



**ПРОГНОЗУВАННЯ ПОСТПРОГЕННОГО ВІДПАДУ В СОСНЯКАХ,  
ПОШКОДЖЕНИХ ЛІТНІМИ НИЗОВИМИ ПОЖЕЖАМИ,  
У ЛІВОБЕРЕЖНОМУ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ**

<sup>1</sup>Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького

<sup>2</sup>Науково-дослідний інститут правового забезпечення інноваційного розвитку НАПрН України

Пожежі є одними із найнебезпечніших чинників дестабілізації лісів. У зв'язку зі зростанням посушливості клімату ризик збільшення частоти й масштабів лісових пожеж залишається високим, тому актуальним є розроблення науково обґрунтованих заходів із пом'якшення екологічних, економічних та соціальних наслідків лісових пожеж. Удосконалено та уточнено показники, що характеризують візуальні прояви пошкодження дерев після низових пожеж, та показники вогнестійкості середньовікових дерев сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.). Виявлено, що в міру збільшення середньої висоти нагару на стовбурах зростає частка відпаду в досліджуваних групах дерев ( $r = 0,87$ ,  $t_{\Phi} = 5,80$ ,  $t_{0,01} = 3,17$ ). Встановлено, що вогнестійкість дерев збільшується зі збільшенням природного ступеня товщини дерева в насадженні (виявлено обернений достовірний кореляційний зв'язок між природним ступенем товщини (ПСТ) і категорією санітарного стану пошкоджених дерев: ( $r = -0,54$ ;  $p = 0,05$ ). Розроблено прогностичну модель для встановлення ймовірності відпаду дерев, пошкоджених низовими стійкими літніми пожежами, яка як предиктори включає середню висоту нагару на стовбурах та ПСТ (точність прогностичної моделі становить понад 78 %).

**Ключові слова:** стійкі низові пожежі, сосняки, прогностичні моделі, вогнестійкість.

**Вступ.** Пожежі є одними з найнебезпечніших для лісів екологічних чинників. У зв'язку з глобальним потеплінням та збільшенням посушливості клімату ризик збільшення частоти й площі лісових пожеж залишається високим. Понад 90 % загальної кількості пожеж припадає на соснові ліси (Voron & Sydorenko 2014). Стрімке погіршення санітарного стану пошкоджених вогнем сосняків призводить до значних економічних збитків, пов'язаних зі зниженням виходу ділової деревини та погіршенням її технічної якості (Leschenko 2009, Usenia & Churylo 2001). Тому визначення особливостей постпірогенного розвитку сосняків, а саме своєчасна діагностика й точне прогнозування ймовірності усихання пошкоджених пожежами дерев є надзвичайно актуальним завданням для зменшення негативних наслідків, спричинених лісовими пожежами, та для прийняття рішень стосовно ведення господарства в цих лісах.

Вплив лісових пожеж на стан насадження залежить від низки чинників: виду пожежі, її інтенсивності, тривалості, переважаючого типу пошкодження в пройденому пожежею насадженні, характеристик деревостану тощо. Навіть насадження з однаковим рівнем пошкодження, заподіяного у різних сезонах року, можуть характеризуватися різною величиною відпаду. Так, попередніми дослідженнями (Sydorenko 2017) встановлено, що частка сухостійних дерев через рік після весняних пожеж була в п'ять разів меншою, ніж після літніх (2,7 % проти 13,8 %). Інтенсивність відпаду в пошкоджених улітку стиглих сосняках може бути в 10 разів більшою, ніж після весняних пожеж (Sydorenko 2017).

*Метою роботи* є прогнозування постпірогенного відпаду в сосняках, пошкоджених літніми низовими пожежами, у Лівобережному Лісостепу України.

**Матеріали й методи.** Постпірогенний розвиток насаджень досліджували на 11 пробних площах (ПП), закладених у середньовікових сосняках Лівобережного Лісостепу впродовж 2013–2017 рр. за стандартними методиками (Ploshchi probni lisovporoyadni 2007). Деревостани на ПП характеризувалися різним віком, таксаційними показниками та інтенсивністю пошкодження (табл. 1). Дослідження проведено в межах Харківської області в лісах ДП «Жовтневе ЛГ» та ДП «Зміївське ЛГ».

Кореляційний та регресійний аналіз проводили за загальноприйнятими методиками (Atramentova & Utevska 2007).

Стан пошкоджених дерев визначали за «Санітарними правилами в лісах України» (Sanitarni pravyla 2016).

Під час кореляційного аналізу зв'язок вважали функціональним за коефіцієнта кореляції 1,00, дуже сильним – 0,90–0,99, сильним – 0,70–0,89, значним – 0,50–0,69, помірним – 0,30–0,49, слабким – 0,10–0,29 (Atramentova & Utevska 2007).

Таблиця 1

**Таксаційні показники деревостанів на пробних площах,  
закладених у пошкоджених низовими пожежами середньовікових сосняках**

№ ПП	Вік, років	Середній діаметр, см	Висота, м	Запас, м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup>	Повнота	Середня висота нагару, м
1	60	27,2	24,5	386	0,77	0,69
2	57	26,0	21,0	476	1,00	2,02
3	57	21,1	18,7	238	0,58	2,30
4	60	28,4	25,2	481	0,93	2,52
5	68	25,3	20,8	256	0,62	3,58
6	70	26,5	21,2	261	0,62	4,45
7	61	28,6	25,7	268	0,50	0,78
8	61	21,8	19,6	220	0,60	1,26
9	65	28,4	22,2	375	0,91	1,85
10	65	26,6	22,5	401	0,96	1,98
11	65	25,3	23,1	419	0,94	0,95

Для побудови прогностичних моделей імовірності всихання окремих дерев використано множинний регресійний аналіз, а також логістичний регресійний аналіз (бінарні регресії) (Shalabanov & Roganov 2008). Якість логістичних регресій перевіряли за допомогою ROC-аналізу (Fawcett 2004) із використанням пакету SPSS 20 від IBM. Для аналізу якості моделей і корегування порогу відсічення використовували ROC-аналіз (receiver operating characteristic). Під час ROC-аналізу якість моделі вважають відмінною за значення AUC (area under curve) – 0,9–1,0; дуже доброю – 0,8–0,9; доброю 0,7–0,8; середньою – 0,6–0,7; незадовільної якості – 0,5–0,6 (Fawcett 2004).

Під час моделювання як найбільш доцільний обрано такий дизайн рівняння (1), за допомогою якого досягалася найкраща апроксимація щодо оцінювання ймовірності усихання:

$$y = \frac{\exp(a_0 - x_1 \times a_1 + x_2 \times a_2)}{(1 - \exp(a_0 - x_1 \times a_1 + x_2 \times a_2))}, \quad (1)$$

де  $y$  – залежна змінна;

$a_0...a_n$  – коефіцієнти регресії;

$x_0...x_n$  – незалежні змінні.

**Результати та обговорення.** Кореляційним аналізом виявлено сильний прямий зв'язок між висотою нагару на стовбурах і санітарним станом дерев ( $r = 0,91$ ,  $t_{\Phi} = 6,80$ ,  $t_{0,01} = 3,17$ ). Результати регресійного аналізу доводять, що у 83 % випадків літніх пожеж стан дерев визначається середньою висотою нагару на стовбурі. Також доведено, що в міру збільшення середньої висоти нагару на стовбурах зростає частка відпаду в досліджуваних групах дерев ( $r = 0,87$ ,  $t_{\Phi} = 5,80$ ,  $t_{0,01} = 3,17$ ).

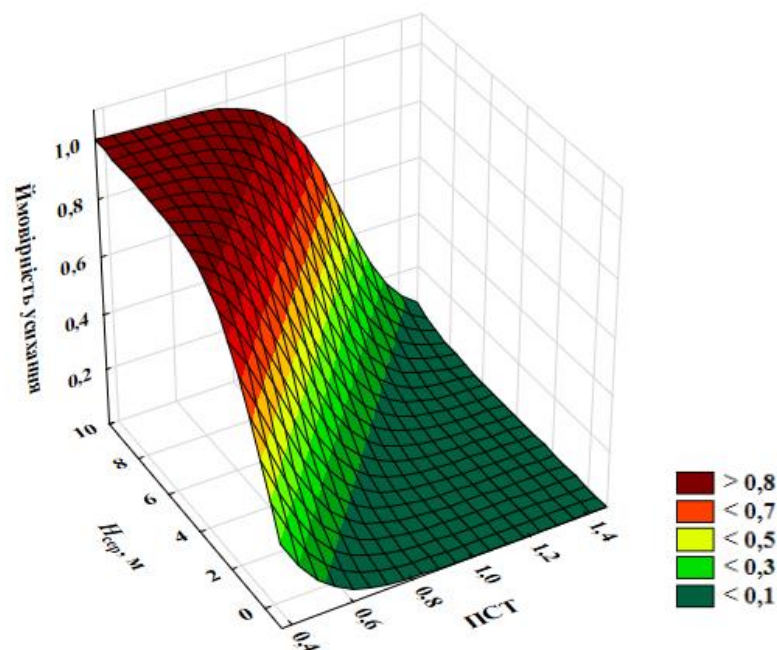
Для середньовікових дерев сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) характерним є збільшення вогнестійкості дерев зі збільшенням діаметра стовбура (виявлено обернений достовірний кореляційний зв'язок між діаметром і санітарним станом пошкоджених дерев:  $r = -0,4$ ;  $p = 0,05$ ).

Для розроблення моделей постпірогенного відпаду враховували розподіл дерев за природними ступенями товщини (ранжування дерев у насадженні відносно середнього діаметра), адже ця додаткова змінна відображає як якісний показник розвитку дерева (клас Крафта) у насадженні, так і кількісний (діаметр). Між санітарним станом і природним ступенем товщини (ПСТ) виявлено обернений кореляційний зв'язок ( $r = -0,54$ ;  $p = 0,05$ ). Пригнічені дерева, ПСТ яких менші за 0,6, всихають за будь-якого рівня пошкодження. Для ПСТ 0,7–1,2 летальне пошкодження відбувається за висоти нагару на стовбурі понад 3 м ( $I_c$  сягатиме IV,1–IV,6). Для дерев зі ступенем товщини понад 1,3 летальний рівень пошкодження досягається, лише якщо висота нагару на стовбурі перевищуватиме 4 м.

Для точного прогнозування наслідків пожежі необхідно встановити ризик усихання кожного з дерев. За допомогою логістичного регресійного аналізу одержано моделі, найточніша з яких (2) включала як предиктори природний ступінь товщини та середню висоту нагару ( $H_{сер}$ ) (рис. 1).

$$P = \frac{\exp(2,67 - 5,20 \times \text{ПСТ} + 0,61 \times H_{сер})}{(1 - \exp(2,67 - 5,20 \times \text{ПСТ} + 0,61 \times H_{сер}))}, \quad (2)$$

де  $P$  – ймовірність усихання (від 0 до 1);  
ПСТ – природний ступінь товщини;  
 $H_{сер}$  – середня висота нагару на стовбурі.



**Рис. 1 – Ймовірність усихання середньовікових дерев сосни залежно від висоти нагару на стовбурі та природного ступеня товщини**

Точність прогнозу сягає 78,2 %. За допомогою ROC-аналізу підтверджено високу якість запропонованої моделі ( $AUC = 0,83 \pm 0,020$ ). Включення більшої кількості змінних до моделі (мінімальна та максимальна висота нагару на стовбурах, діаметр, висота дерева, клас бонітету насадження тощо) не призводило до підвищення її точності понад 1 %. Відповідно до класифікації до категорії усохлих належали дерева п'ятої («свіжий сухостій») та шостої («старий сухостій») категорій стану. Сприйнятливі до заселення стовбуровими шкідниками дерева категорії «усихаючі», які, найімовірніше, з часом усохнуть, у початковому варіанті не були враховані. Тому було знижено «межу відсікання» для поданої вище моделі до 0,38.

Дисперсійним аналізом підтверджено значущість опіку тонкої кори. Було відібрано дерева із середніми природними ступенями товщини в межах 0,9–1,1, однорідних як за віком, так і за висотою нагару на стовбурах (2,8–3,1 м). Вибірку розподілили на три групи:

– «груба кора» – коли верхня межа нагару не перевищувала верхньої межі розміщення грубої кори;

– «зона переходу» – коли верхня межа нагару знаходилася на один метр нижче від зони переходу грубої кори в тонку або якщо вони співпадали;

– «опік тонкої кори» – коли верхня межа нагару була розташована вище, ніж верхня межа переходу грубої кори в тонку. Вплив пошкодження зони тонкої кори на стан дерев виявився статистично достовірним ( $F_f = 5,98$ ;  $F_{st} = 3,07$ ;  $p = 0,003$ ) (рис. 2).

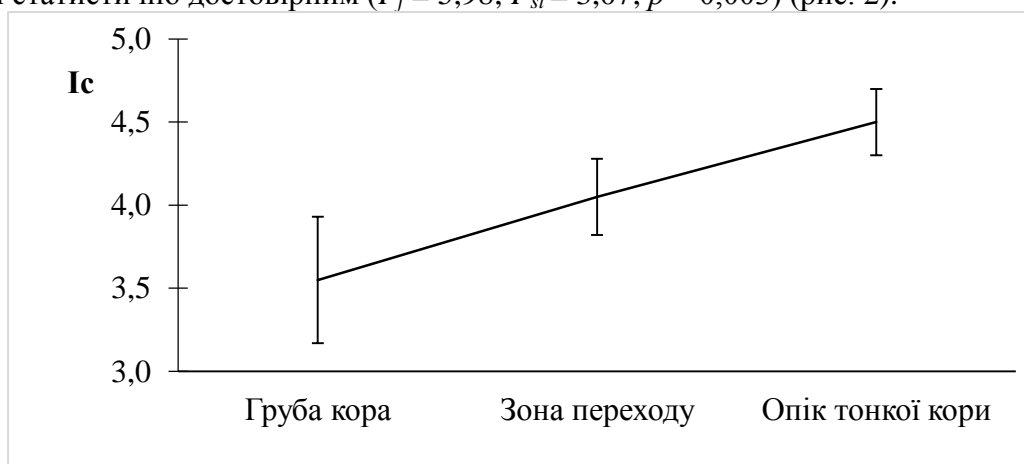


Рис. 2 – Індекс санітарного стану дерев за однакової висоти нагару залежно від зони пошкодження кори

Отже, відбираючи схильні до всихання екземпляри дерев у рубку, варто звертати увагу на наявність опіку тонкої кори. У випадках, коли висота нагару сягає чи перевищує висоту розташування верхньої межі грубої кори, ймовірність усихання дерев різко збільшується.

Таким чином, базуючись на отриманому рівнянні, було створено нормативно-довідкову таблицю (табл. 2) для оцінювання ймовірності відпаду кожного з дерев індивідуально залежно від природного ступеня товщини та середньої висоти нагару на стовбурі.

Таблиця 2

**Ймовірність усихання окремих дерев у соснових середньовікових деревостанах, пошкоджених літніми низовими пожежами, %**

Середня висота нагару, м	Природний ступінь товщини										
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
0,5	100	83	57	38	24	15	9	5	3	2	1
1,0	100	100	72	48	31	20	12	7	4	3	2
1,5	100	100	88	61	40	26	16	10	6	4	2
2,0	100	100	100	76	52	34	21	13	8	5	3
2,5	100	100	100	93	65	44	28	17	11	6	4
3,0	100	100	100	100	81	56	36	23	14	9	5
3,5	100	100	100	100	100	70	47	30	19	12	7
4,0	100	100	100	100	100	86	60	39	25	16	9
4,5	100	100	100	100	100	100	74	50	33	21	13
5,0	100	100	100	100	100	100	91	64	42	27	17
5,5	100	100	100	100	100	100	100	79	54	35	22
6,0	100	100	100	100	100	100	100	100	68	46	29
6,5	100	100	100	100	100	100	100	100	84	58	38
7,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	73	49
7,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	89	62
8,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	77
8,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Таблиця та математична модель можуть бути використані під час відбору пошкоджених низовими пожежами дерев до вибіркової санітарної рубки. Дерева, нагар на яких сягає зони перехідної кори, відводять до рубки не залежно від висоти нагару. Перевагою використання запропонованих критеріїв є виявлення дерев із високою ймовірністю всихання ще до появи виразних візуальних ознак усихання за станом крони для ефективного та оперативного прийняття управлінських рішень стосовно заходів у пошкоджених низовими пожежами насадженнях.

**Висновки.** Основними показниками вогнестійкості середньовікових дерев сосни звичайної є діаметр (природний ступінь товщини) і висота розташування грубої кори. Більш вогнестійкими є дерева з діаметром, значення якого є більшими за середній у насадженні (ПСТ  $\geq 1,2$ ), та високим розташуванням грубої кори (зважаючи, що в більшості випадків середня висота нагару під час низових пожеж не перевищувала 3–4 м, дерева з висотою розташування верхньої межі грубої кори понад 5 м можна вважати вогнестійкими).

Летальні рівні пошкодження залежать від середньої висоти нагару на стовбурі та морфометричних показників дерева. Для дерев із природним ступенем товщини, меншим 0,8 це – висота нагару понад 1 м, із ПСТ 1,0–1,1 – понад 3 м, для дерев із ПСТ 1,4–1,6 – висота нагару понад 6 м.

За результатами досліджень запропоновано математично-статистичну модель, яку доцільно використовувати для класифікації пошкоджених низовими пожежами дерев як таких, що всохнуть у найкоротші після пожежі терміни. Використання такого підходу дасть можливість мінімізувати збитки, спричинені змінами товарності пошкоджених пожежами насаджень.

#### **ПОСИЛАННЯ – REFERENCES**

- Atramentova, L. O. and Utevska, O. M.* 2007. Porivnyannya hrup i analiz zviazku [Group comparison and relations analysis]. Kharkiv, Ranok Publishing House, 176 p. (in Ukrainian).
- Fawcett, T.* 2004. ROC Graphs: Notes and Practical Considerations for Researchers. Kluwer Academic Publishers, 38 p.
- Leschenko, V. O.* 2009. Priami vtraty lisovoho hospodarstva vid pozhezh u sosniakakh derzhavnogo pidpriemstva "Zmiivske lisove hospodarstvo" [Direct losses of forestry are from fires in the pine forests of State Enterprise «Zmiivsk Forest District»]. Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny [Scientific Bulletin of UNFU], 19.8: 91–96 (in Ukrainian).
- Sanitarni pravyla v lisakh Ukrainy [Sanitary Forests Regulations in Ukraine]. 2016. [Electronic resource]. Approved by Cabinet of Ministers of Ukraine. Kyiv, 20 p. Available from: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/555-95-%D0%BF> (last accessed date 12.11.2019) (in Ukrainian).
- Shalabanov, A. K. and Roganov, D. A.* 2008. Ekonometrika: Uchebno-metodicheskoe posobie [Econometrics: A textbook]. Kazan, Akademiya upravleniya «TISBI», 203 p. (in Russian).
- Sydorenko, S. H.* 2017. Postpirohenny rozvytok sosniakiv Livoberezhnogo Lisostepu Ukrainy [Postpyrogenic growth of Scots pine stands in the Left-bank Forest-Steppe of Ukraine]. Avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. s.-h. nauk [Extended abstract of PhD dissertation]. Kharkiv, 22 p. (in Ukrainian).
- Ploshchi probni lisovporyadni. 2007. Metod zakladannya. SOU 02.02-37-476:2006. [Forest inventory sample plots. Establishing method. Corporate standard 02.02-37-476:2006]. Kyiv, Minahropolityky Ukrayiny, 32 p. (in Ukrainian).
- Usenia V. V. and Churylo V. S.* 2001. Dinamika poslepozharnogo otpada v osnovnykh nasazhdeniyah [The dynamics of post-fire mortality in pine stands]. Problemy lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Belarusi [Problems of Forest and Forestry: collection of scientific works of Institute of Wood of NAS of Belarus]. Vol. 52, p. 209–214 (in Russian).
- Voron V. P. and Sydorenko S. H.* 2014. Osobennosti poslepozharnogo razvitiya osnovnykh molodnyakov [Features of the postfire development of pine young growths]. Problemy lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Belarusi [Problems of Forest and Forestry: collection of scientific works of Institute of Wood of NAS of Belarus]. Vol. 74, p. 513–523 (in Russian).

Sydorenko S. H.<sup>1</sup>, Liubchych A. M.<sup>2</sup>

**POSTFIRE TREE MORTALITY MODELLING FOR PINE STANDS DAMAGED BY SUMMER SURFACE FIRES IN THE LEFT-BANK FOREST-STEPPE OF UKRAINE**

<sup>1</sup>*Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky*

<sup>2</sup>*The Scientific and Research Institute of Providing Legal Framework for the Innovative Development*

Wildfires are the most dangerous destabilizing factors for forest ecosystems. Due to the increasing climate aridity, the risk remains high for the growth of forest fires frequency. Therefore, developing science-based forest practices to mitigate the ecological, economic and social losses caused by forest fires is an urgent topic. The indicators describing visual manifestations of tree damage after surface fires and middle-aged *Pinus sylvestris* L. trees fire resistance have been improved and refined. It was found that with an increase of average bark char height, the number of dead trees in the studied tree groups also increases ( $r = 0.87$ ,  $t_f = 5.80$ ,  $t_{0.01} = 3.17$ ). It was determined that the fire resistance of trees increases with the growth of natural degree of tree thickness in the pine stand (statistically significant correlation was found between the natural degree of thickness and the health condition of damaged trees:  $r = -0.54$ ;  $p = 0.05$ ). A prognostic mortality model to determine the probability of mortality of individual trees damaged by surface summer fires has been developed. It includes the average height of bark char and natural degree of thickness as predictors. At that, the accuracy of the forecast model is over 78%.

**Key words:** summer surface fires, pines, postfire tree mortality model, fire resistance.

Сидоренко С. Г.<sup>1</sup>, Любчик А. М.<sup>2</sup>

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСТПИРОГЕННОГО ОТПАДА В СОСНЯКАХ, ПОВРЕЖДЕННЫХ ЛЕТНИМИ НИЗОВЫМИ ПОЖАРАМИ, В ЛЕВОБЕРЕЖНОЙ ЛЕСОСТЕПИ УКРАИНЫ**

<sup>1</sup>*Український науково-дослідницький інститут лісного господарства і агролісомеліорації ім. Г. Н. Висоцького*

<sup>2</sup>*Науково-дослідницький інститут правового забезпечення інноваційного розвитку НАПрН України*

Пожары являются одними из наиболее опасных факторов дестабилизации лесов. В связи с возрастанием засушливости климата риск увеличения частоты и масштабов лесных пожаров остается высоким, поэтому актуальной является разработка научно обоснованных мероприятий по смягчению экологических, социальных и экономических последствий лесных пожаров. Уточнены показатели, характеризующие визуальные проявления повреждений деревьев после низовых пожаров, и показатели огнестойкости средневозрастных деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Выявлено, что по мере увеличения средней высоты нагара на стволах возрастает доля усохших деревьев в исследуемых группах ( $r = 0,87$ ,  $t_{\Phi} = 5,80$ ,  $t_{0,01} = 3,17$ ). Установлено, что огнестойкость деревьев увеличивается с увеличением естественной степени толщины деревьев в насаждении (обнаружена обратная достоверная корреляционная связь между естественными степенями толщины и санитарным состоянием поврежденных деревьев:  $r = -0,54$ ;  $p = 0,05$ ). Разработана прогностическая модель для установления вероятности отпада отдельных деревьев, поврежденных низовыми устойчивыми летними пожарами, которая в качестве предикторов включает среднюю высоту нагара на стволах и естественную степень толщины (точность прогностической модели – более 78 %).

**Ключевые слова:** устойчивые низовые пожары, сосняки, прогностические модели, огнестойкость.

*E-mail:* serhii88sido@gmail.com

*Одержано редколегією:* 29.11.2019