

УДК 630*5

Г.Г. ГРИНИК¹, О.Ю. ГРОМЯК²

МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ МОРФОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕРЕВ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ У СОСНОВИХ ДЕРЕВОСТАНАХ ПОДІЛЬСЬКОЇ ВИСОЧИНИ

За результатами математико-статистичного аналізу вихідних даних обмірів 3224 дерев сосни звичайної в суборових типах лісорослинних умов та 1986 дерев – у сугрудових, встановлено, що основні морфологічні параметри крони дерев у досліджуваних лісорослинних умовах перебувають у тісній кореляційній залежності від значень діаметра та висоти стовбурів дерев.

За результатами здійсненого регресійного аналізу підібрано адекватні моделі для опису залежностей досліджуваних морфологічних показників крон дерев сосни звичайної від значень діаметра і висоти стовбура. Адекватність отриманих моделей характеризуються достатньо високими коефіцієнтами детермінації та рештою статистичних показників.

Встановлено, що дерева сосни звичайної в суборових типах лісорослинних умов характеризуються вищими значеннями протяжності і діаметра крони та нижчими значеннями висоти початку крони, порівняно із сугрудовими. Практична цінність отриманих моделей та нормативно-довідкових матеріалів полягає у їхньому використанні під час планування та здійснення господарських заходів щодо підвищення продуктивності соснових деревостанів району дослідження.

Ключові слова: сосна звичайна, моделювання показників, морфологічні показники

Вступ. Зважаючи на значний сукупний вплив на ріст та розвиток як окремих дерев, так і деревостанів загалом, комплексної взаємодії ґрунтово-гідрологічних умов та фотосинтезуючого апарату, виникає потреба у поглибленому вивченні саме морфологічних показників крони, які суттєво різняться у різних типах лісорослинних умов (ТЛУ). Морфологічні ознаки крони – її протяжність, діаметр, проекція, поверхня та об'єм суттєво впливають на можливість окремого дерева до фотосинтезу. Ці ознаки доцільно враховувати під час моделювання росту деревостану із врахуванням особливостей взаємозв'язків як для чистих, так і для змішаних соснових деревостанів.

Розвиток та моделювання морфологічних ознак крони дерев досліджували як вітчизняні, так і закордонні науковці. Загалом більшість наукових досліджень можна умовно поділити на два основні напрями: перший – дослідження особливостей висоти початку (прикріплення) крони (R. Monserud (1974), G.S. Biging (1995), J. Nagel (1999), J. Dursky (2000), H. Pretzsch (1992)), другий – вивчення залежностей, які оцінюють частку крони дерева (H. Hasenauer, R.A. Monserud (1996), H. Sterba (1995), H. Sterba, R.A. Monserud (1997)) [1]. Окремим напрямом можна виділити моделювання параметрів крон з урахуванням їх просторового розташування [7, 9].

Серед вітчизняних лісівників-науковців варто виокремити роботи, у яких досліджено залежності між морфологічними і таксаційними ознаками для таких деревних порід як бук лісовий [5], ялина європейська [1] та клен-явір [6].

Мета роботи – дослідження та моделювання динаміки основних морфологічних параметрів крони дерев сосни звичайної залежно від діаметра та висоти стовбурів у сосняках різних типів лісорослинних умов.

Методика та обсяг досліджень. Лісівничо-таксаційну характеристику деревостанів на пробних площах проведено за загальноприйнятою у лісовій таксації методикою із занесенням результатів у картку пробної площі. Під час виконання польових робіт враховано всі вимоги, які передбачені лісовпорядкувальною інструкцією із закладки пробних площ (СОУ 02.02-37-476:2006). Таксаційні показники насаджень і статистичне опрацювання матеріалів польових досліджень проведено за загальноприйнятою у лісівничих дослідженнях методикою, з використанням ЕОМ та набору стандартних прикладних програм і програмного забезпечення кафедри лісової таксації та лісовпорядкування НЛТУ України [2-4].

¹ ГРИНИК Георгій Георгійович – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри лісової таксації і лісовпорядкування, Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна. Тел.: +38-096-541-39-51. E-mail: juhrynyuk@bigmir.net

² ГРОМЯК Олег Юрійович – аспірант кафедри лісової таксації і лісовпорядкування, Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна. Тел.: +38-050-371-54-84. E-mail: gromjak88@ukr.net

Для здійснення дослідження закладено 20 стаціонарних пробних площ у соснових деревостанах у межах західної частини Подільської височини. Пробні площі заклали у свіжому та вологому дубово-соснових суборах (далі B_2 -дС та B_3 -дС), вологих грабово-дубово-соснових та дубово-соснових сугрудах (далі C_3 -з-дС та C_3 -дС) у віковому діапазоні 41-111 років; у насадженнях I^a, I та II класів бонітету та з повнотою 0,75^{±0,15}. На пробних площах обміряно основні морфолого-таксаційні показники всіх дерев, зокрема для дослідження використано обміри 3224 дерев сосни звичайної в ТЛУ B_2 і B_3 та 1986 дерев – в ТЛУ C_3 .

Результати дослідження. Для характеристики дослідного матеріалу здійснено його статистичне опрацювання, результати якого наведено у табл. 1. Потрібно зауважити, що найвищі коефіцієнти варіації характерні саме для морфологічних параметрів крон, порівняно із рештою таксаційних ознак. Для дерев со-

сни звичайної як в ТЛУ B_2 і B_3 , так і C_3 – порівняно висока мінливість відповідно притаманна протяжності крони (14,82 і 14,34), діаметру крони (17,92 та 16,92), довжині затіненої (21,17 і 20,11) та освітленої (16,63 і 15,61) частини крони, об'єму затіненої (28,04 і 34,18) та освітленої (27,55 і 25,15) частини крони, а також об'єму крони загалом (23,14 і 26,63) та об'єму стовбура (21,33 і 26,92). Вища мінливість спостерігається для висоти і діаметра стовбура та висот до початку і до найширшого місця крони для дерев сосни звичайної в сугрудових умовах порівняно із суборовими. Причиною нижчих коефіцієнтів варіації у сугрудових умовах для більшості морфологічних показників крон дерев сосни є участь супутніх порід у складі соснових деревостанів, які покращують формування крон у дерев головної породи, яка відома своєю світлолюбністю. Таким чином формуються менші за протяжністю та за діаметром крони з вищою висотою її початку і, як наслідок, кращим очищенням від гілок і сучків.

Таблиця 1

Статистики основних морфолого-таксаційних показників дерев сосни звичайної на пробних площах

Показник	Висота стовбура, м (h)	Діаметр стовбура, см (d)	Висота до початку крони, м (h _{п.кр.})	Висота до найширшого місця крони, м (h _{н.ш.кр.})	Протяжність крони, м (l)	Діаметр крони, м (b)	Довжина затіненої частини крони, м (l _з)	Довжина освітленої частини крони, м (l _о)	Об'єм затіненої частини крони, м (v _{кз.})	Об'єм освітленої частини крони, м (v _{ко})	Об'єм крони, м (v _{кр.})	Об'єм стовбура, м ³ (v _с)
ТЛУ B_2-B_3												
Середнє значення	21,8	26,1	15,7	18,5	6,1	4,1	2,8	3,3	3,6	4,7	8,3	0,647
Середнє квадратичне	22,1	27,3	16,3	18,9	6,4	4,5	3,1	3,6	4,3	5,8	9,7	0,799
Дисперсія	0,73	2,74	0,79	0,68	0,90	0,73	0,59	0,55	1,01	1,28	1,91	0,14
Варіація	3,35	10,53	5,05	3,68	14,82	17,92	21,17	16,63	28,04	27,55	23,14	21,33
Мода	21,00	32,00	12,00	14,00	7,50	3,15	3,00	2,50	1,50	2,63	6,00	0,12
Медіана	22,0	26,0	15,6	18,0	6,0	3,6	2,5	3,0	3,1	3,7	7,1	0,5
Мінімальне значення	11,0	9,5	6,5	8,0	0,5	0,8	-8,6	-2,0	-11,2	-1,8	0,4	0,0
Максимальне значення	31,2	61,0	26,1	29,5	15,5	13,3	9,0	13,9	29,4	25,4	43,5	3,9
Асиметрія	-0,16	0,50	0,19	0,13	0,42	0,91	0,11	0,73	1,72	1,58	1,59	1,55
Ексцес	-0,59	0,19	-0,86	-0,72	0,35	0,62	3,91	2,40	12,66	3,18	4,14	3,81
Помилка середньої	0,02	0,07	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,05	0,00
Показник точності дослідження	0,08	0,26	0,13	0,09	0,37	0,45	0,53	0,42	0,70	0,69	0,58	0,53
ТЛУ C_3												
Середнє значення	24,6	33,0	21,1	22,5	3,6	3,8	1,4	2,2	1,8	2,8	4,6	1,071
Середнє квадратичне	24,7	34,1	21,1	22,5	3,7	3,9	1,5	2,3	2,1	3,1	5,1	1,225
Дисперсія	1,48	4,61	1,23	1,31	0,51	0,63	0,28	0,34	0,61	0,71	1,23	0,29
Варіація	6,01	13,97	5,82	5,86	14,34	16,92	20,11	15,61	34,18	25,15	26,63	26,92
Мода	26,00	30,00	22,00	24,00	3,00	3,50	1,00	2,00	1,17	2,33	4,00	1,22
Медіана	25,0	32,0	22,0	23,0	3,0	3,8	1,0	2,0	1,4	2,7	4,3	0,9
Мінімальне значення	18,0	10,0	13,0	16,0	1,0	1,0	-2,0	1,0	-2,3	0,3	0,7	0,1
Максимальне значення	28,0	62,0	24,0	26,0	9,0	8,8	7,0	7,0	12,3	10,8	21,8	3,8
Асиметрія	-0,66	0,41	-0,84	-0,62	1,12	0,79	1,76	1,35	2,69	1,50	1,59	1,11
Ексцес	-0,49	-0,05	0,62	-0,38	3,98	1,24	8,97	6,56	15,37	4,02	5,77	1,36
Помилка середньої	0,05	0,15	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,01
Показник точності дослідження	0,19	0,44	0,18	0,19	0,46	0,54	0,64	0,50	1,08	0,80	0,85	0,85

Традиційно, першим етапом для моделювання динаміки морфологічних параметрів крони дерев є визначення морфолого-таксаційних показників, які є визначальними при її формуванні. Для цього

здійснено кореляційний аналіз між основними морфолого-таксаційними показниками дерев сосни звичайної у суборових та сугрудових умовах, результати якого представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляції між основними морфолого-таксаційними показниками дерев сосни звичайної

Показник	$h, \text{ м}$	$d, \text{ см}$	$h_{p.kr.}, \text{ м}$	$h_{n.m.kr.}, \text{ м}$	$l, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$l_z, \text{ м}$	$l_o, \text{ м}$	$v_{kr.z.}, \text{ м}^3$	$v_{kr.o.}, \text{ м}^3$	$v_{kr.}, \text{ м}^3$	$v_s, \text{ м}^3$
ТЛУ B_2-B_3												
Висота стовбура, м (h)	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Діаметр стовбура, см (d)	0,91	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Висота до початку крони, м ($h_{p.kr.}$)	0,87	0,72	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Висота до найширшого місця крони, м ($h_{n.m.kr.}$)	0,93	0,76	0,94	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
Протяжність крони, м (l)	0,71	0,74	-0,42	-0,19	1,00	–	–	–	–	–	–	–
Діаметр крони, м (b)	0,71	0,75	0,58	0,57	0,05	1,00	–	–	–	–	–	–
Довжина затіненої частини крони, м (l_z)	-0,07	-0,07	-0,43	-0,10	0,75	-0,18	1,00	–	–	–	–	–
Довжина освітленої частини крони, м (l_o)	0,19	0,18	-0,19	-0,18	0,72	0,26	0,08	1,00	–	–	–	–
Об'єм затіненої частини крони, м ($v_{kr.z.}$)	0,39	0,45	0,05	0,31	0,63	0,53	0,69	0,22	1,00	–	–	–
Об'єм освітленої частини крони, м ($v_{kr.o.}$)	0,51	0,58	0,25	0,24	0,44	0,80	-0,07	0,73	0,48	1,00	–	–
Об'єм крони, м ($v_{kr.}$)	0,53	0,61	0,19	0,32	0,60	0,79	0,28	0,60	0,81	0,90	1,00	–
Об'єм стовбура, м ³ (v_s)	0,80	0,97	0,71	0,75	0,04	0,74	-0,08	0,15	0,44	0,57	0,60	1,00
ТЛУ C_3												
Висота стовбура, м (h)	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Діаметр стовбура, см (d)	0,93	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Висота до початку крони, м ($h_{p.kr.}$)	0,88	0,75	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Висота до найширшого місця крони, м ($h_{n.m.kr.}$)	0,94	0,78	0,93	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
Протяжність крони, м (l)	0,78	0,73	0,00	0,25	1,00	–	–	–	–	–	–	–
Діаметр крони, м (b)	0,76	0,85	0,20	0,27	0,39	1,00	–	–	–	–	–	–
Довжина затіненої частини крони, м (l_z)	0,30	0,31	-0,04	0,32	0,70	0,23	1,00	–	–	–	–	–
Довжина освітленої частини крони, м (l_o)	0,38	0,31	0,04	0,04	0,72	0,32	0,00	1,00	–	–	–	–
Об'єм затіненої частини крони, м ($v_{kr.z.}$)	0,34	0,46	0,01	0,32	0,69	0,64	0,86	0,13	1,00	–	–	–
Об'єм освітленої частини крони, м ($v_{kr.o.}$)	0,41	0,51	0,11	0,15	0,65	0,81	0,12	0,78	0,47	1,00	–	–
Об'єм крони, м ($v_{kr.}$)	0,44	0,57	0,08	0,27	0,78	0,86	0,53	0,57	0,83	0,88	1,00	–
Об'єм стовбура, м ³ (v_s)	0,79	0,98	0,74	0,76	0,43	0,54	0,30	0,31	0,45	0,51	0,56	1,00

Результати здійсненого кореляційного аналізу свідчать, що всі виміряні морфологічні параметри крони (висота до початку та до найширшого місця крони, протяжність та діаметр крони) перебувають у тісній кореляційній залежності від висоти та діаметра стовбура дерев. При цьому на ступінь тісноти зв'язку істотний вплив має належність деревостанів до відповідних типів лісорослинних умов.

Між висотами і діаметрами стовбурів дерев сосни звичайної існує тісний кореляційний зв'язок як у суборових, так і у сугрудових типах лісорослинних умов, який, за результатами пошуку, підбору і статистичного аналізу різноманітних варіантів, найкраще описується експоненціальною функцією, що у нашому випадку має загальний вигляд [8]:

$$n(d) = \exp(SEd/2 \cdot (a + b \cdot \ln(\ln(d + 1)))) \quad (1)$$

де h – висота стовбура, м; SEd – стандартна помилка середнього діаметра стовбура; a, b – коефіцієнти моделі; d – діаметр стовбура, см.

Для дерев сосни звичайної у суборових типах лісорослинних умов модель для прогнозування висоти дерев, залежно від їхнього діаметра, набуває вигляду

$$h = \exp(0,263/2 \cdot (8,9655 + 12,2142 \cdot \ln(\ln(d + 1)))) \quad (2)$$

Оскільки коефіцієнт детермінації становить 0,89, то модель описує близько 90% спостережуваних випадків. Параметри моделі виявилися значущими на 5%-му рівні, що визначається за допомогою t -критерію Ст'юдента (фактичні значення критерію коефіцієнтів моделі дорівнюють 12,6-24,5 за критичного значення t -критерію – 1,96).

Моделювання висот стовбурів дерев сосни зви-

чайної залежно від діаметрів стовбурів у деревостанах сугрудових типів лісорослинних умов найкраще описується функцією

$$h = \exp(0,413/2 \cdot (3,8149 + 9,7850 \cdot \ln(\ln(d + 1))))). \quad (3)$$

Ця модель описує 87% спостережуваних випадків (коефіцієнт детермінації 0,87). Значення коефіцієнта детермінації дещо менше, ніж для моделі соснових деревостанів у суборових типах лісорослинних умов, що насамперед пов'язане із впливом супутніх порід на ріст дерев головної породи. Значущість параметрів моделі підтверджується на 5%-му рівні (фактичні значення *t*-критерію коефіцієнтів моделі становлять 26,9-42,1 за критичного значення *t*-критерію – 1,96). Доцільність внесення параметрів у модель також підтверджує слабка кореляція між ними.

На рис. наведено графічну інтерпретацію залежностей між діаметрами та висотами стовбурів дерев сосни звичайної, побудовані за запропонованими моделями (2) і (3) для відповідних типів лісорослинних умов.

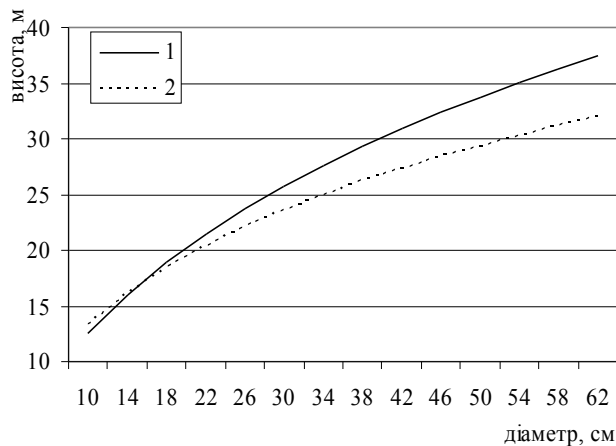


Рис. Залежність між висотами та діаметрами для дерев сосни звичайної в типах лісорослинних умов: 1 – C_3 ; 2 – B_2 та B_3

Відповідно до отриманих моделей, для сугрудових типів лісорослинних умов зі збільшенням діаметра стовбура відзначено інтенсивніший ріст за висотою стовбура дерев сосни звичайної, порівняно зі суборовими умовами.

Для побудови адекватних моделей динаміки морфометричних показників крони дерев сосни звичайної у сосняках досліджуваних типів лісорослинних умов здійснено регресійний аналіз на основі отриманих значень висоти початку, протяжності й діаметра крони і враховуючи залежність цих показників від висоти та діаметра стовбура дерева.

Висота початку крони впливає не тільки на ростові процеси дерев, але й також на визначення категорії технічної придатності окремого дерева та на товарну структуру деревостану загалом. Висоту початку крони, враховуючи її тісний кореляційний зв'язок з діаметрами і висотами стовбурів дерев, описано за допомогою моделі загального виду

$$h_{p.kr.}(h, d) = h \cdot \exp(a \cdot h^b \cdot d). \quad (4)$$

Межі області визначення функції визначаються такими системами рівнянь:

$$\begin{cases} h_{p.kr.} \geq f_1(d), \text{ якщо } d_1^{\min} \leq d \leq d_1^{\max}; \\ h_{p.kr.} \leq f_2(d), \text{ якщо } d_2^{\min} \leq d \leq d_2^{\max}; \\ h_{p.kr.} \geq f_3(h), \text{ якщо } h_1^{\min} \leq h \leq h_1^{\max}; \\ h_{p.kr.} \leq f_4(h), \text{ якщо } h_2^{\min} \leq h \leq h_2^{\max}. \end{cases} \quad (5)$$

Для опису обмежень області визначення функції вибрано та застосовано параболічне рівняння виду $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$, де *a*, *b*, *c* – коефіцієнти моделі. Значення коефіцієнтів функції (4) та системи обмежень (5) наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Коефіцієнти функції (4) моделей залежності висоти початку крони та меж області її визначення (5) для різних типів лісорослинних умов

Рівняння	(4)		$f_1(d)$			$f_2(d)$			$f_3(h)$			$f_4(h)$		
Коефіцієнти	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i> ₁	<i>b</i> ₁	<i>c</i> ₁	<i>a</i> ₂	<i>b</i> ₂	<i>c</i> ₂	<i>a</i> ₃	<i>b</i> ₃	<i>c</i> ₃	<i>a</i> ₄	<i>b</i> ₄	<i>c</i> ₄
ТЛУ B_2-B_3														
Значення коефіцієнтів	-28,183	-2,504	-7,640	0,648	-0,003	8,532	0,860	-0,010	-6,433	0,845	0,002	-8,254	1,470	-0,012
min	–		16			12			10			32		
max	–		60			36			28			60		
ТЛУ C_3														
Значення коефіцієнтів	-0,999	-1,673	-2,396	0,631	-0,004	10,338	0,857	-0,010	-1,939	0,915	-0,002	-4,232	1,306	-0,009
min	–		16			12			10			32		
max	–		60			36			28			60		

Запропоновані моделі характеризуються достатньо високими коефіцієнтами детермінації, який для суборових типів лісорослинних умов становить 0,86, а для сугрудових – 0,84. Значущість параметрів моделей підтверджується фактичними значеннями *t*-критерію, які на 5%-му рівні перебувають у межах 16,8-42,4 та 17,5-39,2 відповідно.

У табл. 4 наведено результати табулювання прийнятих моделей динаміки залежності значень висоти початку крони дерев сосни звичайної у досліджуваних типах лісорослинних умов із враху-

ванням меж області їх визначення. За результатами досліджень встановлено, що висота початку крони дерев сосни звичайної у суборових типах лісорослинних умов є вищою, порівняно із сугрудовими. Причиною цього є відсутність дерев супутніх порід, або їхня частка у складі деревостану є незначною, що призводить до підвищення внутрішньовидової боротьби між деревами сосни звичайної, наслідком якої є вища диференціація за саме висотою початку крони [3, 4].

Таблиця 4

Залежність висоти початку крони дерев сосни звичайної від діаметра та висоти стовбура

Діаметр, см \ Висота, м	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60
ТЛУ B_2-B_3													
10	3,5	2,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	6,1	4,9	3,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14	8,9	7,6	6,5	5,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–
16	11,5	10,4	9,3	8,3	7,5	–	–	–	–	–	–	–	–
18	14,1	13,0	12,0	11,1	10,2	9,4	–	–	–	–	–	–	–
20	16,6	15,6	14,7	13,8	12,9	12,2	11,4	–	–	–	–	–	–
22	–	18,1	17,2	16,4	15,6	14,9	14,2	13,5	–	–	–	–	–
24	–	20,5	19,7	18,9	18,2	17,5	16,8	16,2	15,6	15,0	–	–	–
26	–	–	22,1	21,4	20,7	20,1	19,5	18,8	18,2	17,7	17,1	–	–
28	–	–	–	23,8	23,2	22,6	22,0	21,4	20,9	20,3	19,8	19,2	18,7
30	–	–	–	–	–	25,1	24,5	23,9	23,4	22,9	22,4	21,9	21,4
32	–	–	–	–	–	–	26,9	26,4	25,9	25,4	24,9	24,5	24,0
ТЛУ C_3													
10	7,8	7,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	9,9	9,3	8,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14	12,1	11,5	11,0	10,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
16	14,2	13,7	13,2	12,7	12,2	–	–	–	–	–	–	–	–
18	16,4	15,9	15,4	14,9	14,4	14,0	–	–	–	–	–	–	–
20	18,5	18,0	17,5	17,1	16,6	16,2	15,7	–	–	–	–	–	–
22	–	20,1	19,6	19,2	18,8	18,4	17,9	17,5	–	–	–	–	–
24	–	22,2	21,8	21,3	20,9	20,5	20,1	19,7	19,3	19,0	–	–	–
26	–	–	23,9	23,5	23,1	22,7	22,3	21,9	21,5	21,2	20,8	–	–
28	–	–	–	25,6	25,2	24,8	24,4	24,1	23,7	23,3	23,0	22,7	22,3
30	–	–	–	–	–	26,9	26,6	26,2	25,9	25,5	25,2	24,8	24,5
32	–	–	–	–	–	–	28,7	28,4	28,0	27,7	27,3	27,0	26,7

Форма, протяжність та діаметр крони сукупно визначають рівень вуглецедепонування здатності як окремого дерева, так і деревостану загалом. Зважаючи на тісну кореляційну залежність протяжності крони від діаметра та висоти стовбура дерева для моделювання такого зв'язку використали експо-

ненціальну функцію типу

$$l = \exp(a + b \cdot \ln(d + 1) + c \cdot \ln(h)). \quad (6)$$

Значення коефіцієнтів функції (6) та системи обмежень (5) наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Коефіцієнти функції (6) моделей залежності протяжності крони та меж області її визначення (5) для різних типів лісорослинних умов

Рівняння	(6)			$f_1(d)$			$f_2(d)$			$f_3(h)$			$f_4(h)$		
Коефіцієнти	a	b	c	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	a_3	b_3	c_3	a_4	b_4	c_4
ТЛУ B_2-B_3															
Значення коефіцієнтів	1,701	0,719	-0,728	7,907	-0,005	0,001	2,577	0,111	0,001	8,290	-0,071	0,004	7,540	-0,389	0,011
min	–			16			12			10			32		
max	–			60			36			28			60		
ТЛУ C_3															
Значення коефіцієнтів	0,047	0,901	-0,601	2,551	0,056	0,001	0,749	0,084	0,001	2,763	0,049	0,002	4,235	-0,282	0,008
min	–			16			12			10			32		
max	–			60			36			28			60		

Запропоновані моделі залежностей протяжності крони від висоти і діаметра стовбура дерева характеризуються достатньо високими коефіцієнтом детермінації, який для суборових типів лісорослинних умов становить 0,82, а для сугрудових – 0,79. Коефіцієнти детермінації моделей залежності протяжності крони є нижчі, порівняно із моделями висоти початку крони, однією з причин чого є значно вища мінливість саме

протяжності крони для дерев сосни звичайної як у суборових, так і в сугрудових типах лісорослинних умов. Значущість параметрів моделей підтверджується фактичними значеннями *t*-критерію (1,96), які на 5%-му рівні перебувають у межах 8,9-14,2,4 та 11,7-19,4 відповідно для суборових та сугрудових типів лісорослинних умов. Результати поверхні відгуку моделі (6) із врахуванням меж області їх визначення наведено у табл. 6.

Таблиця 6

Залежність протяжності крони дерев сосни звичайної від діаметра та висоти стовбура

Діаметр, см \ Висота, м	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60
ТЛУ B_2-B_3													
10	6,5	7,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	5,7	6,9	8,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14	5,1	6,2	7,2	8,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
16	4,6	5,6	6,5	7,4	8,2	–	–	–	–	–	–	–	–
18	4,2	5,1	6,0	6,8	7,5	8,3	–	–	–	–	–	–	–
20	3,9	4,7	5,5	6,3	7,0	7,6	8,3	–	–	–	–	–	–
22	–	4,4	5,2	5,8	6,5	7,1	7,7	8,3	–	–	–	–	–
24	–	4,2	4,8	5,5	6,1	6,7	7,3	7,8	8,4	8,9	–	–	–
26	–	–	4,6	5,2	5,8	6,3	6,9	7,4	7,9	8,4	8,9	–	–
28	–	–	–	4,9	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	7,9	8,4	8,9	9,3
30	–	–	–	–	–	5,7	6,2	6,7	7,1	7,6	8,0	8,4	8,8
32	–	–	–	–	–	–	5,9	6,3	6,8	7,2	7,6	8,0	8,4
ТЛУ C_3													
10	2,6	3,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	2,4	3,0	3,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14	2,2	2,8	3,3	3,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–
16	2,0	2,5	3,1	3,6	4,1	–	–	–	–	–	–	–	–
18	1,9	2,4	2,9	3,4	3,8	4,3	–	–	–	–	–	–	–
20	1,7	2,2	2,7	3,1	3,6	4,0	4,5	–	–	–	–	–	–
22	–	2,1	2,5	3,0	3,4	3,8	4,2	4,6	–	–	–	–	–
24	–	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,2	–	–	–
26	–	–	2,3	2,7	3,1	3,5	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	–	–
28	–	–	–	2,6	2,9	3,3	3,7	4,0	4,4	4,7	5,1	5,4	5,7
30	–	–	–	–	–	3,2	3,5	3,9	4,2	4,5	4,9	5,2	5,5
32	–	–	–	–	–	–	3,4	3,7	4,0	4,4	4,7	5,0	5,3

Аналізуючи отримані дані, встановлено, що для суборових типів лісорослинних умов характерними є вищі значення протяжності крони, порівняно із сугрудовими. Очевидно, що нижча трофність ґрунтів у суборових типах лісорослинних умов є причиною для більш активного розвитку крони дерев сосни звичайної саме в цих ТЛУ – за рахунок збільшення фотосинтезуючого апарату дерева акумулюють необхідну кількість вуглецю для їхнього нормального

росту та розвитку.

Для опису залежності діаметра крони від висоти і діаметра стовбура дерева використано експоненціальну функцію, яка має такий загальний вигляд:

$$b = \exp(a + b \cdot \ln(d) + c \cdot h). \quad (7)$$

Значення коефіцієнтів функції (7) та системи обмежень (5) наведено у табл. 7.

Таблиця 7

Коефіцієнти функції (7) моделей залежності діаметра крон та меж області її визначення (5) для різних типів лісорослинних умов

Рівняння	(6)			$f_1(d)$			$f_2(d)$			$f_3(h)$			$f_4(h)$		
Коефіцієнти	a	b	c	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂	c ₂	a ₃	b ₃	c ₃	a ₄	b ₄	c ₄
ТЛУ B₂-B₃															
Значення коефіцієнтів	-2,060	0,956	0,015	-0,203	0,132	0,001	-0,099	0,158	0,001	1,493	-0,049	0,012	9,412	-0,839	0,023
min	–			16			12			10			32		
max	–			60			36			28			60		
ТЛУ C₃															
Значення коефіцієнтів	-2,188	0,948	0,015	-0,154	0,113	0,001	-0,071	0,134	0,001	1,228	-0,032	0,010	7,755	-0,690	0,019
min	–			16			12			10			32		
max	–			60			36			28			60		

Високе значення коефіцієнтів детермінації (0,89 та 0,91 для суборових та сугрудових типів лісорослинних умов відповідно), а також фактичне значеннями *t*-критерію на 5%-му рівні (14,7-32,5 порівняно із табличним 1,96) підтверджують доцільність

використання моделі (7) під час побудови залежностей діаметра крони від висоти і діаметра стовбура для дерев сосни звичайної. Результати поверхні відгуку моделі (7) із врахуванням меж області їх визначення наведено у табл. 8.

Таблиця 8

Залежність діаметра крони дерев сосни звичайної від діаметра та висоти стовбура

Діаметр, см \ Висота, м	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ТЛУ B₂-B₃													
10	1,6	2,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	1,6	2,2	2,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14	1,7	2,2	2,8	3,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
16	1,7	2,3	2,8	3,4	3,9	–	–	–	–	–	–	–	–
18	1,8	2,4	2,9	3,5	4,0	4,6	–	–	–	–	–	–	–
20	1,9	2,4	3,0	3,6	4,2	4,7	5,3	–	–	–	–	–	–
22	–	2,5	3,1	3,7	4,3	4,9	5,5	6,1	–	–	–	–	–
24	–	2,6	3,2	3,8	4,4	5,0	5,6	6,2	6,8	7,4	–	–	–
26	–	–	3,3	3,9	4,6	5,2	5,8	6,4	7,0	7,7	8,3	–	–
28	–	–	–	4,1	4,7	5,4	6,0	6,6	7,3	7,9	8,5	9,1	9,8
30	–	–	–	–	–	5,5	6,2	6,8	7,5	8,1	8,8	9,4	10,1
32	–	–	–	–	–	–	6,4	7,0	7,7	8,4	9,0	9,7	10,4
ТЛУ C₃													
10	1,4	1,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	1,4	1,8	2,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14	1,4	1,9	2,4	2,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–
16	1,5	2,0	2,4	2,9	3,3	–	–	–	–	–	–	–	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
18	1,5	2,0	2,5	3,0	3,4	3,9	–	–	–	–	–	–	–
20	1,6	2,1	2,6	3,1	3,5	4,0	4,5	–	–	–	–	–	–
22	–	2,1	2,6	3,1	3,6	4,1	4,6	5,1	–	–	–	–	–
24	–	2,2	2,7	3,2	3,7	4,3	4,8	5,3	5,7	6,2	–	–	–
26	–	–	2,8	3,3	3,9	4,4	4,9	5,4	5,9	6,4	6,9	–	–
28	–	–	–	3,4	4,0	4,5	5,0	5,6	6,1	6,6	7,1	7,7	8,2
30	–	–	–	–	–	4,6	5,2	5,7	6,3	6,8	7,4	7,9	8,4
32	–	–	–	–	–	–	5,3	5,9	6,5	7,0	7,6	8,1	8,7

За результатами аналізу даних табл. 8 встановлено, що для суборових типів лісорослинних умов характерними є вищі значення діаметра крони, порівняно із сугрудовими. Пояснення такого явища є аналогічним, як і для протяжностей крон дерев сосни звичайної. Крім того, участь супутніх порід як підгону в сугрудових типах лісорослинних умов позитивно впливають на формування компактних за розміром крон у дерев сосни звичайної. Для дерев сосни звичайної збільшення діаметра крони як у суборових, так і у сугрудових типах лісорослинних умов мають однакові тенденції: для однакової висоти стовбура дерева простежується збільшення діаметра крони із збільшенням діаметра стовбура; зі збільшенням висоти за однакового діаметра стовбура також відзначено збільшення значень цього морфологічного параметра.

Адекватність усіх використаних моделей залежностей досліджуваних морфологічних показників крон від висоти і діаметра стовбура перевірено за допомогою *F*-критерію Фішера, при цьому розраховані значення *F*-критерію виявилися вищими за критичні, що дає підстави з імовірністю 0,95 стверджувати про адекватність отриманих моделей вищезгаданим [2].

Висновки. За результатами статистичного та кореляційного аналізів емпіричного матеріалу встановлено, що основні морфологічні параметри крони дерев сосни звичайної як у суборових, так і у сугрудових типах лісорослинних умов перебувають у тісній кореляційній залежності від значень діаметра та висоти стовбурів дерев.

Здійснений регресійний аналіз дав змогу підібрати адекватні моделі для опису залежностей досліджуваних морфологічних показників крон дерев сосни звичайної. Адекватність отриманих моделей характеризуються достатньо високими коефіцієнтами детермінації.

Отримані моделі залежностей між вибраними морфологічними показниками крони і таксаційними ознаками дерев сосни звичайної з урахуванням особливостей їхнього просторового взаємного розташування доцільно використовувати під час моделювання процесів росту та розвитку соснових деревостанів у суборових і сугрудових типах лісорослинних умов та при плануванні особливості організації господарства в них. Практична цінність отриманих моделей та нормативно-довідкових ма-

теріалів полягає у їхньому використанні під час планування та здійснення господарських заходів щодо підвищення продуктивності соснових деревостанів району дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Гадов К.** Моделювання параметрів крони дерев в Українських Карпатах / К. Гадов, М.П. Горошко, М.М. Король // Науковий вісник УкрДЛТУ. – 2003. – Вип. 13.3. – С. 264-273.
- Горошко М.П.** Біометрія : навч. посібн. / М.П. Горошко, С.І. Миклуш, П.Г. Хомюк. – Львів : Вид-во “Камула”, 2004. – 236 с.
- Громяк О.Ю.** Дослідження особливостей морфолого-таксаційної будови соснових деревостанів у суборових умовах / О.Ю. Громяк, Г.Г. Гриник, М.І. Ярош // Науковий вісник НЛТУ України. – 2013. – Вип. 23.1. – С. 84-89.
- Громяк О.Ю.** Дослідження та статистичний аналіз морфолого-таксаційної будови соснових деревостанів у сугрудових умовах / О.Ю. Громяк, Г.Г. Гриник, П.П. Мосейчук, А.В. Шишкін // Науковий вісник НЛТУ України. – 2014. – Вип. 24.1. – С. 39-44.
- Ільків І.С.** Встановлення залежностей між морфологічними і таксаційними показниками дерев бука лісового методами множинної регресії / І.С. Ільків // Науковий вісник УкрДЛТУ. – 2002. – Вип. 12.8. – С. 111-114.
- Пукман В.В.** Моделі динаміки основних морфологічних показників крон дерев клена-явора яворових деревостанів Українських Карпат / В.В. Пукман, Г.Г. Гриник // Науковий вісник НЛТУ України. – 2013. – Вип. 23.17. – С. 58-66.
- Davies O.** The contribution of structural indices to the modelling of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) and birch (*Betula* spp.) crowns / O. Davies, A. Pommerening // Forest Ecology and Management. – 2008. – Vol. 256. – Pp. 68-77.
- Peper P.J.** Equations for predicting diameter, height, crown width, and leaf area of san joaquin valley street trees / P.J. Peper, E.G. McPherson, and S.M. Mori // Journal of Arboriculture. – 2001. – Vol. 27(6). – Pp. 306-317.
- Thorpe H.C.** Competition and tree crowns: A neighborhood analysis of three boreal tree species / H.C. Thorpe et al. // Forest Ecology and Management, 2010. – Vol. 259. – Pp. 1586-1596.

Г.Г. Гриник, О.Ю. Громяк

Н. Нрунок, О. Громяк

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ
МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ
В СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЯХ ПОДОЛЬСКОЙ
ВОЗВЫШЕННОСТИ**

По результатам математико-статистического анализа исходных данных измерений 3224 деревьев сосны обыкновенной в суборовых типах лесорастительных условий и 1986 деревьев – в сугрудовых, установлено, что основные морфологические параметры крон деревьев в исследуемых лесорастительных условиях находятся в тесной корреляционной зависимости со значениями диаметра и высоты стволов деревьев.

По результатам регрессионного анализа подобраны адекватные модели для описания зависимости исследуемых морфологических показателей крон деревьев сосны обыкновенной от значений диаметра и высоты ствола. Адекватность полученных моделей характеризуется достаточно высокими коэффициентами детерминации.

Установлено, что деревья сосны обыкновенной в суборовых типах лесорастительных условий характеризуются более высокими значениями протяженности и диаметра кроны и более низкими значениями высоты начала кроны, по сравнению с сугрудовыми. Практическая ценность полученных моделей и нормативно-справочных материалов заключается в возможности их использования при планировании и осуществлении хозяйственных мероприятий по повышению производительности сосновых древостоев района исследования.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, моделирование показателей, морфологические показатели

**MODELING OF BASIC MORPHOLOGICAL
INDEXES OF SCOTS PINE TREES IN PINE
FOREST STANDS OF PODIL'SKA UPLAND**

As a result of mathematical and statistical analysis of initial measurements of 3224 of Scots pine trees in the “subor” types of site conditions and 1986 trees in “sugrud” types (P.S. Pohrebnyak classification), we found that basic morphological parameters of tree crowns in the studied site conditions are in close cross-correlation dependence on the values of diameter and height of tree stems.

As a result of completed regressive analysis we fitted adequate models for description of relationships between studied morphological indexes of Scots pine tree crowns and their stem diameter and height. Adequacy of the models is characterized by high coefficients of determination and other statistical indexes. In addition, they are tested by *F*-criterion, the values of which appeared to be higher than critical with probability of 0,95.

We found that trees of Scots pine in the site conditions of “subor” type are characterized by higher length and diameter of the crowns and lower values of height of beginning point of the crowns, compared with the “sugrud” types. The increase of crown length and diameter have identical tendencies in both site condition types: they increase with the increase of stem diameter.

The relationships between described crown morphological indexes and evaluated parameters of Scots pine trees, taking into account their specific spatial location, could be used for further design of growth processes and the development of pine forests stands in “subor” and “sugrud” types as well as for planning forest management activities in them. Practical value of the derived models and constructed handbook data consists in their use during planning and implementation of management measures related to the increase of pine stands productivity in the research area.

Key words: Scots pine, modeling, morphological indexes