти фітомаси	Тип пожежі
Ліс хвойний	Хвоя в кроні, кора хвойних порід, підстилка, хвойний опад, шишки, мох-лишайники, деревина гілок та стовбурів захаращення і сухоостою, деревина підросту, трав'янистих чагарничків	Верхова пожежа
	Хвойний опад, підстилка, мох-лишайники, деревина дрібних гілок захаращення, надземний трав'янисто-чагарничковий покрив	Низова пожежа
Ліс листяний	Сухостій трави, опад сухого листя листяних порід, підстилка, сухе листя в кроні, деревина та кора дрібних гілок захаращення і сухоостою, надземний трав'янисто-чагарничковий покрив	Верхова пожежа
	Сухостій трави, опад сухого листя листяних порід, підстилка, деревина та кора дрібних гілок захаращення	Низова пожежа
Деревно-чагарникова + трав'яниста	Сухостій трави, опад листя, деревина гілок, стовбурів та кора чагарників та молодих дерев	Верхова пожежа
	Сухостій трави, підстилка, коріння	Низова пожежа
Трав'яниста рослинність	Сухостій трави, коріння	Низова пожежа
Ліс, ушкоджений пожежею	Сухостій трави, деревина та кора дерев природного поновлення, гілки та ін.	Повторне вигорання

Таблиця 3. Канали та спектральна характеристика даних супутників Landsat 8 та Sentinel 2

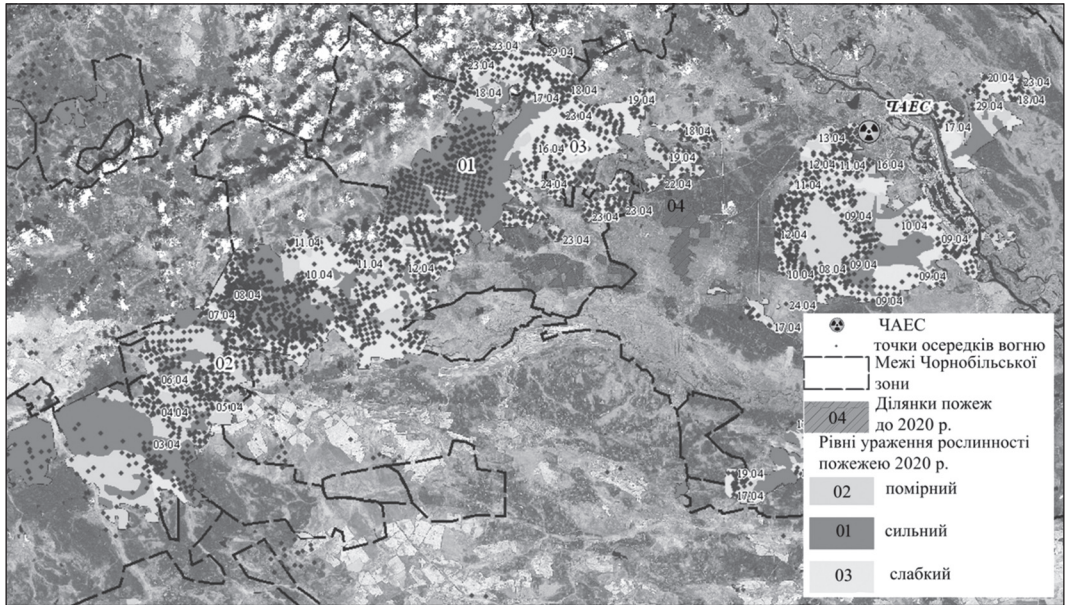
Landsat 8		Sentinel 2	
Номер каналу	Довжина хвилі, мкм	Номер каналу	Довжина хвилі, мкм
2 (Blue)	0,45–0,515	2 (Blue)	0,448–0,545
3 (Green)	0,525–0,60	3 (Green)	0,537–0,582
4 (Red)	0,63–0,68	4 (Red)	0,645–0,683
5 (NIR)	0,845–0,885	8 (NIR)	0,763–0,908
6 (SWIR)	1,56–1,66	11 (SWIR)	1,542–1,685
7 (SWIR–2)	2,10–2,30	12 (SWIR–2)	2,081–2,323

танням програмного модуля Layer Stack пакету ERDAS IMAGEN.

Модуль Layer Stack забезпечив функціональний процес поєднання спектральних даних каналів у відтінках сірого в єдине контрастне кольорове зображення досліджуваної території.

За дешифрувальними ознаками різного стану рослинності на кольоровому знімку

синтезу SWIR-NIR-RED каналів Landsat 8 та з урахуванням місцеположення точкових осередків пожеж радіометричних даних NASA супутників AQVA/TERA MODIS визначена загальна територія пройдена вогнем (рис. 2). Загальна площа, пройдена вогнем у квітні 2020 р., на території Чорнобильської зони відчуження становила – 41459 га, а зони безумовного відселення – 24814 га.



**Рис. 2.** Карта зонування за ступенем uszkodження внаслідок пожежі у квітні 2020 р.

*Примітка:* карта розроблена з використанням радіометричних даних AQVA/TERA MODIS і спектральних Landsat 8 BW.

Для виділення ділянок, пройдених пожежею, використовувалися властивості згарищ давати низькі коефіцієнти у видимій (Blue, Green, Red) та близькій інфрачервоній (NIR) зонах спектра і більш високі — у короткохвильовій інфрачервоній зоні (SWIR). У синтезі SWIR-NIR-RED згарища мають темно-рожевий до червоного колір [7; 8].

Пожежі внаслідок різної інтенсивності та швидкості проходження вогню, а також впливу заходів гасіння пожежі спричинили нерівномірне uszkodження рослинності.

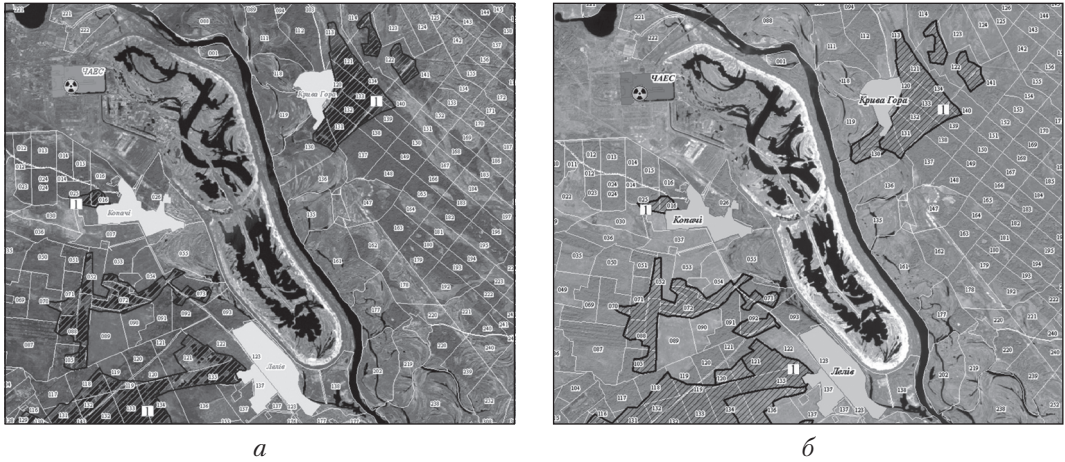
Різномасштабні супутникові знімки високої роздільної здатності дали можливість розрізнити неоднорідність структури рослинного покриву та порівняти зі станом біоценозів до пожежі. За даними Sentinel 2 за серпень–вересень 2020 р. був визначений ступінь uszkodження рослинного покриву і побудовано цифрову карту для Чорнобильської зони відчуження та безумовного відселення. На знімках кольором виділяються ділянки з відновленою і,

практично, повністю знищеною пожежею рослинністю (рис. 3).

Найбільшої шкоди завдав вогонь екосистемі хвойного лісу. Значна частина рослинного покриву у зоні мінімального ступеня uszkodження, що утворилася на початку пожежі, а саме трав'яниста рослинність і слабо uszkodжені листяні породи дерев, що були у початковій стадії вегетації, відновилися упродовж кількох місяців.

Крім різномасштабних мультиспектральних знімків для оцінки стану рослинності був використаний нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI) [7–9]. Розрахунок показника NDVI для сильно uszkodжених ділянок проводився засобами Spatial Analyst ArcGIS з використанням інструменту Алгебра растрів. На основі растрового шару NDVI побудована тематична класифікація за ступенем uszkodження рослинності територій дослідження. У табл. 4 показано інструментарій та функціональні процеси необхідні для розрахунку показника NDVI та аналізу його просторового розподілу. Спектральні дані діапазонів NIR





**Рис. 3.** Зони сильного ступеня uszkodження рослинності на знімку Sentinel 2: *a)* 1 – стан ділянок сильно uszkodжених пожежею (синтез каналів SWIR-NIR-RED серпень 2020 р.); *б)* стан ділянок 1 – до пожежі (березень 2020 р.)

та RED супутника Sentinel 2 взяті як вхідні для розрахунку вегетаційного індексу NDVI та оцінки стану рослинності після пожежі.

Результати розрахунку отримані у растровому форматі, після необхідних функціональних процедур, були переведені у векторний точковий формат із кроком 10 м і доповнені інформацією з полігонального

шару зони ступеня uszkodження рослинності. Кожна точка шару описує ділянку 0,01 га. Атрибутами у запитах до інформаційної таблиці отриманого картографічного шару були: номер зони за ступенем uszkodження від пожежі та коди біоценозів та інтервал значень NDVI. Залежно від кількості біомаси і стану рослинності значення індексу NDVI змінюється від -1 до 1.

**Таблиця 4. Інструментарій та функціональні процеси для розрахунку нормалізованого диференційного вегетаційного індексу**

Інструменти програмного пакету ArcGIS	Функціональні процеси та вхідні формати даних	Вихідні формати картографічних даних
Spatial Analyst Tools: Map Algebra	Розрахунок значень NDVI: $NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Растровий шар
Data Management Tools: Raster processing	Перетин растрових шарів NDVI з векторним шаром зонування території, Побудова тематичної класифікації за NDVI	Растровий шар
Conversion Tools: from raster	Конвертація растрового шару у векторний	Векторний точковий
Analysis Tools: Spatial Join	Об'єднання інформації векторних шарів: NDVI та зонування за ступенем uszkodження рослинності	Векторний точковий
Select by Attribute	Визначення статистичних характеристик просторового розподілу NDVI у біоценозах	Векторний точковий

Інтервал значень до 0 виділяє об'єкти без рослинного покриття. Низькі значення характеризують загиблу, пригнічену, суху рослинність [7–9].

У цьому аналізі інтервал від  $-1$  до  $0,3$  був використаний як числовий показник ушкодження рослинності від вогню. В результаті сформованого запиту вибірки значень NDVI з інтервалом від  $-1$  до  $0,3$  були виділені ділянки верхової пожежі у лісі (рис. 4).

Використання методу оверлейного аналізу картографічних даних дало змогу визначити тип рослинності, що знаходиться на ділянках пройдених пожежею. На основі даних дистанційного зондування та розроблених векторних карт розраховано площу ушкодженого рослинного покриття на ділянках пройдених пожежею. За картографічними даними площа території з сильним і помірним ступенем ушкодження

рослинності становила: в зоні відчуження  $26573$  га, з них у  $76\%$  — ушкоджений ліс, в зоні безумовного відселення —  $18399$  га, з них ліс ушкоджений у  $57\%$ . Площа заповідника «Древлянський» сильного та помірного ушкодження сягає —  $6\,251$  га, з них лісу —  $5\,502$  га.

Компонування комплексної карти ступеня ушкодження рослинного покриття внаслідок пожежі, що сталася у квітні 2020 р. у Чорнобильській зоні відчуження та безумовного відселення (див. рис. 4) проведено з використанням таких картографічних шарів: мультиспектральний знімок Landsat 8, відселені населені пункти, де фіксувалася пожежа, ділянки ушкоджені пожежею до 2020 р., тематичний шар зонування за ступенем ушкодження рослинності від пожежі у квітні 2020 р.

Тематичний шар отримано в результаті оверлейних операцій із картографічними

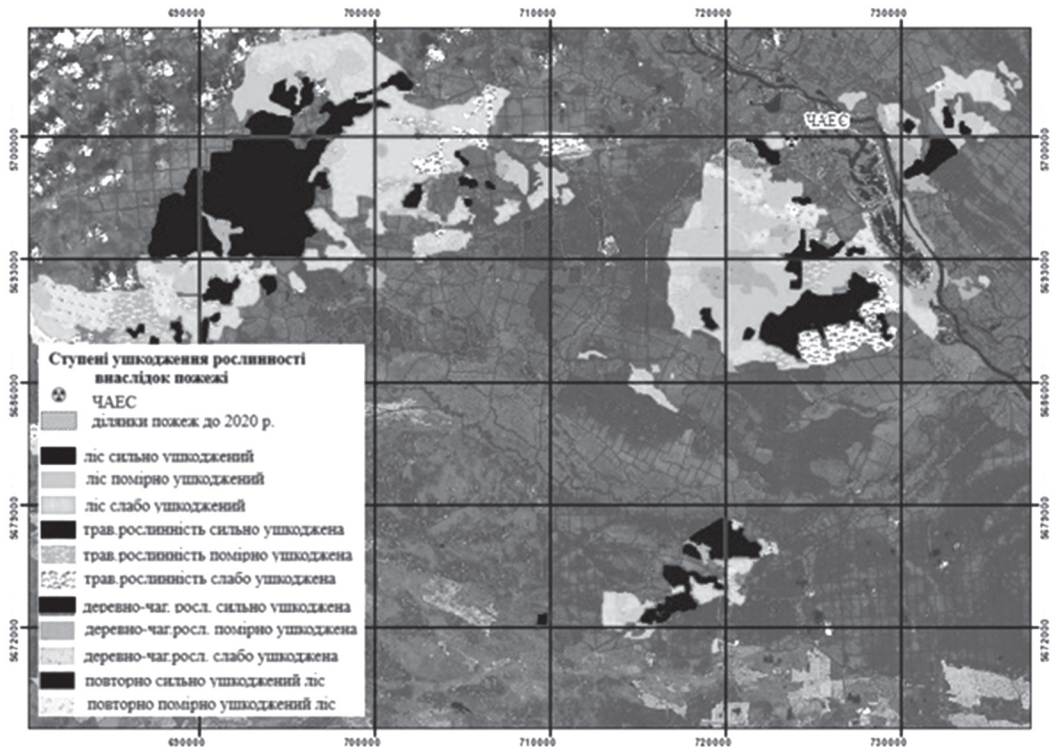


Рис. 4. Комплексна карта ступеня ушкодження рослинності ЗВ та ЗБОВ внаслідок пожежі у квітні 2020 р.

шарами: рослинності М 1:100 000, меж зон відчуження та безумовного відселення, загальної зони проходження вогню. На наступному кроці з урахуванням фенологічних фаз рослинності, за дешифрувальними ознаками різночасових супутникових даних середнього та високого розрізнення, був уточнений породний склад лісів шару рослинності й підвищена детальність карти до М 1:50 000. Картографічні об'єкти, визначені як лісова територія було розділено на категорії листяний, хвойний, мішаний та розраховано площу визначених категорій різного ступеня ушкодження.

### ВИСНОВКИ

1. На забруднених аварійними викидами Чорнобильської АЕС територіях, природна рослинність відіграє роль стабілізатора радіоекологічної ситуації. За стабільних процесів сукцесії винесення речовин за межі ландшафту практично відсутнє і значно зменшує вторинне забруднення прилеглих територій радіонуклідами.

2. Після аварії в зоні відчуження і зоні безумовного обов'язкового відселення ЧАЕС зміни в рослинному покриві та об'єктах природокористування відбувалися в двох напрямках — деструктивному та поновлювальному. Внаслідок припинення агровиробництва, сільськогосподарські землі: рілля, сіножаті і пасовища, перейшли у категорії перелогів (суходільних луків) та заплавних луків із зміною видового складу рослин. На суходільних луках приурочених до сухіших і бідніших ґрунтів домінують формації костриці червоної (*Festuca rubra*), пірію повзучого (*Elytrigia repens*), тонконо-

гу вузьколистого (*Poa angustifolia*), мітлиці тонкої (*Agrostis capillaris*). До біоценозів що відповідають низинним заболоченим формам рельєфу входять осоки та водоболотна очеретяна рослинність.

3. Для оцінки типу та стану рослинності існує декілька видів даних дистанційного зондування це: застосування мульти-спектральних знімків земної поверхні в комбінаціях зон різних довжин спектра електромагнітного випромінювання та вегетаційних індексів. Комбінація спектральних зон утворює контрастне кольорове зображення (для супутника Landsat просторове розрізнення — 30–60 м, для Sentinel — 10–20 м), таким чином, знімок містить дешифрувальні ознаки: текстуру та спектральну яскравість об'єктів на земній поверхні, що визначена в діапазоні шкали з 255 кольорів. Індекси отримують за виразами, отриманими зіставленням відбивальної здатності об'єктів земної поверхні в різних зонах спектра.

4. Для створення цифрових карт: просторової структури території пройденої пожежею в Чорнобильській зоні відчуження та безумовного відселення за 2020 р. використані дані дистанційного зондування за різні часові проміжки та розроблені засоби карти картографічних пакетів (ГІС) тематичні шари рослинного покриву зони за 2017 р. Отримана в результаті карта просторового розподілу ушкодженої пожежею рослинності містить: типи рослинних угруповань (біоценоз), тип насаджень лісу (хвойний, листяний, мішаний) та трав'янистої рослинності, ступінь ушкодження, їх площу, часові терміни пожежі.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Соботович Э.В., Бондаренко Г.М., Кононенко Л.В. Геохимия техногенных радионуклидов. Київ: Наукова думка, 2002. 332 с.
2. Маринич О.М., Олійник Я.Б., Бортник С.Ю., Гродзинський М.Д. Фізична географія України: підруч. / за ред. О.М. Маринич. Київ: Знання, 2003. 408 с.
3. Кучма М.Д., Федотов І.С., Архіпов М.П., Пастернак П.С. Еколого-лісівничі наслідки радіоактивного забруднення лісових масивів зони відчуження ЧАЕС. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 1994. Вип. 88. С. 12–18.
4. Плото П.Г., Дідух Я.П. Фітоекологічні дослідження в зоні відчуження ЧАЕС. *Проблеми Чорнобильської зони отчуждения*. 2019. Вип. 3. С. 39–48.
5. Паскевич С.А. Вынос <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs наземной фитомассой растительных сообществ лугов и залежей Чернобыльской зоны отчуждения. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2005. Вип. 45 (3). С. 281–286.
6. Кіреєв С.І. та ін. Радіаційний стан на території зони відчуження у 2012 році. *Проблеми Чорнобильської зони відчуження*. 2013. Вип. 11. С. 18–38.

7. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учеб. пособ. Пермь, 2020. 191 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-nie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>
8. Кохан С.С., Востоков А.Б. Дистанційне зондування Землі. Теоретичні основи. Київ: Вища школа, 2009. 510 с.
9. Лялько В.І., Попова М.О. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування: моногр. / за ред. В.І. Лялько. Київ: Наукова думка, 2006. 360 с.
10. Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л. Агроекологічний супутниковий моніторинг. Київ: Аграрна наука, 2019. 204 с.
11. Imagery Digital data LANDSAT. URL: <https://landlook.usgs.gov/landlook/viewer.html> (дата звернення: 01.06.2020).
12. Imagery Digital data SENTINAL-2 BANDS. URL: <https://eos.com/landviewer> (дата звернення: 01.06.2020).
13. Атлас. Україна. Радіоактивне забруднення. Київ: Наукова думка, 2006. 53 с.
14. Мусієнко М.М. Екологія рослин. Київ: Либідь, 2006. 432 с.
15. Борсук О.А. Природна пожежна небезпека основних лісів зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення ЧАЕС. *Науковий вісник НУБіП України*. 2011. Вип. 164 (3). С. 71–79.
16. ДСКП «Північна Пуща». Таксаційний опис земельних ділянок лісового фонду станом на 01.01.2017 року: текст. 2017. 1 електрон. опт. диск.
17. Василенко І.Я. Радіоактивний цезій-137. Радіобіологія. Москва: Природа, 1999. № 3. С. 70–76. URL: <http://www.techno.ru/vivovoco>.
18. Свириденко В.Є., Бабіч О.Г., Швиденко А.Й. Лісова пірологія. Київ: Агрпромоввидавництво України, 1999. 172 с.
19. Давидчук В.С. и др. Ландшафты Чернобыльской зоны и их оценка по условиям миграции радионуклидов. Киев: Наукова думка, 1994. 111 с.
20. Данные радиометрических измерений NASA. URL: [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_V1\\_163064.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_V1_163064.zip), [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_J1V-C2\\_163063.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_J1V-C2_163063.zip), [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_M6\\_163062.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_M6_163062.zip) (дата звернення: 01.08.2020).
21. Погребняк П.С. Общее лесоводство. Москва: Колос, 1968. 440 с.
22. Мелехов И.С. Лесная пирология. Москва: МЛТИ, 1983. 60 с.

## REFERENCES

1. Sobotovich, E.V., Bondarenko, G.M. & Kononenko, L.V. (2002). *Geokhimiya tekhnogenykh radionuklidov [Geochemistry of technogenic radionuclides]*. Kyiv [in Russian].
2. Marynych, O.M. (Ed.), Oliinyk, YA.B., Bortnyk, S.YU. & Hrodzyns'kyi, M.D. (2003). *Fizychna heohrafiya Ukrainy [Physical geography of Ukraine]*. Kyiv [in Ukrainian].
3. Kuchma, M.D., Fedotov, I.S., Arkhipov, M.P. & Pasternak, P.S. (1994). Ekologo-lisivnychi naslidky radioaktyvnoho zabrudnennia lisovykh masyviv zony vidchuzhennia CHAES [Ecological and forestry consequences of radioactive contamination of forest massifs in the Chernobyl Exclusion Zone]. *Lisivnytstvo i ahrolisomeliioratsiia — Forestry and Agroforestry*, 88, 12–18 [in Ukrainian].
4. Pliuta, P.H. & Didukh, YA.P. (2019). Fitoekologichni doslidzhennia v zoni vidchuzhennia CHAES [Phytocological research in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant]. *Problemy Chernobyl'skoy zony otchuzhdeniya — Problems of the Chernobyl Exclusion Zone*, 3, 39–48 [in Ukrainian].
5. Paskevich, S.A. (2005). Vynos 90Sr i 137Cs nadzemnoy fitomassy rastitel'nykh soobshchestv lugov i zalezhey Chernobyl'skoy zony otchuzhdeniia [Removal of 90Sr and 137Cs by the aboveground phytomass of plant communities of meadows and fallow lands of the Chernobyl exclusion zone]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya — Radiation biology. Radioecology*, 45 (3), 281–286 [in Russian].
6. Kirieiev, S.I. et al. (2013). Radiatsiyniy stan na terytorii zony vidchuzhennia u 2012 rotsi [Radiation state in the exclusion zone in 2012]. *Problemy Chornobyl's'koi zony vidchuzhennia — Problems of the Chernobyl Exclusion Zone*, 11, 18–36 [in Ukrainian].
7. Shykhov, A.N., Gerasimov, A.P., Ponomarchuk, A.I. & Perminova, Ye.S. (2020). *Tematicheskoe deshifirovanie i interpretatsiya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostanstvennogo razresheniya [Thematic interpretation and interpretation of space images of medium and high spatial resolution]*. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> [in Russian].
8. Kokhan, S.S. & Vostokov, A.B. (2009). *Dystantsiine zonduvannia Zemli. Teoretychni osnovy [Remote sensing of the Earth. Theoretical foundations]*. Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].
9. Lyalko, V.I. (Ed.) & Popova, M.O. (2006). *Bahatospektral'ni metody dystantsiynoho zonduvannia Zemli v zadachakh pryrodokorystuvannia: monohrafiia [Multispectral methods of remote sensing of the Earth in nature management problems]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
10. Tarariko, O.H., Syrotenko, O.V., Il'ienko, T.V. & Kuchma, T.L. *Ahroekologichnyi suputnykovyi monitorynh [Agroecological satellite monitoring]*. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].



11. Imagery Digital data LANDSAT. URL: <https://landlook.usgs.gov/landlook/viewer.html> [in English].
12. Imagery Digital data SENTINAL-2 BANDS. URL: <https://eos.com/landviewer> [in English].
13. Atlas Ukraina. Radioaktyvne zabrudnennia [Atlas Ukraine. Radioactive contamination]. (2006). Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
14. Musiienko, M.M. (2006). *Ekolohiia Roslyn [Ecology of plants]*. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].
15. Borsuk, O.A. (2011). Pryrodna pozhezhna nebezpeka sosnovykh lisiv zony vidchuzhennia ta zony bezumovnoho (obov'iazkovoho) vidselennia CHAES [Natural fire danger of pine forests of the exclusion zone and the zone of unconditional (mandatory) resettlement of the Chernobyl NPP]. *Naukovyi visnyk Natsional'noho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy — Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 164 (4), 71–79 [in Ukrainian].
16. Taksatsiinyi opys zemel'nykh dilianok lisovoho fondu stanom na 01.01.2017 roku [Taxation description of land plots of the forest fund as of 01.01.2017] [in Ukrainian].
17. Vasylenko, Y.YA. (1999). Radioaktivnyy tseziy-137 [Radioactive cesium–137]. *Radyobiohyya — Radiobiology*, 3, 70–76. URL: <http://www.techno.ru/vivovoco> [in Russian].
18. Svyrydenko, V.YE., Babich, O.H. & Shvydenko, A.Y. (1999). *Lisova pirolohiia [Forest pyrology]*. Kyiv: Ahropromvydavnytstvo Ukrainy [in Ukrainian].
19. Davydchuk, V.S. et al. (1994). *Landshafy Chernobyl'skoy zony i ikh otsenka po usloviyam migratsii radionuklidov [Landscapes of the Chernobyl zone and their assessment by the conditions of migration of radionuclides]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
20. Dani radiometrychnykh vymiryuvan' NASA [NASA radiometric measurement data] (2020). URL: [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_V1\\_163064.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_V1_163064.zip), [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_J1V-C2\\_163063.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_J1V-C2_163063.zip), [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_M6\\_163062.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_M6_163062.zip) [in Russian].
21. Pogrebnyak, P.S. (1968). *Obshcheye lesovodstvo [Overall forestry science]*. Moscow: Kolos [in Russian].
22. Melekhov, I.S. (1983). *Lesnaya pirologiya [Forest pyrology]*. Moscow: MLI [in Russian].

Стаття надійшла до редакції журналу 09.10.2020

---