

**С. Г. СИДОРЕНКО****ПОЖЕЖНІ РЕЖИМИ ЛАНДШАФТІВ ЛІВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ***Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького*

У зв'язку з глобальним потеплінням і збільшенням посушливості клімату ризик частота виникнення та площі лісових та інших ландшафтних пожеж залишаються високими. Одним зі способів зменшення ризиків виникнення таких пожеж є визначення науково обґрунтованих обсягів заходів протипожежної профілактики на найуразливіших територіях. Оцінено горимість різних типів ландшафтів Лівобережного Лісостепу. Обчислено площі пожеж у ландшафтах регіону за період 2006–2020 рр. Визначено пожежні піки для різних типів ландшафтів. Виявлено тенденції до збільшення пожежної небезпеки та щільності виникнення пожеж у природних ландшафтах залежно від стану рослинності, зокрема проходження фенологічних фаз її основними типами. Підтверджено залежність між усередненими індексами вегетації для місяців упродовж пожежонебезпечного періоду та часткою ландшафтних пожеж. Створено мапу частоти виникнення ландшафтних пожеж у Лівобережному Лісостепу з умовним виділенням зон за ризиком їхнього виникнення.

**Ключові слова:** щільність ландшафтних пожеж, пожежна небезпека ландшафтів, горимість ландшафтів, часові тенденції природних пожеж, просторові тенденції природних пожеж.

**Вступ.** У зв'язку з глобальним потеплінням і збільшенням посушливості клімату ризик збільшення частоти й масштабів лісових та інших ландшафтних пожеж залишається високим (Sydorenko & Sydorenko 2020). Пожежі є одним із найбільш небезпечних екологічних факторів, що завдають катастрофічних економічних, екологічних і соціальних збитків.

Наразі в Україні практично не визначено жодних методичних підходів до комплексного оцінювання пожежної небезпеки ландшафтів і характеристики їхніх пожежних режимів. В Україні пожежну небезпеку визначають виключно для окремих ділянок лісового фонду, тривалий час у фокусі наукової спільноти перебували тільки лісові пожежі, хоча відомо, що значна їхня кількість виникає поза лісом, поширюючись на лісові масиви з інших типів ландшафтів. Лише окремі публікації присвячено спробам оцінювання пожежної небезпеки у відкритих ландшафтах (Sorokina & Petrov 2020). Низку публікацій науковців Східно-Європейського центру моніторингу пожеж також присвячено розбудові ефективної стратегії управління природними пожежами (Zibitsev et al. 2019). Швидко розвиваючись, ландшафтна пожежа здатна створювати нові джерела горіння та пошкоджувати у стислі строки значні площі природних екосистем. Білоруськими вченими оцінено високі ризики виникнення торф'яних пожеж на локаціях із високою щільністю ландшафтних пожеж (Tymoshkov 2018).

Крім того, пожежі в природних екосистемах потрапляють до статистичного обліку лише за умови, якщо до боротьби з ними були залучені сили та засоби Державної служби України з надзвичайних ситуацій та лісової охорони. Таким чином, більшість природних пожеж лишаються поза увагою. З огляду на це наразі практично безальтернативним засобом збору статистичних даних щодо ландшафтних пожеж є методи дистанційного зондування Землі.

Для дослідження ландшафтних пожеж та їхніх режимів в останнє десятиліття широко застосовують дані продуктів MODIS, Sentinel та Landsat (Shynkarenko 2017). Створені на основі продуктів Sentinel та Landsat, мапи типів земного покриву (land cover) і типів землекористування (land use) слугують додатковими індикаторами для ідентифікації того чи іншого ландшафту та відправними точками оцінювання пожежних ризиків у них.

Важливість забезпечення інформаційної підтримки щодо локалізації центрів горимості дасть змогу ефективніше реагувати на можливі загрози та раціонально планувати протипожежні заходи. Використання ландшафтного підходу для оцінювання ризиків виникнення природних пожеж забезпечить ці переваги. Пожежі часто виникають поза лісами, швидко поширюючись на території лісових масивів та трансформуючись із низових до неконтрольованих, особливо великих верхових пожеж. Тому аналіз пожежних режимів конкретних територій є першим кроком для розбудови ефективної стратегії управління природними пожежами. Комплексна система охорони лісу від пожеж під час проведення

протипожежних профілактичних заходів та під час моніторингу виникнення пожеж упродовж пожежонебезпечного періоду має враховувати також пожежні ризики на суміжних територіях, що визначаються типом ландшафту, антропогенною складовою (щільність населення, близькість до населених пунктів й об'єктів інфраструктури тощо) та особливостями проходження фенологічних фаз найпоширенішою рослинністю.

*Метою роботи* є попереднє оцінювання просторового та часового розподілу ландшафтних пожеж і пожежних режимів переважних типів ландшафтів у Лівобережному Лісостепу України.

**Матеріали й методи.** За відсутності географічно орієнтованих даних щодо ландшафтних пожеж в Україні для їхнього обліку використано методики та дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Для цієї цілі обрано продукти, які забезпечує сенсор MODIS (Giglio et al. 2018). Найвні системи дистанційного моніторингу кілька разів на добу проводять знімання поверхні Землі з метою виявлення термальних аномалій та активних пожеж. Водночас визначають координати загорання, фіксують дату й час, коли зроблено супутниковий знімок. Така інформація відіграє важливу роль у відтворенні просторового розподілу історії пожеж (Zibitsev et al. 2019).

Доступність даних, одержаних сенсорами MODIS, сприяла розробленню різнопланових продуктів тематичної обробки. Серед них MCD45A1 та MCD64A1 є продуктами пошкоджених вогнем територій з роздільною здатністю 500 м (Giglio et al. 2018).

Регіоном дослідження є Лівобережний Лісостеп у межах, виділених згідно з комплексним лісогосподарським районуванням України (Gensiruk, 2002). За даними про термальні аномалії для території Лівобережного Лісостепу одержано інформацію щодо випадків пожеж, які зафіксовано сенсорами MODIS упродовж 2006–2016 рр. Кожне спрацювання системи відповідно до алгоритму MODIS MOD14/MYD14 Fire and Thermal Anomalies є так званою «гарячою точкою» (hotspot), яка відображає координати центру пікселя  $1 \times 1$  км, де зафіксовано загорання (Zibitsev et al. 2019).

Під час дослідження виконано аналіз горимості території з урахуванням усіх природних пожеж – лісових, сільськогосподарських, торф'яних, випалювання пасовищ тощо. Для аналізу використано методи та дані ДЗЗ. Дані про термальні аномалії FIRMS (роздільна здатність – 1 км), де розглядали «гарячі точки» з імовірністю пожежі понад 30 %, проаналізовано для кожного із 6 588 днів періоду 2002–2020 рр. Для оцінювання поточного стану трав'яної рослинності та виявлення ознак її усихання й відмирання впродовж пожежонебезпечного періоду використано вегетаційні індекси (normalized difference vegetation index – NDVI). Для відображення індексу NDVI використано стандартизовану безперервну градієнтну шкалу, що показує значення в діапазоні від -1 до +1. Значення NDVI, менші за 0, свідчать про відсутність вегетації (живої рослинності), збільшення індексу від 0 до 1 свідчить про збільшення густоти та щільності живої біомаси рослинності. В основу розрахунків індексу покладено застосування нормалізованої різниці між мінімумом і максимумом відбиття в певному спектрі. NDVI обчислено за формулою (1) (Tarpley et al. 1984):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (1)$$

де RED та NIR – значення відповідних пікселей на зображеннях, отриманих у видимій (червоній) та ближній інфрачервоній ділянках спектра.

Відповідно до цієї формули, щільність рослинності (NDVI) у певній точці зображення дорівнює різниці інтенсивностей відбитого світла в червоному та інфрачервоному діапазонах, поділеній на їхню суму (Tarpley et al. 1984). Для побудови тематичних шарів із усередненими растровими даними за десятирічний період для кожного місяця використано дані продуктів MOD13C2 MODIS (Didan 2015).

Для статистичного аналізу геопросторових даних використано стандартні засоби QGIS та мову програмування R. Оцінювання горимості ландшафтів проведено за авторськими скриптами з використанням стандартних бібліотек R та деяких додаткових модулів (*raster*, *rgdal*, *sf*). Розрахунки горимості ландшафтів, зокрема лісів, виконано за стандартними в пірології методиками, детально описаними в попередніх публікаціях (Sydorenko & Sydorenko 2020). Щільність пожеж у цьому випадку визначалася кількістю випадків на кожні 1 000 га досліджуваного типу ландшафту, а горимість – площею пожеж на 1 000 га відповідного типу ландшафту.

**Результати та обговорення.** Виявлено, що часовий розподіл лісових та інших ландшафтних пожеж у Лівобережному Лісостепу суттєво різняться (рис. 1).

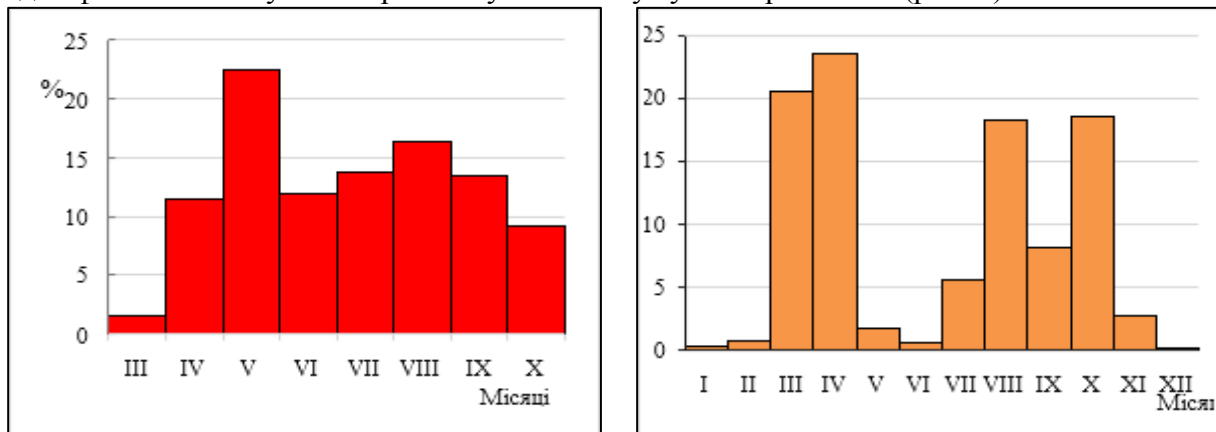


Рис. 1 – Розподіл кількості випадків лісових пожеж за місяцями (ліворуч) та розподіл ландшафтних пожеж за даними MODIS (праворуч) за місяцями за 2006-2020 рр.

Для лісових пожеж відзначено два піки горимості – травень і серпень. Натомість для пожеж у відкритих ландшафтах ці піки є виразніше визначеними. Причиною є відмінності в типах, кількісних і якісних характеристиках рослинних горючих матеріалів. Весняний максимум розпочинається з кінця лютого, коли сходить сніговий покрив. У цей період відмерлий торішній живий надґрунтовий покрив, який є легкозаймистим горючим матеріалом, швидко висихає та набуває пірологічної стиглості. Пожежна небезпека ландшафтів зберігається до кінця квітня – початку травня, коли накопичується достатня фітомаса молодого живого надґрунтового покриву, яка містить значну кількість вологи і відіграє роль бар'єра для поширення й виникнення пожеж. Таким чином, від середини травня до середини липня в ландшафтах Лівобережного Лісостепу рівень пожежної небезпеки є найнижчим. Після проходження фенологічних фаз рослинність у травостоях висихає, а пожежна небезпека, починаючи від середини липня, знову підвищується.

Беручи до уваги розбіжності в природних і кліматичних умовах ландшафтів Лівобережного Лісостепу, їхньому просторовому розміщенні та відмінності у соціально-економічному розвитку окремих регіонів на його території, проведено аналіз виникнення пожеж у контексті горимості ландшафтів і часового розподілу пожеж упродовж досліджуваного періоду. Аналіз кількості випадків природних пожеж в екосистемах за період 2006–2020 рр. виявив, що найбільша їхня кількість припадає на 2007–2008 та 2014–2015 рр. Значна кількість пожеж у 2007 та 2008 рр. (у сумі за два роки понад 12 тис випадків) пов'язана з посушливими умовами, які були характерними для більшої частини України впродовж пожежонебезпечного періоду у ці роки. У середньому впродовж 2006–2020 рр. за рік виникає близько 3,5 тис ландшафтних пожеж (рис. 2).

Визначено, що ландшафтні пожежі найчастіше виникають у південній і південно-східній частинах Лівобережного Лісостепу (див. рис. 2).

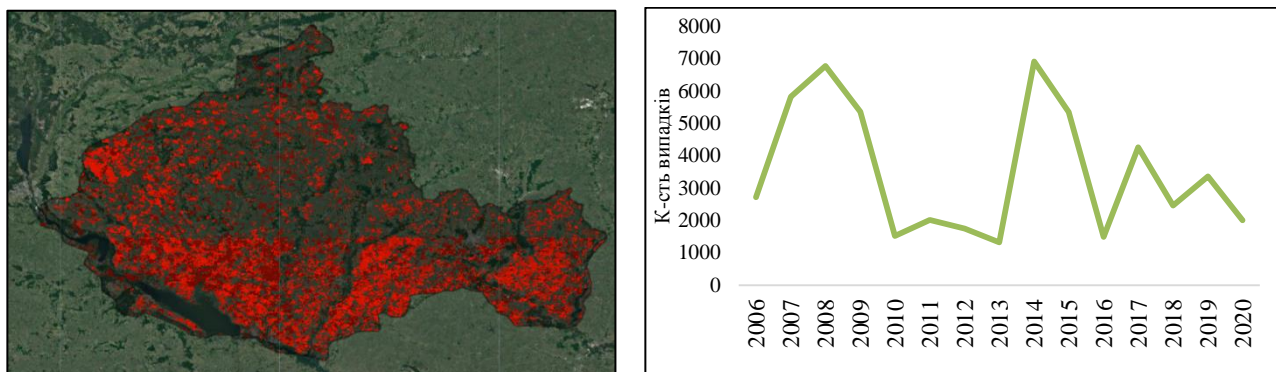


Рис. 2 – Площа та кількість ландшафтних пожеж у Лівобережному Лісостепу впродовж 2006–2020 рр.

Щорічно в природних екосистемах Лівобережного Лісостепу пошкоджується від 104 до 810 тис. га земель (рис. 3). У середньому на рік пожежі пошкоджують понад 350 тис. га природних та антропогенно змінених екосистем.

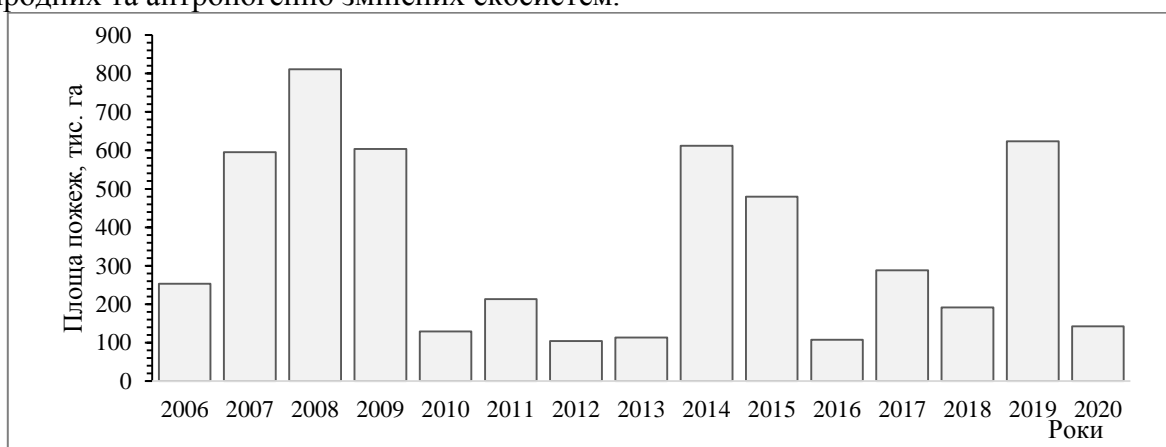


Рис. 3 – Площа ділянок, пройдена ландшафтними пожежами в Лівобережному Лісостепу

Найбільшу площу пожеж зафіксовано у 2008 р. – 810,4 тис. га, у 2014 та 2019 рр. площа, пройдена вогнем, перевищувала 610 тис. га. Значні площі ландшафтів також було пошкоджено впродовж 2009 р. – 603,4 тис. га та 2007 р. – 595,3 тис. га.

У структурі ландшафтних пожеж переважають пожежі на сільськогосподарських землях (сільськогосподарські пали) – понад 69 % випадків. Значна частка пожеж виникає в рідколіссях із переважанням травостоїв (13 %) (рис. 4).

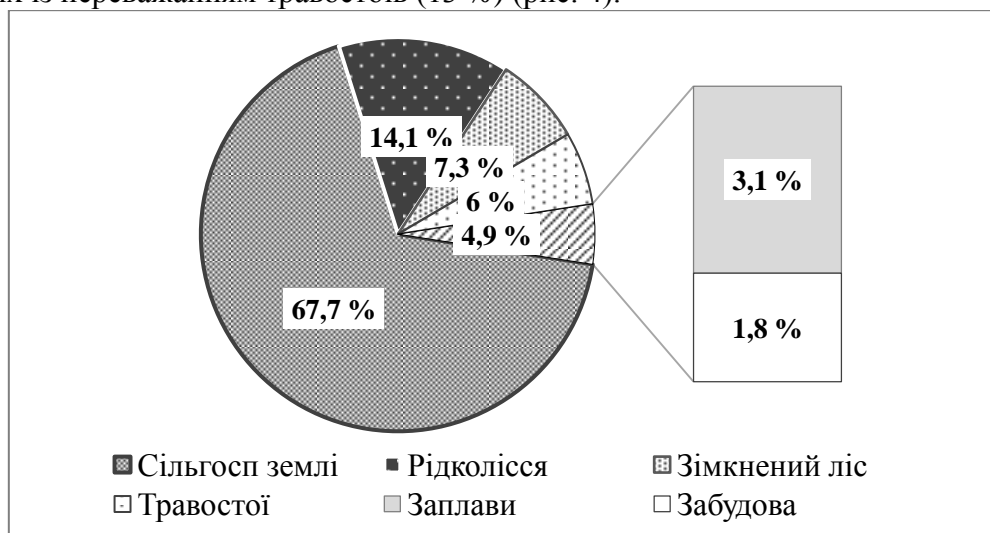
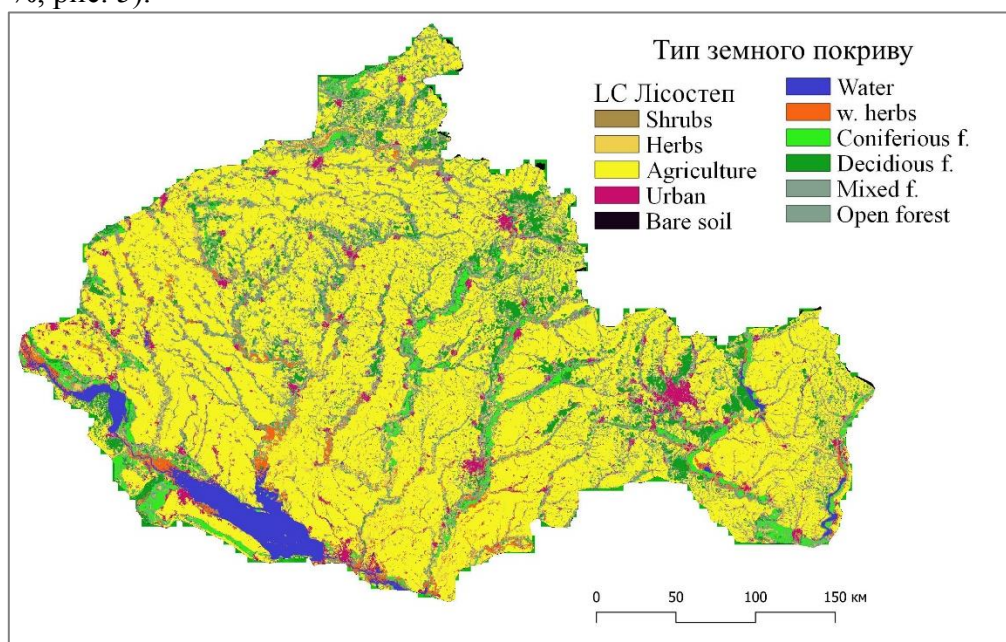


Рис. 4 –Розподіл ландшафтів Лівобережного Лісостепу за кількістю випадків пожеж

Більшість ландшафтних пожеж виникають на сільськогосподарських угіддях – 67,7 %. На ландшафти з переважанням травостоїв (луки та сіножаті) припадає 6,0 % ландшафтних пожеж, на ліси (деревоостани із зімкненістю намету понад 0,6) – 7,3 %, на умовне рідколісся – 14,1 % (ділянки земної поверхні із зімкненістю намету менше ніж 0,6). На забудови (населені пункти тощо) припадає близько 1,8 % пожеж. Таким чином, більшість пожеж (близько 90 %) виникають за межами лісу, в ландшафтах, що межують із ним. Такий розподіл пожеж свідчить про необхідність забезпечення додаткових профілактичних протипожежних заходів у лісових масивах, що межують із відкритими типами ландшафтів (створення додаткових мінералізованих смуг на межі урочищ, формування та догляд за пожежостійкими узліссями тощо).

У ландшафтах Лівобережного Лісостепу переважають сільськогосподарські угіддя (понад 58 %, рис. 5).



**Рис. 5 – Типи земної поверхні Лівобережного Лісостепу України (shrubs – чагарники; herbs – травостої; agriculture – с/г угіддя; urban – забудова; bare soil – ґрунтовий покрив із відсутністю рослинності; water – водні об'єкти; w. herbs – болотяна рослинність; coniferous f. – хвойні ліси; deciduous f. – листяні ліси; mixed f. – мішані ліси; open forest – рідколісся)**

Зважаючи на нерівномірний розподіл території Лівобережного Лісостепу за типами ландшафтів, було проведено нормалізацію даних і розрахунки горимості в переведенні на 1000 га кожного з типів поверхні (табл. 1).

Виявлено, що розподіл пожеж за місяцями для різних груп ландшафтів суттєво різниться. Виняток становлять розподіли пожеж для зімкненого лісу та рідколісся; травостоїв і заплав. Ці дві пари ландшафтів не мають статистично достовірних відмінностей, тому їх виділено в дві групи: ліс і травостій (рис. 6).

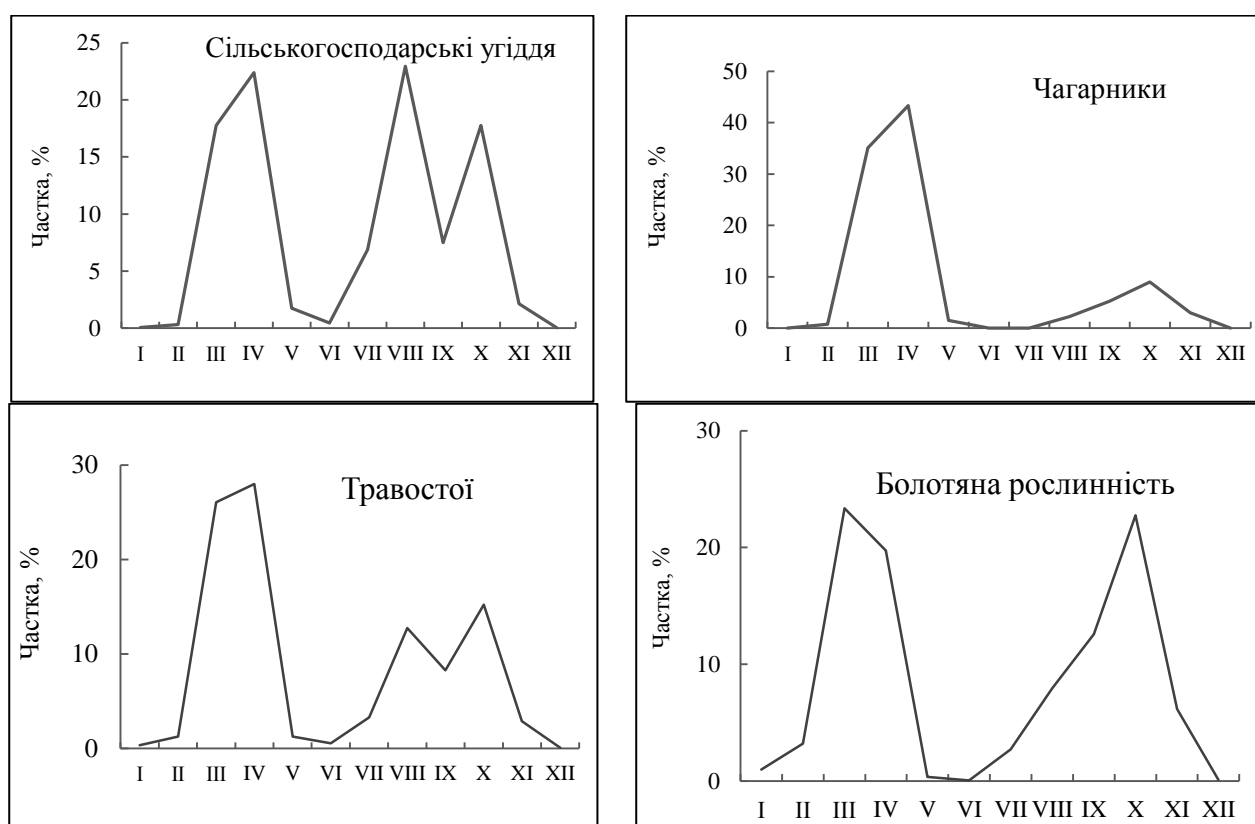
Упродовж пожежонебезпечного періоду на сільськогосподарських землях зазвичай формуються три піки горимості: весняний (березень-квітень), літній (серпень) та осінній (жовтень), коли виникають 56, 12 та 15 % пожеж відповідно. Для степових ландшафтів зі значною часткою чагарників чітко прослідковуємо лише один – ранньовесняний пік горимості (березень-квітень), коли виникають понад 78 % пожеж. Ландшафти з переважанням степової та лучної рослинності мають подібний до сільськогосподарських земель розподіл пожеж, але на відміну від сільськогосподарських земель у травостоях частіше виникають ранньовесняні пожежі – пік горимості припадає на березень-квітень – понад 54 % пожеж. Для болотяної рослинності (очерет, комиш) виявлено два рівнозначні піки пожеж: весняний – у березні та осінній – у жовтні (по 23 %).



**Горимість різних типів ландшафтів Лівобережного Лісостепу України**

Тип земної поверхні	Площа земної поверхні, %	Площа, км <sup>2</sup>	Кількість термальних аномалій, випадків	Горимість, шт./1000 га
Чагарники	0,1	93,6	134	0,57
Травостої	5,2	4 865,8	3 170	0,34
Сільськогосподарські угіддя	58,7	54 927,4	35 965	0,34
Забудова	3,3	3 087,9	782	0,13
Болота (рослинність на заболочених ділянках)	3,0	2 807,2	58	0,01
Заплави	2,4	2 245,8	1 622	0,37
Ліс (зімкнені насадження)	14,4	13 474,5	3 894	0,15
Рідколісся	12,8	11 977,3	7 500	0,33
<i>НІР<sub>0,05</sub>*</i>				0,11

\**НІР<sub>0,05</sub>* – найменша істотна різниця за критерію ймовірності  $p = 0.05$ .



**Рис. 6 – Розподіл кількості випадків лісових пожеж за місяцями в різних типах ландшафтів**

Виявлено, що період від другої декади травня й до третьої декади червня є найменш пожежонебезпечним – 0,5–1,6% загальної кількості пожеж, що пов'язане з активним розвитком живого надґрунтового покриву. Таким чином, виникнення та поширення пожеж на ділянках, де основним горючим матеріалом є трав'яна рослинність, зводяться нанівець, оскільки в цей період уміст вологи в рослинах надґрунтового покриву дає їм змогу бути бар'єром для розповсюдження пожеж (рис. 7).

Пожежна небезпека ландшафтів тісно пов'язана з особливостями проходження фенологічних фаз найпоширенішою рослинністю та з погодними умовами. Зважаючи на потреби в аналізі пожежної небезпеки ландшафтів на значних територіях, її оцінено в Лівобережному Лісостепу з використанням індексів вегетації (рис. 8, 9).



Рис. 7 – Стан трав'яної рослинності. Зліва направо: квітень, червень, серпень  
(Фото: Сидоренко А. Г., Полтавська обл., Гадяцький р-н., 2019–2020 рр.)

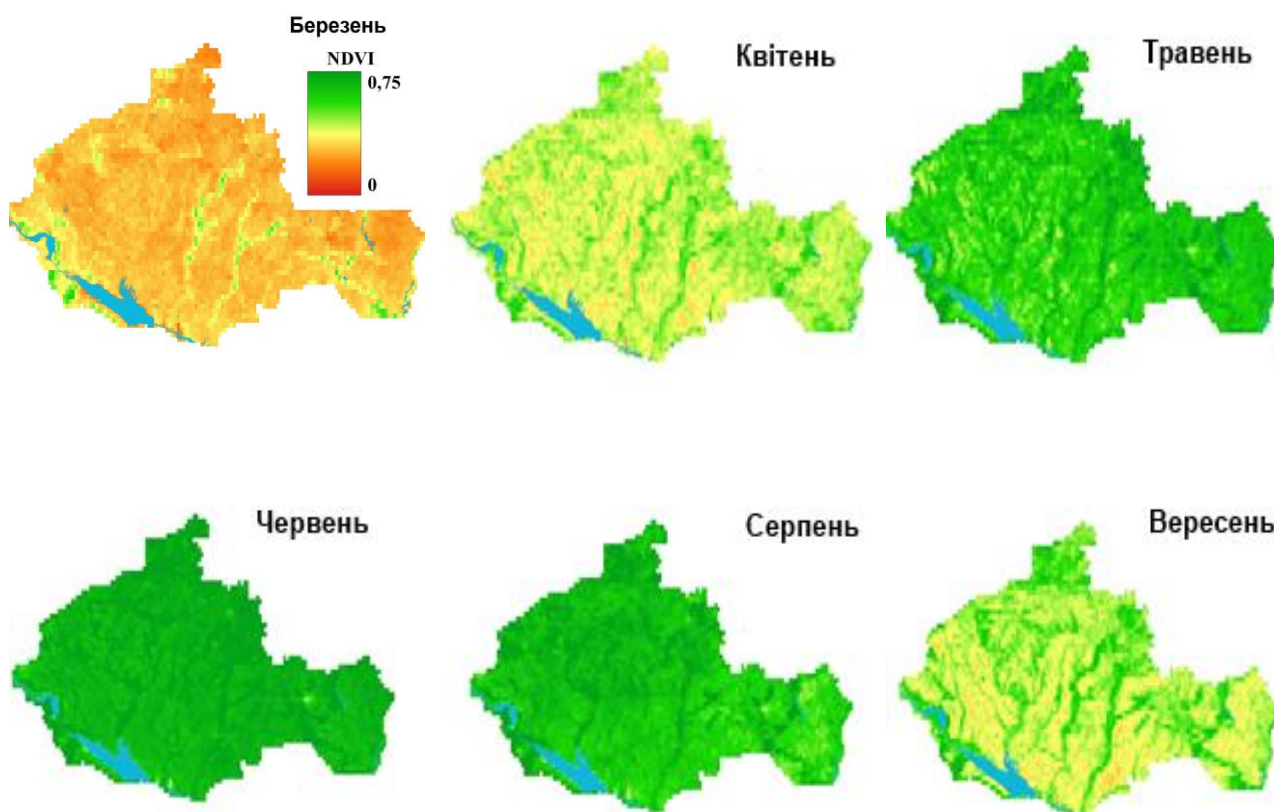


Рис. 8 – Середні багаторічні значення індексів вегетації NDVI за місяцями

Аналіз зміни індексів вегетації NDVI впродовж пожежонебезпечного сезону підтвердив, що найвищі їхні значення фіксують саме впродовж червня. Виявлено кореляційну залежність між середніми індексами вегетації для місяців упродовж пожежонебезпечного періоду та часткою випадків ландшафтних пожеж ( $r = 0,7$ ;  $p = 0,05$ ).

Використовуючи попередньо оброблену базу ландшафтних пожеж, за допомогою алгоритму Kernel Density було створено мапу частоти виникнення ландшафтних пожеж у Лівобережному Лісостепу з умовним виділенням зон за пожежною небезпечністю (рис. 10). Ця мапа ілюструє просторовий і часовий розподіл ландшафтних пожеж на території

Лівобережного Лісостепу. Мапу щільності пожеж поєднано з адміністративними межами (межі областей та об'єднаних територіальних громад) (див. рис. 10). Таким чином, її можна використовувати для оцінювання пожежних ризиків як у масштабах адміністративних областей, так і в межах об'єднаних територіальних громад. За наявності векторних мап територій лісогосподарських підприємств побудовану мапу можливо використати для ідентифікації центрів горимості та проектування профілактичних протипожежних заходів.

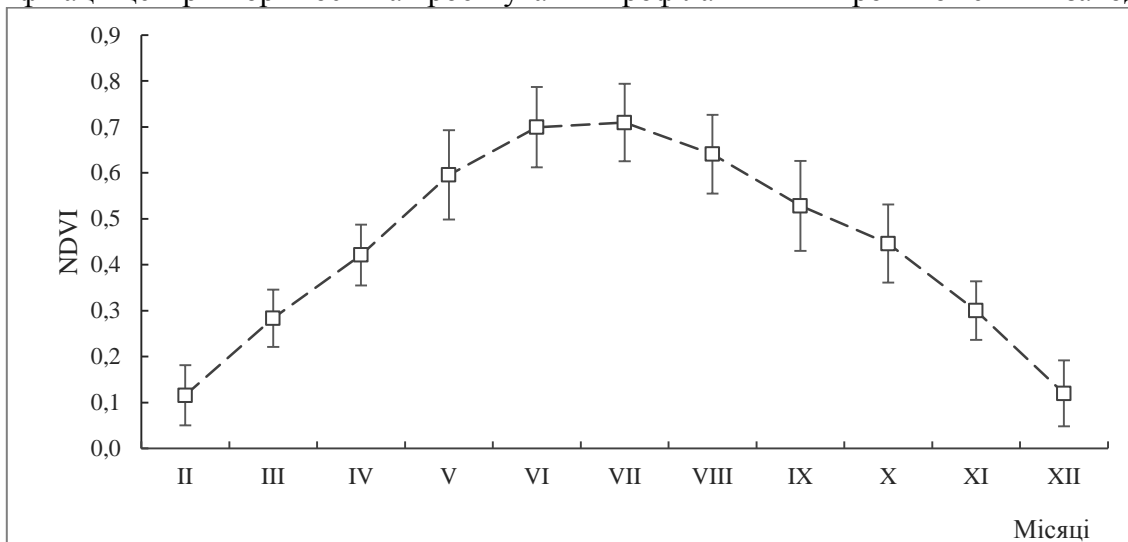


Рис. 9 – Динаміка індексів вегетації NDVI за місяцями

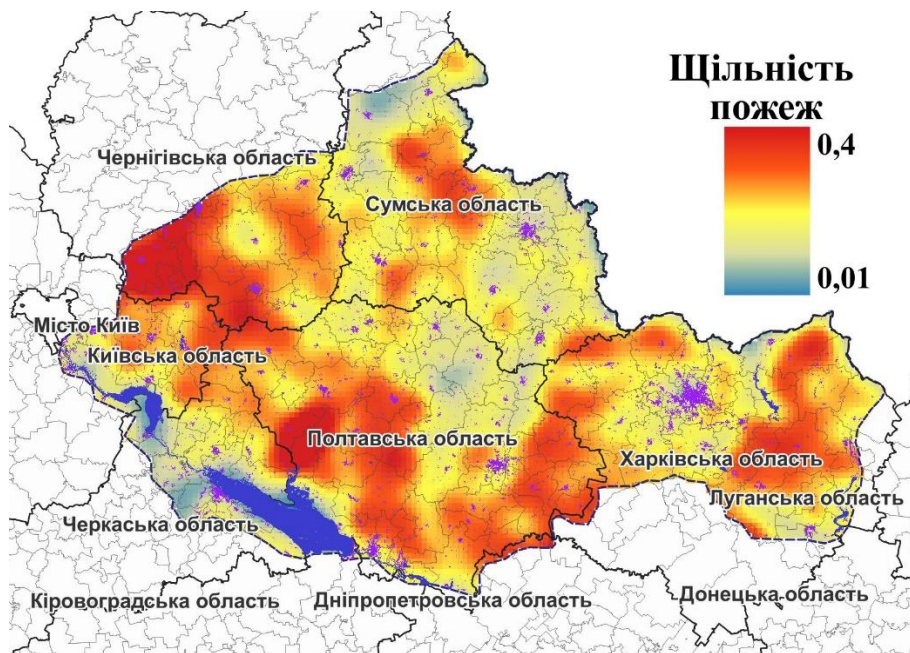


Рис. 10 – Щільність і частота ландшафтних пожеж на території Лівобережного Лісостепу України

Найбільшу щільність пожеж виявлено в південних частинах Полтавської та Чернігівської областей.

**Висновки.** Оцінено особливості та кількісні показники ландшафтних пожеж у Лівобережному Лісостепу України. Виявлено, що площа, пройдена пожежами у природних екосистемах регіону впродовж пожежонебезпечного періоду, може сягати 810 тис га (у середньому площа пожеж упродовж року становить 350 тис. га). Щорічно в межах регіону дослідження виникає від 1,3 до 6,7 тис. випадків пожеж.

Виявлено закономірності часового розподілу пожеж та виділено піки горимості для кожного з основних типів ландшафтів; отримані дані можуть бути використані задля



доповнення наявної системи оповіщення щодо пожежної небезпеки за умовами погоди, що не враховує особливостей проходження фенологічних фаз основною рослинністю у відкритих ландшафтах.

Створено геопросторові растрові шари частоти виникнення ландшафтних пожеж для території Лівобережного Лісостепу з ідентифікацією найбільш пожежонебезпечних територій, які характеризуються значною щільністю пожеж. Ці шари варто використовувати в поєднанні з векторними шарами територій адміністративних районів, об'єднаних територіальних громад і лісогосподарських підприємств для оцінювання пожежних ризиків та ідентифікації центрів горимості. Також розроблені мапи доцільно використовувати для запровадження системи профілактичних протипожежних заходів на певних, найбільш небезпечних ділянках.

Результати досліджень є основою для розроблення методологічних підходів щодо оцінювання пожежної небезпеки ландшафтів, які наразі в Україні відсутні.

#### **ПОСИЛАННЯ – REFERENCES**

- Didan, K.* 2015. MOD13C2 MODIS / Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13C2.006>
- Gensiruk S. A.* 2002. Forests of Ukraine. Lviv, 496 p. (in Ukrainian).
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Humber, M. L., Justice, C. O.* 2018. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. [Electronic resource]. *Remote Sensing of Environment*, 217: 72–85. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425718303705> (accessed 23.11.2020).
- Shynkarenko, S. S.* 2017. Identification of steppe fires according to the data of LANDSAT and MODIS. *Scientific and agronomic journal*, 2 (101): 32–34 (in Russian).
- Sorokina, L. Yu. and Petrov, M. F.* 2020. Changes in the structure of the land cover and fire safety of the Chernobyl Exclusion Zone landscapes: Assessment methods using satellites. *Ukrainian Geographical Journal*, 2: 45–56 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/ugz2020.02.045>
- Sydorenko, S. H. and Sydorenko, S. V.* 2020. Analysis of fire risks in Ukrainian forests as a prerequisite for a national forest fire zoning. *Forestry and Forest Melioration*, 137: 91–101 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.33220/1026-3365.137.2020.91>
- Tarpley, J. D., Schneider, S. R., Money, R. L.* 1984. Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23: 491–494.
- Tymoshkov, V. F.* 2018. Tendentious localization of landscape fires with the use of dry channels. *Science and education today*, 3 (26): 17–18. (in Russian).
- Zibtsev, S. V., Soshenskyi, O. M., Myroniuk, V. V., Gumeniuk, V. V.* 2019. Landscape fire monitoring in the Ukrainian part of the Olmany-Perebrody Transboundary Ramsar site based on remote sensing data. *Forestry and Forest Melioration*, 134: 88–95 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.33220/1026-3365.134.2019.88>

Sydorenko S. H.

LANDSCAPE FIRE REGIME PATTERNS IN THE LEFT-BANK FOREST-STEPPE

*Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky*

Due to climate change and increasing climate aridity, the risk of wildfires remains high. The main approach for wildfire risk reduction is an effective fire prevention campaign in the most vulnerable to fire areas. The research evaluates the combustibility of different types of landscapes in the Left-Bank Forest-Steppe. Spatial and temporal features of landscape fires during the fire season were determined. The total burnt area in the landscapes of the Left Bank Forest-Steppe for the 15-year period (2006–2020) was estimated. Fire peaks have been identified for different types of landscapes. Tendencies towards increased fire hazards and density of fires in natural landscapes depending on the current state of vegetation (passing of phenological phases by the main types of vegetation) are revealed. The relationship between the average vegetation indices for the months during the fire season and the percentage of landscape fires was confirmed. The map of landscape fire frequency in the Left-Bank Forest-Steppe with a conditional allocation of wildfire risk zones was created.

**Key words:** landscape fire density, landscape fire hazard, landscape combustibility, spatial landscape fire temporal pattern, landscape fire spatial pattern.

*E-mail: serhii88sido@gmail.com*

*Одержано редколегією 23.09.2021*