

УДК 630\*43:630.561.24

**С. Г. СИДОРЕНКО\***<sup>†</sup>

**ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ СОСНОВИХ МОЛОДНЯКІВ  
ПІСЛЯ НИЗОВОЇ ПОЖЕЖІ**

*Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького*

Пожежі є одним із найбільш небезпечних для лісів екологічних чинників, що завдають катастрофічних економічних, екологічних та соціальних збитків. На жаль, серйозні дослідження щодо діагностики та прогнозування післяпожежного відпаду в Україні не проводилися. Пробні площі (ПП) закладали за загальноприйнятими в лісівництві методами у соснових молодняках, пошкоджених низовою пожежею у 2011 р. у Васищевському лісництві. Досліджено вплив різної величини пошкодження сосняків у разі низових пожеж на їхній подальший розвиток. Виявлено кореляційні залежності між станом дерев, рівнями пошкодження та таксаційними показниками дерев. Визначено інтенсивність усихання дерев в насадженні залежно від тривалості післяпожежного періоду та рівнів пошкодження. Запропоновано ряд моделей з прогнозування стану дерев через три роки після пожежі. У регресійний аналіз включені такі показники: діаметр, висота дерева, клас Крафта, висота нагару, відносний нагар та дехромація. Відсіявши гірші предиктори, побудовано 3 логістичні регресії. Кращими з них виявилися моделі з такими предикторами: 1 – дехромація; 2 – дехромація, діаметр, відносний нагар. Використовуючи ROC-аналіз і скорегувавши пороги відсічення для моделей, було досягнуто 90–91 % точності прогнозу дерев.

**К л ю ч о в і с л о в а :** сосняки, низові пожежі, типи пошкоджень, відносний нагар, тривалість післяпожежного періоду, прогнозування післяпожежного розвитку відпаду.

**Вступ.** Пожежі є одним із найнебезпечніших для лісів екологічних факторів, що завдають катастрофічних економічних, екологічних та соціальних збитків.

На жаль, серйозні дослідження щодо діагностики та прогнозування післяпожежного відпаду в Україні не проводились. Крім того, загальні положення «Санітарних правил» є недостатніми для швидкої, а головне – точної діагностики і передбачення відпаду, що призводить до некоректної діагностики і, як наслідок, суттєвих економічних втрат (від зниження товарності).

Точне прогнозування відпаду можливе у разі проведення регіональних досліджень [8, 10, 11] після врахування: видових особливостей, найбільш значимих морфологічних та таксаційних показників дерев; типів та величини пошкодження. Тому розробка методів прогнозування відпаду для лісів України є надзвичайно важливою.

Стаття є продовженням роботи з розробки підходів до діагностики і прогнозування стану пошкоджених сосняків з урахуванням різних природних зон, гігротопів, груп віку, особливостей пошкодження [2, 4, 5].

*Метою дослідження* було прогнозування стану молодняків, пройдених низовою пожежею, як для дерева окремо, так і насадження загалом.

**Методи і об'єкти досліджень.** Пробні площі (ПП) закладали за загальноприйнятими в лісівництві методами [1] у соснових молодняках, пошкоджених низовою пожежею у 2011 р. у Васищевському лісництві. При подеревному переліку враховували як таксаційні показники, санітарний стан і клас Крафта, так і пошкодження дерев (максимальний та мінімальний нагар, рівень дехромації).

Під час діагностики пошкодження поряд із висотою нагару використано «відносний нагар» (*relative bark char*) [7]:

$$H_{\text{відн}} = (H_{\text{наг. макс}} / H) \cdot 100; \quad (1)$$

де  $H_{\text{наг. макс}}$  – максимальна висота нагару, м;

$H$  – висота дерева, м.

\* © С. Г. Сидоренко, 2014

<sup>†</sup> Науковий керівник – канд. с.-г. наук Ворон В. П.

Статистичну обробку даних проводили за загальноприйнятими методиками [6, 9] із використанням прикладних комп'ютерних програм *MS Excel* та *Statistica 10* та *SPSS 20* від IBM. Кореляційний і регресійний аналіз проводили за загальноприйнятими методиками [3].

Рівень значущості обрахованих коефіцієнтів кореляції було прийнято на рівні  $p = 0,01$  ( $t_{\phi} > t_{st,0,01}$ ). При кореляційному аналізі зв'язок вважався функціональним при коефіцієнті 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 [3].

Для прогнозування відпаду використовували як емпіричне моделювання (таблиці відпаду), так і математично-статистичне моделювання (регресійний аналіз – логістичні регресійні моделі, звичайні парні і множинні регресійні моделі тощо) [8]. Для побудови прогностичних моделей «на рівні дерева» застосовували регресійний аналіз з використанням прикладної комп'ютерної програми *Statistica 10* від StatSoft. Перевірку якості логістичних регресій проводили за допомогою ROC-аналізу [6] із використанням пакету *SPSS 20* від IBM.

Для аналізу якості моделей та корегування границі відсікання (у класичній логістичній регресії значення від 0 до 0,5 – «подія не відбувається», від 0,5 і до 1 – «подія відбувається») використовували ROC-аналіз (*receiver operating characteristic*).

ROC-крива показує залежність кількості правильно класифікованих позитивних прикладів від кількості неправильно класифікованих негативних прикладів по двох осях: по осі  $x$  – «1 - специфічність», по осі  $y$  – «чутливість». Чутливість (*Sensitivity* або коротко *Se*) – частка істинно позитивних випадків. Специфічність (*Specificity* або *Sp*) – частка істинно негативних випадків, які були правильно ідентифіковані моделлю.

Модель з високою чутливістю часто дає істинний результат при прогнозуванні подій, що відбуваються – у нашому випадку це «1» – дерево усихає. Модель з високою специфічністю частіше дає істинний результат при негативному результаті – тобто «0» – дерево виживає.

Специфічний діагностичний тест діагностує тільки достеменно усихаючі дерева, але існує ризик не виявити велику частку дерев, що всохнуть. Тому чутливий діагностичний тест виявляється в гіпердіагностиці – максимальному недопущенні пропуску дерев, що всохнуть.

Для ідеального класифікатора графік ROC-кривої проходить через верхній лівий кут, де частка істинно позитивних випадків становить 100 %, або 1,0 (ідеальна чутливість). Тому чим ближчою до верхнього лівого кута є крива, тим вищою є прогностична здатність моделі. Діагональна лінія (опорна лінія) відповідає «марному» класифікатору, тобто повній відсутності розрізненості двох класів.

При ROC-аналізі якість моделі вважалася відмінною при значенні AUC 0,9–1,0, дуже доброю – 0,8–0,9, доброю – 0,7–0,8, середньою – 0,6–0,7, незадовільної якості при значенні AUC 0,5–0,6 [6].

**Результати та обговорення.** Пожежа, наслідки якої досліджуються, сталася наприкінці квітня 2011 р. Оскільки підстилка і трав'яний покрив мали низьку вологість, пожежа розвивалася досить швидко і призвела до сильного пошкодження деревостану (табл. 1).

Таблиця 1

Стан 11-річного сосняку, пошкодженого низовою пожежею

№ ПП	$d$ , см	$H$ , м	$H$ нагару сер, м	Дехромація, %	Індекс стану
1	5,3	3,8	1,18	69,4	3,6
2	7,3	4,1	0,93	53,0	3,2

Обидві ПП були закладені в тому ж кварталі і виділі, були пройдені однією й тією ж пожежею (травень 2011 р.), тому вони були об'єднані в одну пробну площу, кількість дерев на ПП – 470.

Для початку було проведено кореляційний аналіз (табл. 2) для відбору кращих «предикторів» для побудови моделей.

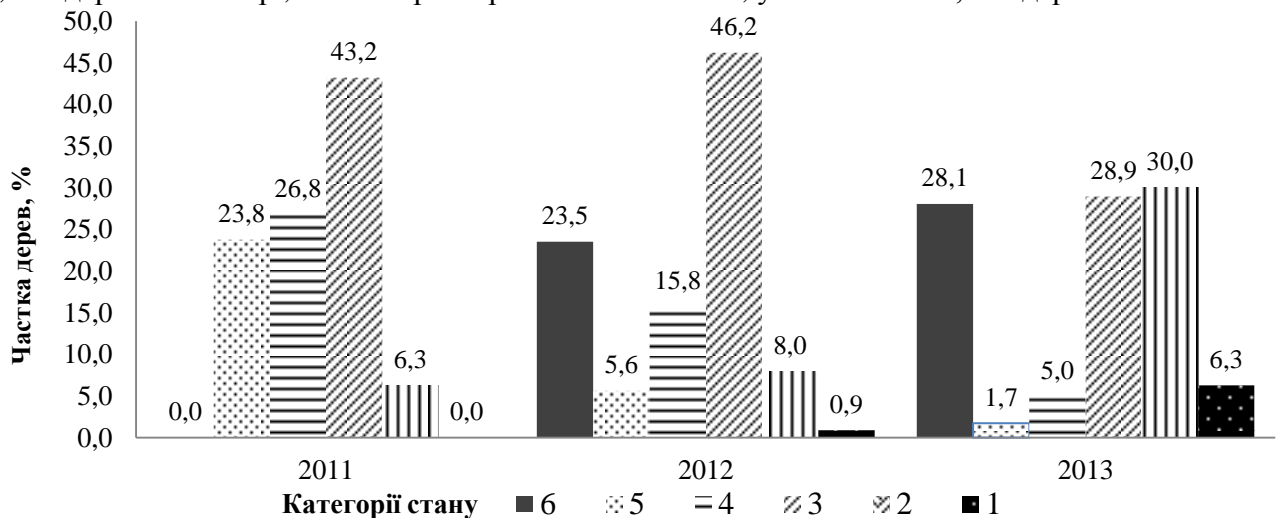
**Кореляційні залежності між станом дерев і предикторами, включеними у регресійні моделі**

Змінні	Післяпожежний стан	
	через 2 місяці	через 2 роки
	Коефіцієнт кореляції $r$ (значимий на рівні $p = 0,01$ )	
Діаметр $d$ , см	-0,27	-0,38
Висота дерева $H$ , м	-0,32	-0,41
Клас Крафта $K$	0,28	0,36
Нагар (максимальний) $H_{\text{наг.макс}}$ , м	0,48	0,39
Відносний нагар $H_{\text{відн.}}$ , %	0,59	0,55
Дехромація $D$ , %	0,88	0,77

Перші два показника – діаметр  $d$ , висота  $H$  – мають обернений зв’язок зі станом дерев (тобто дерева з більшим діаметром та висотою будуть мати кращий стан). Натомість максимальна висота нагару  $H_{\text{наг.макс}}$ , відносний нагар  $H_{\text{відн.}}$ , дехромація  $D$  та клас Крафта  $K$  мають прямий зв’язок зі станом, збільшення значень цих показників призводить до погіршення стану дерев.

Характерна закономірність – через 2 роки після пошкодження тіснота звязку між станом та предикторами «резисцентності» збільшується, тоді як між факторами пошкодження та станом, навпаки, послаблюється, тобто домінуючі дерева мали більший потенціал для відновлення.

Протягом 2011–2012 рр. індекс стану пошкодженого пожежею сосняку досяг рівня, коли стан соснового деревостану можна оцінювати як всихаючий ( $I_c = 3,74$ ). Найбільша інтенсивність усихання (рис. 1) зареєстрована в рік пожежі (23,8 % загальної кількості дерев). У наступному 2012 р. інтенсивність усихання зменшилася більш ніж у 4 рази – всохло лише 5,6 % дерев. У 2013 р., тобто через 2 роки після пожежі, усохло лише 1,7 % дерев.



**Рис. 1 – Зміна розподілу дерев за категоріями стану в пошкодженому сосняку**

У 2013 р. стан дещо покращився ( $I_c = 3,36$ ). У сосновому деревостані проходили два протилежні процеси: всихання та відновлення (регенерації) дерев. Про інтенсивний хід відновлення дерев свідчить значне зростання вже на другий рік після пожежі частки сильно ослаблених, ослаблених і навіть здорових дерев і водночас зменшення частки всихаючих. У 2014 р. переміщень дерев з категорії в категорію фактично не було, тому в діаграмах результати за цей рік не подавалися. Критичним періодом інтенсивного усихання можна вважати рік пожежі. Висока інтенсивність всихання насаджень у рік пожежі відмічена також іншими авторами [9].

У молодняку спостерігалися два типи пошкодження дерев, а також їхні візуальні прояви. Перший з них – це пошкодження хвої (дехромація), тобто пошкодження крони гарячим

повітрям від конвентивного потоку під час згорання підстилки або внаслідок тепловипромінювання під час горіння стовбура. Другий тип – це пошкодження стовбура. Табл. 3 демонструє розподіл усохлих дерев залежно від величини пошкодження стовбура (відносний нагар) та крони (дехромація) за емпіричними даними.

Таблиця 3

**Розподіл усохлих дерев у сосновому молодняку залежно від типу та величини пошкодження**

Рівень пошкодження, %	2011 р.				2012 р.				2013 р.			
	$H_{\text{відн.}}$		Дехромація		$H_{\text{відн.}}$		Дехромація		$H_{\text{відн.}}$		Дехромація	
	%	$M, \text{ м}^3$	%	$M, \text{ м}^3$	%	$M, \text{ м}^3$	%	$M, \text{ м}^3$	%	$M, \text{ м}^3$	%	$M, \text{ м}^3$
0–10	8	1	0	0	9	2	0	0	11	2	0	0
11–20	10	1	0	0	17	5	0	0	17	5	0	0
21–30	9	1	0	0	18	25	1	0,4	19	27	3	0,4
31–40	25	20	2	0,2	34	24	8	7	34	24	11	7
41–50	35	32	0	0	44	43	0	0	44	43	0	0
51–60	71	75	0	0	74	78	8	1	74	78	8	1
61–70	82	70	3	1	82	70	10	4	82	70	10	4
71–80	–	–	4	1	–	–	20	12	–	–	22	13
81–90	–	–	38	42	–	–	45	45	–	–	53	46
91–100	94	88	94	96	94	88	97	97	94	88	97	97

*Примітка.*  $H_{\text{відн.}}$  – відносний нагар;  $M, \text{ м}^3$  – частка за запасом, %.

Аналізуючи дані табл. 3, можна дійти висновку, що навіть незначні пошкодження стовбура приводять до загибелі дерев. Вже при пошкодженні 31–40 % стовбура всихає третина дерев (25,4 % за кількістю та 20,2 % за запасом у 2011 р. та 33,9 % за кількістю і 24,2 % за запасом – у 2013 та 2014 рр.). Летальним же рівнем пошкодження стовбура є 51–60 % «відносного нагару» на деревах, коли гине 74 % дерев групи та 78 % за запасом.

Незначні пошкодження хвої зазвичай не спричиняли всихання дерев. Так, при дехромації 21–30 % всихає всього 2,7 % дерев або 0,4 % за запасом. Сильне погіршення стану і всихання значної кількості дерев можливе при значному пошкодженні (81 % і більше). При дехромації 91–100 % дерева не мають шансів на відновлення (усихає 96,8 % за кількістю та 96,5 % за запасом).

Доцільним для потреб господарства є прогнозування зміни стану та ймовірності усихання з моменту пошкодження і до 2 років після пожежі індивідуально для кожного дерева (для вчасного відводу в рубку дерев, які мають високу ймовірність всихання в подальші роки). З цією метою було побудовано ряд регресійних моделей, за основу їх були взяті: як залежна змінна – стан через 2 роки після пожежі, предикторами – дехромація, максимальна висота нагару, відносний нагар, діаметр дерева, його висота, клас Крафта (табл. 4).

Таблиця 4

**Регресійні рівняння для прогнозування стану на третій рік після пожежі**

Модель*	Регресійні рівняння	$R^2$	$r$	$F_{\Phi}$	$F_T$	$S$
1	$y = 1,36 + 0,038D$	0,61	0,78	727,00	1,47	0,89
2	$y = 2,629 - 0,267H + 0,035D$	0,64	0,80	428,22	2,47	0,85
3	$y = 2,25 - 0,145d + 0,035D$	0,64	0,80	420,18	2,47	0,85
4	$y = 0,666 + 0,277K + 0,036D$	0,63	0,79	399,31	2,47	0,87
5	$y = 2,719 + 0,0357H_{\text{відн.}}$	0,31	0,56	210,65	1,47	1,19
6	$y = 4,01 + 0,035H_{\text{відн.}} - 0,255d$	0,44	0,66	188,99	2,47	1,07
7	$y = 4,47 + 0,033H_{\text{відн.}} - 0,41H$	0,43	0,66	175,11	2,47	1,09
8	$y = 1,38 + 0,009H_{\text{відн.}} + 0,034D$	0,61	0,78	368,75	2,47	0,89
9	$y = 2,355 - 0,16d + 0,0297D + 0,0119H_{\text{відн.}}$	0,66	0,81	307,64	3,47	0,83
10	$y = 4,67 - 0,118d - 0,405H + 0,345H_{\text{наг.макс}} - 0,296K + 0,029D$	0,67	0,82	192,81	5,47	0,82

\* Модель включає такі предиктори: 1 – дехромацію; 2 – висоту дерева та дехромацію; 3 – дехромацію та діаметр; 4 – дехромацію та клас Крафта; 5 – відносний нагар; 6 – відносний нагар та діаметр; 7 – відносний нагар та висоту дерева; 8 – дехромацію та відносний нагар; 9 – дехромацію, відносний нагар та діаметр; 10 – діаметр, висоту дерева, максимальну висоту нагару, клас Крафта та дехромацію.

Незважаючи на високу значимість побудованих рівнянь (на рівні значущості  $p = 0,01$ ) і доволі тісні кореляційні зв'язки, ці моделі не можуть використовуватися для прийняття управлінських рішень у господарстві, адже середнє квадратичне відхилення помилок спостереження  $S$  коливається від 0,82 – у моделі під номером «10» (включає такі змінні: діаметр, висота дерева, максимальна висота нагару, клас Крафта та дехромація) – до 1,19 – у найменш точної моделі, що включає лише «відносний нагар». Фактично, отримані моделі не дозволяють точно прогнозувати категорію стану в індивідуальних випадках, тобто на «рівні дерева» (завеликі значення  $S$ ) у межах цієї категорії. Але можливе використання їх для «рівня насадження» (прогнозування індексу стану насадження).

Включення всіх предикторів до моделі, як видно з табл. 4, не дає суттєвого покращення її якості. Тому було обраховано кореляційні відношення між предикторами (табл. 5) для відсіювання найбільш корельованих поміж них. Гранічне значення відсіювання обрано  $r = |0,60|$ .

Таблиця 5

Кореляційні залежності між потенційними предикторами

Предиктори:	$d$ , см	$H$ , м	$H_{\text{наг. макс.}}$ , м	$H_{\text{відн.}}$ , %	$K$	$D$
Діаметр $d$ , см	1,00	0,86	0,33	-0,01	-0,81	-0,23
Висота дерева $H$ , м	0,86	1,00	0,26	-0,12	-0,93	-0,27
Нагар макс. $H_{\text{наг. макс.}}$ , м	0,33	0,26	1,00	0,87	-0,24	0,50
Відносний нагар $H_{\text{відн.}}$ , %	-0,01	-0,12	0,87	1,00	0,10	0,59
Клас Крафта $K$	-0,81	-0,93	-0,24	0,10	1,00	0,25
Дехромація $D$ , %	-0,23	-0,27	0,50	0,59	0,25	1,00

Встановлено тісні зв'язки між діаметром, висотою та класом Крафта (-0,86 та -0,81 відповідно). Ці величини певною мірою є взаємозамінними, тому доцільно включати до моделей лише один з цих предикторів. На наш погляд, кращим виявився діаметр через легкість заміру та подальше його застосування у прогнозуванні зміни таксаційних показників і на основі цього призначення лісогосподарських заходів.

Сильний кореляційний зв'язок встановлено між максимальною висотою нагару та відносним нагаром (0,87). У моделях доцільним є використання «відносного нагару», оскільки цей показник фактично враховує висоту дерева та висоту нагару.

Враховуючи недоліки при застосуванні лінійних регресій для рівня «дерева» з використанням як залежної величини категорії стану, ми застосували логістичну регресію, яка дає змогу визначити не категорію стану, а ймовірність усихання кожного з дерев у частках від одиниці. Дерево, що виживало, шифрувалося нулем, усохле дерево – одиницею. Таким чином було побудовано декілька найбільш доцільних логістичних моделей (2, 3, 4).

Модель, що включає відносний нагар (2) (рис. 2), прогнозує всихання з точністю 78,8 % (табл. 6).

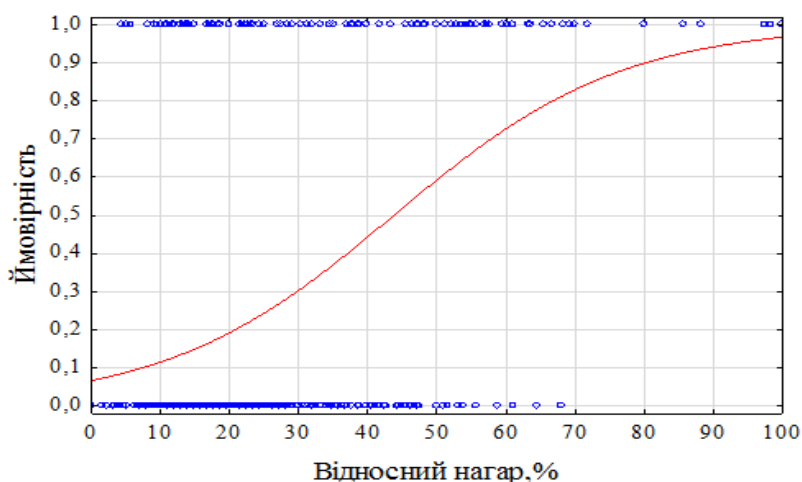


Рис. 2 – Ймовірність усихання дерев сосни при різному рівні «відносного нагару»

Попри це така модель не може бути рекомендована для практичного використання, адже, незважаючи на високу частку правильно спрогнозованих дерев, що виживають (з точністю 92,8 %), було відзначено надзвичайно малу точність прогнозу всихаючих дерев – 47,14 %. Разом з тим можна стверджувати, що при відносному нагарі 45–50 % є серйозний ризик усихання дерев.

Рівняння регресії має вигляд:

$$P = \exp(-2,641 + 0,060H_{\text{відн.}}) / (1 + \exp(-2,641 + 0,060H_{\text{відн.}})), \quad (2)$$

де  $P$  – ймовірність усихання;

$H_{\text{відн.}}$  – відносний нагар, %.

Модель, що включала дехромацію (3) (рис. 3), прогнозує виживаність точністю 89,9 % (табл. 6). Це рівняння правильно прогнозує післяпожежний статус дерев, що виживають (з точністю 94,3 %) і, разом з тим, дає непогану точність прогнозу всихаючих дерев – 80 %. Аналізуючи графік (див. рис. 3), можна стверджувати, що при дехромації, більшій за 80 %, ризик усихання дерев є надзвичайним.

Рівняння регресії має вигляд:

$$P = \exp(-9,095 + 0,111D) / (1 + \exp(-9,095 + 0,111D)) \quad (3)$$

де  $P$  – ймовірність усихання;

$D$  – дехромація, %.

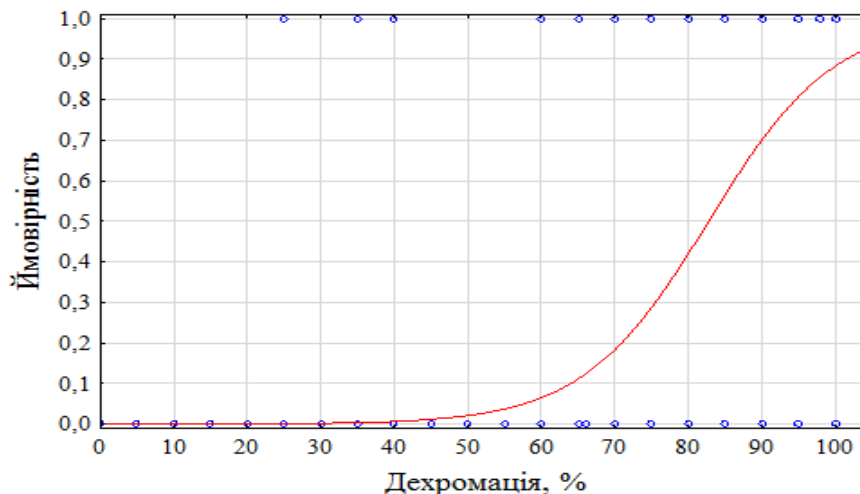


Рис. 3 – Ймовірність усихання дерев сосни при різному рівні дехромації

Таблиця 6

Характеристики точності запропонованих логістичних регресій

Модель*	Стан дерева по факту	Частка правильно передбачених, %	Загальна частка правильно передбачених, %	Співвідношення шансів (Odds ratio)**
1	Живе	92,76	78,82%	10,87
	Усохле	47,14		
2	Живе	94,34	89,96%	56,44
	Усохле	80,00		
3	Живе	93,44	89,91	65,71
	Усохле	82,19		

\* 1 – відносний нагар, %; 2 – дехромація, %; 3 – діаметр, дехромація, відносний нагар;

\*\* При значенні «співвідношення шансів» більше за 1,00 модель вважається значимою.

Модель, що включала дехромацію, відносний нагар та діаметр (4), прогнозує виживаність з точністю 89,91 % (див. табл. 6). Це рівняння правильно визначає дерева, що виживуть (з точністю 93,44 %), і дає найкращу точність прогнозу всихаючих дерев 82,2 %:

$$P = \exp(-6,294-0,443d+0,085D+0,039H_{\text{відн.}}) / (1 + \exp(-6,294-0,443d+0,085D+0,039H_{\text{відн.}})), \quad (4)$$

де  $D$  – дехромація, %;

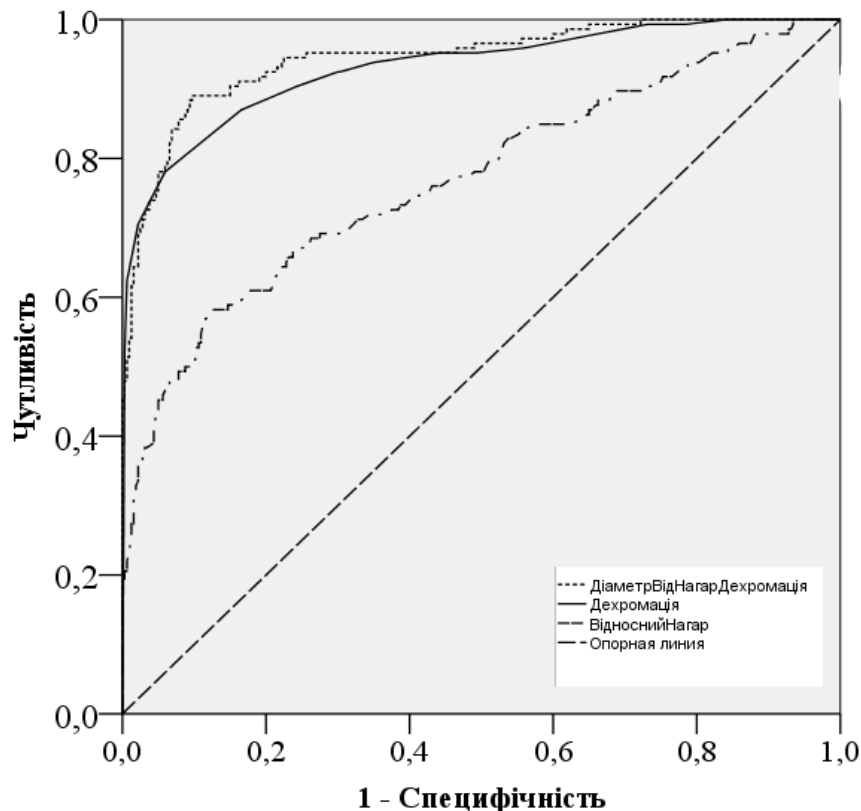
$H_{\text{відн.}}$  – відносний нагар, %;

$d$  – діаметр дерева, см.

Побудова ROC-кривих за результатами запропонованих логістичних регресій підтвердила, що найбільш якісними моделями є модель із застосуванням «дехромації, діаметра та відносного нагару» та «дехромації».

Своєрідним методом порівняння ROC-кривих є оцінка площі під кривими AUC (*Area Under Curve*). Теоретично площа змінюється від 0 до 1,0, але оскільки модель завжди характеризується кривою, що розміщується вище опорної лінії, то зазвичай говорять про зміни від 0,5 («марний» класифікатор) до 1,0 («ідеальна модель»).

Оцінка площі під кривими підтвердила (рис. 4, табл. 7), що кращими моделями для прогнозування всихання дерева є моделі, що включають «діаметр, відносний нагар та дехромацію» ( $AUC=0,95 \pm 0,012$ ) та «дехромацію» (з дещо гіршим показником,  $AUC = 0,93 \pm 0,014$ ). Обидві моделі мають відмінну якість за класифікацією. Модель, що включає лише «відносний нагар» ( $AUC = 0,77 \pm 0,025$ ), має добру якість, але значно поступається двом попереднім. Проте всі три моделі є доволі якісними (нульова гіпотеза про незначимість моделі відкидається при значенні AUC, більшому за 0,5).



**Рис. 4 – ROC-криві для перевірки результатів, отриманих з використанням запропонованих логістичних регресій**

Таблиця 7

**Оцінка площі під кривими (AUC – Area Under Curve) для порівняння отриманих ROC-кривих**

Модель	Площа під кривою (AUC)	95 % довірчий інтервал (AUC)	
		Нижня границя	Верхня границя
Відносний нагар $H_{відн.}$	0,77 ± 0,025	0,72	0,82
Дехромація $D$	0,93 ± 0,014	0,90	0,96
Діаметр – Відносний нагар – Дехромація	0,95 ± 0,012	0,92	0,97

Ідеальна модель має стовідсоткову чутливість та специфічність. Компроміс знаходять за допомогою «границі відсікання», тобто граничного значення, яке впливає на співвідношення  $Se$  та  $Sp$ . У класичній логістичній регресії границя відсікання прийнята на рівні 0,5. За допомогою ROC-аналізу можна аргументувати зміну цієї границі для збільшення правильно спрогнозованих позитивних результатів (у нашому випадку – виявлення дерев, що всохнуть) (табл. 8).

Зниження значення границі відсікання, з 0,5 до 0,25–0,26 дало змогу суттєво покращити якість прогнозу потенційно слабких дерев, що всохнуть впродовж 3 років після пожежі.

Таблиця 8

**Корегування порогу відсікання для запропонованих моделей**

Позитивне*, якщо більше або дорівнює:	Чутливість ( $Se$ )	Специфічність ( $Sp$ )
Діаметр – Відносний нагар – Дехромація		
0,25	0,91	0,82
0,3	0,9	0,85
0,4	0,89	0,89
Дехромація		
0,26	0,9	0,76
0,37	0,87	0,83
Відносний нагар		
0,25	0,69	0,69

\* тобто «1» – класифікується, як дерево, що всохне

### Висновки

Запропоновано таблиці відпаду дерев після пожежі. Інтенсивність як за часткою дерев, так і за часткою за запасом визначали залежно від типу та величини пошкодження соснового молодняка (за дехромацією та відносним нагаром). Незначні пошкодження стовбура призводять до загибелі дерев. Вже при пошкодженні стовбура 31–40 % всихає третина дерев (25,4 % за кількістю та 20,2 % за запасом у 2011 р. та 33,9 % за кількістю і 24,2 % за запасом – у 2013 та 2014 рр.). Летальним же рівнем пошкодження стовбура є 51–60 % «відносного нагару» на деревах, коли гине 74 % дерев групи та 78 % за запасом. Незначні пошкодження хвої дерев зазвичай не приводили до всихання дерев. Так, при дехромації 21–30 % всихає всього 2,7 % дерев, або 0,4 % за запасом. При дехромації 91–100 % дерева не мають шансів на відновлення (96,8 та 96,5 % відповідно).

Кращими виявилися моделі з такими комплектами предикторів: дехромація; дехромація, відносний нагар, діаметр. Точність їх сягає майже 90 % (але точність прогнозування всихання дерев є значно меншою – 80–82 %). Деяко меншу точність має модель з використанням як предиктора лише відносного нагару (79 %).

ROC-аналізом підтверджено високу якість перших двох моделей. Оцінка площі під кривими (AUC) підтвердила, що кращими моделями для прогнозування всихання дерева є моделі, що включають діаметр, відносний нагар та дехромацію (AUC = 0,95 ± 0,012) та дехромацію (з гіршим показником AUC = 0,93 ± 0,014). Обидві моделі мають відмінну якість



за класифікацією. Модель, що включає лише відносний нагар ( $AUC = 0,77 \pm 0,025$ ), має добру якість, але значно поступається двом попереднім.

Зменшення граничного відсікання для класифікації отриманих результатів логістичних рівнянь з 0,5 до 0,25 покращило прогнозування дерев, що всохнуть, до 90–91 %.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Воробьев Д. В. Методика лесотипологических исследований / Д. В. Воробьев. – К. : Урожай, 1967. – 386 с.
2. Ворон В. П. Особенности послепожарного развития сосновых молодняков / В. П. Ворон, С. Г. Сидоренко // Проблемы лесоведения и лесоводства : Сб. науч. тр. ИЛ НАН Беларуси. Выпуск 74. – Гомель: Институт леса НАН Беларуси, 2014. – 513–523 с.
3. Лакин Г. Ф. Биометрия : уч. пособ. для университетов и педаг. институтов / Г. Ф. Лакин. – М. : Высшая школа, 1973г.– 343 с.
4. Особливості розвитку дерев при різних типах пошкодження сосняків після низових пожеж/ В. П. Ворон, С. Г. Сидоренко, С. С. Мельник, С. В. Івашинюта // Наук. праці ЛАНУ.– 2012.– вип. 10. – С. 148–154.
5. Прогнозирование развития сосняков Украины, поврежденных низовыми пожарами // В. П. Ворон, С. Г. Сидоренко, Е. Е. Мельник, О. Н Ткач // Современное состояние и перспективы охраны и защиты лесов в системе устойчивого развития : материалы междунар науч.-практ. конф., Гомель, 09–11 октября 2013 г. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 2013. – С. 9–12.
6. Fawcett T. ROC Graphs: Notes and Practical Considerations for Researchers / T. Fawcett // ReCALL. – 2004. – Vol. 31, Iss. HPL-2003-4, Publisher: Citeseer. – P. 1-38.
7. Regelbrugge C. Modeling tree mortality following wildfire in *Pinus ponderosa* forests in the central Sierra Nevada of California / J. C. Regelbrugge and S. G. Conard // International Journal of Wildland Fire. – 1993. – Vol. 3, No. 3.– P. 139–148.
8. Thies W. G. Prediction of delayed mortality of fire-damaged ponderosa pine following prescribed fires in eastern Oregon, USA / W. G. Thies, D. J. Westlind, M. Loewen and G. Brenner // International Journal of Wildland Fire. – 2006.– Vol. 15. – P. 19–29.
9. Tree Mortality following Prescribed Fire and a Storm Surge Event in Slash Pine (*Pinus elliottii* var. *densa*) Forests in the Florida Keys, USA [Електрон. ресурс] / [Jay P. Sah, Michael S. Ross, James R. Snyder, Danielle E. Ogurcak] // International Journal of Forestry Research. – Volume 2010 (2010), Article ID 204795, 13 pages – Режим доступу до журналу: <http://www.hindawi.com/journals/ijfr/2010/204795/>
10. Varner J. M. Overstory tree mortality resulting from re-introducing fire to long-unburned longleaf pine forests: the importance of duff moisture / [J. M. Varner, J. K. Hiers, R. D. Ottmar et al.] // Canadian Journal of Forest Research. – 2007. – Vol. 37.– P. 1349–1358.
11. Varner J. M. Smoldering fire in long-unburned longleaf pine forests: linking fuels with fire effects : A dissertation presented to the Graduate School of the University of Florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy / J. M. Varner. – University of Florida, Gainesville, US, 2005. – 123 p.

Sidorenko S. G.

#### PREDICTION OF POST-FIRE MORTALITY AFTER SURFACE FIRES IN YOUNG PINE STANDS

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

Fire is one of the most dangerous ecological factors for forests causing catastrophic economic, environmental and social losses. Unfortunately, large-scale studies were not conducted on the diagnosis and prediction of post-fire tree mortality in Ukraine.

For present investigations, sample plots were established using standard methods in forestry in the young pine stands which was damaged by surface fire in 2011 in the Vasyschevske forestry (Kharkiv region).

The influence of different magnitudes of pine stands' damage caused by surface fires on their further development was investigated. Correlations were found between the condition of trees, the damage levels and the forest inventory indices. Intensity of trees mortality was determined, depending on the duration of the period after the fire and the damage levels. Mortality tables were also constructed.

A series of equations were developed to predict the trees condition after three years post-fire period using regression analysis. The regression analysis included the following parameters: the diameter, the tree height, Kraft class, scorch height, relative bark char and crown discoloration.

Filtering the worse predictors out from the model, we have built three logistic regressions. The best of them were models with the predictors: 1– discoloration; 2 – discoloration, diameter, relative char. Using ROC-analysis and adjusting cut-off thresholds for the models the prediction accuracy was achieved at the level of 90–91 % for trees that shall die.

**Key words:** pine stands, surface fire, types of damage, relative bark char, post-fire period, prediction of trees post-fire mortality.

Сидоренко С. Г.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СОСНОВЫХ МОЛОДНЯКОВ ПОСЛЕ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ**

*Український научно-дослідницький інститут лісного господарства і агролісомеліорації  
ім. Г. Н. Висоцького*

Пожары являются одним из наиболее опасных для лесов экологических факторов, наносящих катастрофические экономические, экологические и социальные убытки. К сожалению, серьезные исследования по диагностике и прогнозированию послепожарного развития насаждений в Украине не проводились. Пробные площади (ПП) закладывались по общепринятым в лесоводстве методам в сосновых молодняках, поврежденных низовым пожаром в 2011 г. в Васищевском лесничестве Харьковской области.

Исследована роль различной величины повреждения сосняков при низовых пожарах на их дальнейшее развитие. Выявлены корреляционные зависимости между состоянием деревьев, уровнями повреждения и таксационными показателями деревьев. Определена интенсивность усыхания деревьев в насаждении в зависимости от продолжительности послепожарного периода и уровней повреждения, разработаны таблицы отпада деревьев. С использованием регрессионного анализа построен ряд уравнений по прогнозированию состояния деревьев через три года после пожара. В регрессионный анализ включены следующие показатели: диаметр, высота дерева, класс Крафта, высота нагара, относительный нагар и дехромация.

Отсеяв худшие предикторы, мы построили 3 логистические регрессии. Лучшими из них оказались модели с такими предикторами: 1 – дехромация; 2 – дехромация, диаметр, относительный нагар. С использованием ROC-анализа и корректировки порогов отсечения для моделей была достигнута точность прогноза отпада деревьев на уровне 90–91 %.

**Ключевые слова:** сосняки, низовые пожары, типы повреждений относительный нагар, продолжительность послепожарного периода, прогнозирование послепожарного отпада.

*E-mail: loki\_888@i.ua*

*Одержано редколегією 22.08.2014*