

ПОПУЛЯЦІЙНА БІОЛОГІЯ

УДК 62.50; 57.087.1

О.Г. Сіренко¹, Г.О. Сіренко², О.В. Кузишин², Л.Я. Мідак²

Загальний та кореляційний аналізи стану популяцій сосни кедрової європейської (*Pinus cembra* L.) в Українських Карпатах

¹Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка НАНУ,
вул. Тимірязєвська, 1, м. Київ, 01014, Україна

²Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна

Досліджено вплив температури, швидкості вітру, вологості, кислотності та фізико-хімічних властивостей ґрунтів, експозиції та крутизни схилу, висоти над рівнем моря на стан популяцій *Pinus cembra*. За допомогою кореляційного аналізу встановлено щільність лінійного зв'язку, ступінь лінійності і нелінійності зв'язків між складом насаджень, висотою, діаметром та віком особин, бонітетом, показною площею та повнотою насаджень, експозицією та крутизною схилу, типом лісу та висотою над рівнем моря.

Ключові слова: *Pinus cembra* L., коефіцієнт кореляції, температура, вологість, ґрунт, висота і діаметр особин, бонітет, щільність насаджень.

О.Н. Sirenko¹, Н.О. Sirenko², О.В. Kuzyshyn², L.Ya. Midak²

General and Correlative Analysis of the State of Populations of *Pinus Cembra* L. in the Ukrainian Carpathians

¹M.M. Gryshko National Botanic Garden NASU,
1, Timiryazevska Str., Kyiv, 01014, Ukraine

²Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine

The influence of temperature, speed of wind, moisture, acidity and physicochemical properties of soil, exposition and steepness of inclination, floor line on the populations' state *Pinus cembra* has been investigated. The tightness of linear linkage, coefficient of linearity and nonlinearity of planting content, height, diameter and age of species, quality index, exposition and steepness of inclination, type of woods and floor line are determined.

Key words: *Pinus cembra* L., correlation coefficient, temperature, moisture content, soil, height and diameter of species, quality index, planting tightness.

Стаття поступила до редакції 18.09.2014; прийнята до друку 15.12.2014.

Вступ

Вивчення екологічної приуроченості реліктових видів, що занесені до Червоної книги, зокрема сосни кедрової європейської (*Pinus cembra*), є актуальним для вирішення насамперед практичних завдань з охорони виду, що необхідне при сьогоdnішньому загрозливому становищі популяцій *Pinus cembra*. Знання екологічної приуроченості дозволить розробити наукові основи для створення стійких деревостанів, що потребуватимуть мінімального людського втручання, адже обмежене поширення сосни кедрової європейської пов'язане не лише з діяльністю людини, а й з вузькою толерантністю виду до дії екологічних факторів.

Серед екологічних факторів, які впливають на стан популяцій *Pinus cembra*, відносять: температурний режим, опади, експозиція схилу, висота над рівнем моря (р.м.), крутизна (стрімкість) схилу, ґрунти, повнота (щільність) насаджень, тип лісу тощо.

Мета роботи полягала в аналізі впливу екологічних факторів на стан популяцій *Pinus cembra* і пошуку кореляційних зв'язків між складом насаджень, висотою і діаметром кедр, бонітетом (продуктивністю), показною площею насаджень, повнотою (щільністю) насаджень та експозицією і крутизною (стрімкістю) схилу, висотою над рівнем моря (р.м.), типом лісу тощо.

I. Експериментальна частина

1.1. Об'єкт дослідження.

У дослідженнях *Pinus cembra* спиралися на дані матеріалів лісовпорядження державних лісових господарств: Карпатського національного природного парку (Бистрицьке, Женецьке і Татарівське лісництва); Вигодського держлісгоспу (Правицьке лісництво; Пам'ятка природи місцевого значення «Правич-2» Правицького лісництва); Ворохтянського держлісгоспу (Кременцівське лісництво; Пам'ятка природи місцевого значення «Резерват кедр Карпатського» Кременцівського лісництва); Надвірнянського держлісгоспу (Зеленське та Довбушанське лісництва; Заказник загальнодержавного значення «Бредулець» та Заповідне урочище «Яроватий» Зеленського лісництва); Осмолодського держлісгоспу (Мшанське, Гриньківське, Довго-Полянське, Бистрицьке, Менчільське, Різарнянське, Дарівське та Осмолодське лісництва; Ділянка генофонду та Загальнодержавний заказник «Яйко» Мшанського лісництва; Ділянка генофонду Гриньківського лісництва; Заказник загальнодержавного значення Піскавського лісництва; Заказник загальнодержавного значення «Грофа» Довго-Полянського лісництва; Ділянка генофонду Бистрицького лісництва; Заказник загальнодержавного значення Менчільського лісництва; Заказник загальнодержавного значення Осмолодського лісництва); Делятинського держлісгоспу (Пам'ятка природи місцевого значення «Сосна кедрова європейська» Полянського лісництва; Пам'ятка природи місцевого значення «Горган» Горганського лісництва); Державного оздоровчого комплексу (Сивульське і Гутянське лісництва); Природного заповідника «Горгани» (Черниківське та Горганське лісництва).

1.2. Піддавали статистичній обробці такі показники:

y_1 – склад насаджень, виявляючи відсоток особин *Pinus cembra* (наприклад, 7яле 3 кдр \equiv 30 % кедр, або 10 яле + кдр \equiv 2% *Pinus cembra*) від 2 до 70%;

y_2 – висота особин *Pinus cembra* [м] від 5 м до 28 м;

y_3 – діаметр особин *Pinus cembra* [см] від 8 см до 44 см;

y_4 – бонітет (продуктивність): 1; 2; 3; 4; 5;

y_5 – показна площа насаджень [га] від 0,2 га до 97 га;

y_6 – повнота (щільність) насаджень: 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8;

y_7 – вік особин *Pinus cembra* [рік] від 15 до 200 років;

x_1 – експозиція (тип) схилу, визначаючи його у цифрах за напрямком годинникової стрілки: Північ (1); Північний Схід (2); Схід (3); Південний Схід (4); Південь (5); Південний Захід (6); Захід (7); Північний Захід (8): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8;

x_2 – стрімкість (крутизна, стрімчастість) схилу [град.] від 5 град. до 60 град.;

x_3 – висота над рівнем моря [м] від 700 м до 1915 м;

x_4 – тип лісу (1, 2, 3, 4), який визначали у цифрах таким чином:

(1) АЗСГ, АЗКЯ, АЗЯС;

(2) ВЗКЯ, В4Я, ВЗЯ, В4КЯ, В4ЯС;

(3) СЗЯПБ, СЗПЯ, СЗЯ, СЗКЯ, СЗБПЯ, СЗБЯ, СЗПЕ;

(4) ДЗБПЯ,

де АЗКЯ – вологий кедрово-ялиновий бір; АЗСГ – вологий бір соснового криволісся; АЗЯС – вологий ялиново-сосновий бір; ВЗКЯ – вологий кедрово-ялиновий суббір; ВЗМКЯ – вологий модриново-кедрово-ялиновий суббір; ВЗПЯ – вологий ялицево-ялиновий суббір; ВЗЯ – вологий чисто-ялиновий суббір; ВЗЯС – вологий ялиново-сосновий суббір; В4КЯ – сирий кедрово-ялиновий суббір; В4Я – сирий чисто-ялиновий суббір; В4ЯС – сирий ялиново-сосновий суббір; СЗБПЯ – вологий буково-ялицевий суялиничник; СЗБЯ – вологий буково-ялиновий суялиничник; СЗКЯ – вологий кедровий суялиничник; СЗПЕ – волога ялицева сурамінь; СЗПЯ – вологий ялицевий суялиничник; СЗЯ – вологий чистий суялиничник; СЗЯПБ – волога ялиново-ялицева суббучина; ДЗБПЯ – вологий буково-ялицевий ялиничник.

1.3. Обсяг виборки (число варіантів) становив: $N = 574$ (за y_1 ; y_5 ; y_6 ; y_7 ; x_1 , x_2 ; x_3 ; x_4); $N = 164$ (за y_2); $N = 161$ (за y_3); $N = 101$ (за y_4).

Статистичний аналіз виконаний за [1-12]. Розраховували такі числові та групові статистичні характеристики виборки: середнє арифметичне \bar{x} [од.]; дисперсію S^2 [од.²]; середнє квадратичне відхилення S [од.]; коефіцієнт варіації γ [%]; відношення S^2/\bar{x} [од.]; початкові моменти k-порядку: h_1 [од.], h_2 [од.²], h_3 [од.³], h_4 [од.⁴]; центральні моменти k-порядку: m_2 [од.²], m_3 [од.³], m_4 [од.⁴]; показник асиметрії as та його середнє квадратичне відхилення S_{as} ($3S_{as}$); показник ексцесу ex та його середнє квадратичне відхилення S_{ex} ($5S_{ex}$).

II. Результати та обговорення

2.1. Загальний аналіз впливу екологічних факторів. В Українських Карпатах ареал сосни кедрової європейської *Pinus cembra* пов'язаний з найбільш холодною зоною – Горганами. Таблиця середніх температур в локалітетах *Pinus cembra* складена, виходячи з даних метеостанції м. Яремче, що знаходиться майже в центрі географічного поширення виду в Україні на висоті 531 м над рівнем моря, враховуючи, що температура знижується ~ на 0,6°C при підйомі на 100 м, і що температура південно-західного та північно-східного схилів різниться ~ на 0,31°C на кожні 100 м підняття.

Середні температури повітря в локалітетах *Pinus cembra* [°C]

| Висота над р.м., [м] (схил) | Місяці | | | | | | | | | | | | Середньо річна |
|-----------------------------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| 530 | -4,3 | -3,2 | 0,8 | 6,2 | 11,9 | 14 | 17 | 16,2 | 12,4 | 7,6 | 2,8 | -1,2 | 6,4 |
| 700 (півд.-зах.) | -5,1 | -4,0 | 0 | 5,4 | 11,1 | 13,2 | 16,2 | 15,4 | 11,6 | 6,8 | 2,0 | -2,0 | 5,9 |
| 700 (півн.-сх.) | -6,1 | -5,0 | -1,0 | 4,4 | 10,1 | 12,2 | 15,2 | 14,4 | 10,6 | 5,8 | 1,0 | -3,0 | 4,9 |
| 1700 (півд.-зах.) | -9,4 | -8,3 | -4,3 | 1,1 | 6,8 | 8,9 | 11,9 | 11,1 | 7,3 | 2,5 | -2,3 | -6,3 | 1,5 |
| 1570 (півн.-сх.) | -12,2 | -11,1 | -7,1 | -1,7 | 4 | 6,1 | 9,1 | 8,3 | 4,5 | -0,3 | -5,1 | -9,1 | -1,2 |

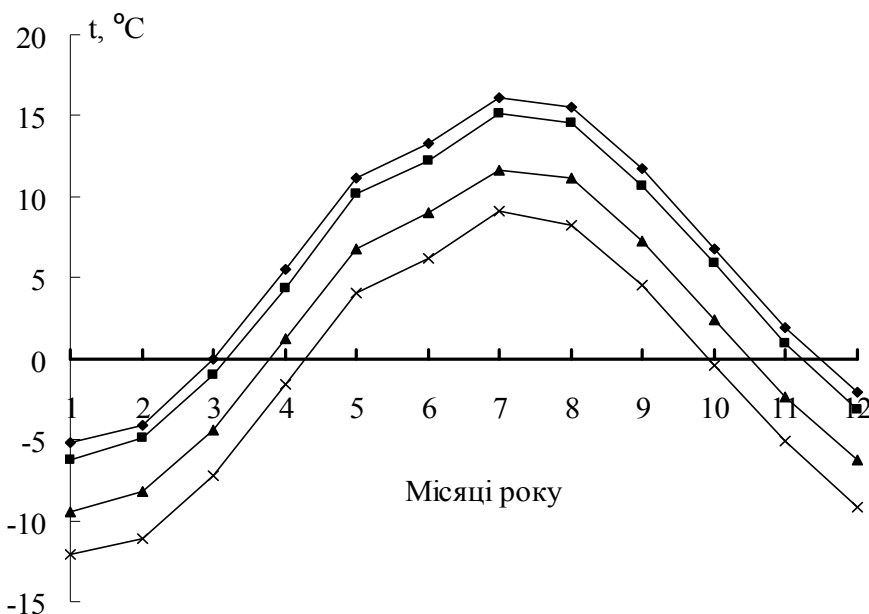


Рис. 1. Середньомісячні температури в локалітетах *Pinus cembra*, мінімум і максимум поширення температур за місяцями року і за висотою над рівнем моря: 1 – 700 м (південний захід); 2 – 700 м (північний схід); 3 – 1700 м (південний захід); 4 – 1570 м (північний схід).

У табл. 1 за вихідними даними метеостанції м. Яремче приведені розрахункові середні температури повітря в локалітетах сосни кедрової європейської на нижній і верхній межі поширення. На рис. 1 показані середньомісячні температури в локалітетах *Pinus cembra*. Мінімуми і максимуми поширення температур за місяцями року та за висотою над рівнем моря.

Як видно з табл. 1 та рис. 1, в Українських Карпатах середньорічна температура в локалітетах сосни кедрової європейської коливається в межах +5,9° до -1,2°C. Середні температури липня коливаються в межах +9,1° – +16,2°C, січня -5,1° до -12,2°C. Для Українських Карпат, як і для Альп, прослідковується висотна межа поширення виду з ізотермою липня менше +10°C [13,14].

Загалом вид достатньо толерантний до температури повітря, передусім нижня межа поширення сосни кедрової європейської не обмежена саме температурним фактором, а є антропогенно обумовленою. Про це свідчать результати інтродукції в Асканії-Новій – вид виявився високожаростійкий.

У Санкт-Петербурзі, Саласпілсі, Талліні вид не тільки вегетує, але й "плодоносить", в Калінінграді молоді пагони до половини обмерзають, але "плодоносять". Окремі особини виду в Українських Карпатах виходять за верхню межу лісу, маючи в даних умовах сланку форму крони.

На рис. 2 та в табл. 2 приведений загальний розподіл деревостанів за участю сосни кедрової європейської за експозицією схилів, з яких видно, що найбільша частка деревостанів розміщена на схилах південно-західної експозиції – 26%. Для з'ясування факторів, що впливають на приуроченість деревостанів за експозицією схилу порівняємо рис. 2 з розподілом площі деревостанів за участю сосни кедрової європейської за експозицією схилів на висоті більше 1500 м (рис. 3).

Таблиця 2

Розподіл деревостанів за експозицією схилів та нижня і верхня межі поширеності за висотою над рівнем моря в залежності від експозиції

| Експозиція схилів | Показна площа | | Висота н. р.м. [м] | |
|-------------------|---------------|-----|--------------------|------|
| | [га] | [%] | min | max |
| зах. | 578,8 | 14 | 1000 | 1700 |
| сх. | 270,2 | 6 | 1050 | 1575 |
| півн. | 191,2 | 5 | 1100 | 1525 |
| півн.-зах. | 402,8 | 10 | 900 | 1570 |
| півн.-сх. | 486,4 | 12 | 900 | 1525 |
| півд. | 535,9 | 13 | 1075 | 1540 |
| півд.-зах. | 1146,0 | 26 | 750 | 1550 |
| півд.-сх. | 583,3 | 14 | 1000 | 1600 |

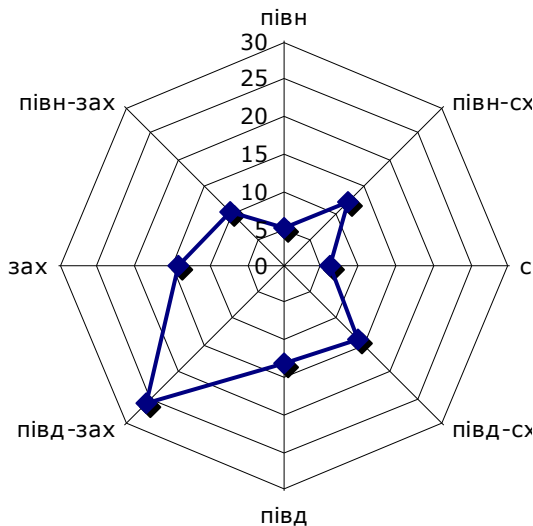


Рис. 2. Розподіл деревостанів [%] за участю Pinus cembra за експозицією схилів.



Рис. 3. Розподіл площі деревостанів [%] за участю Pinus cembra за експозицією схилів, на висоті більше 1500 м над р.м.

Порівнюючи рис. 2 та рис. 3, можна зробити висновок, що на розподіл деревостанів за участю сосни кедрової європейської на гіпсометричних рівнях вище 1500 м впливає:

1. Температурний фактор. Про що свідчить приуроченість переважної більшості деревостанів на висоті більше 1500 м до південного схилу та схилів суміжних експозицій (більш як двократне збільшення випадків на південному схилі).

У гірських умовах через недолік тепла рослина не в стані утилізувати отриманий з ґрунту нітроген [15].

2. Вітер як механічний фактор. Через зростання швидкості вітру при піднятті на вищі гіпсометричні рівні спостерігається майже двократне зменшення участі виду в деревостані на навітряному південно-західному схилі.

3. Комплекс вітер-сніг. Участь виду в деревостані зменшується на навітряних південно-західних схилах. Це відбувається через відсутність снігового покриву на навітряних вершинах та гребнях хребтів і промерзання ґрунту (до 1 метра). У сонячні дні температура на поверхні хвої піднімається до 21°C, при дії сильного вітру підвищується транспірація, що веде до значних втрат води, при неможливості її поповнення через промерзлий ґрунт. Хоча при значному вітрі порівняно з модриною і ялиною Pinus cembra менше губить води при транспірації, а при тривалому вітрі стабілізує її [16].

Отже, верхня межа поширення виду залежить від комплексу факторів: температура повітря, вітер, сніг тощо.

4. Вологість ґрунту як фактор, що зумовлює поширення сосни кедрової європейської є особливо важливим на кам'янистих розсипах та при облігатній мікотрофності виду. Це пояснює приуроченість деревостанів з підняттям на вищі гіпсометричні рівні до схилів південних експозицій через їх більшу зволоженість. Напевне, фактор вологості відіграє важливу роль через поширенням виду на ґрунтах низької трофності (кам'яних розсипах), що ще й за низьких температур робить недоступними більшість поживних речовин, що в свою чергу обумовлює облігатну мікотрофність виду, а життєдіяльність мікоризи залежить від вологості ґрунту. За матеріалами лісовпорядження деревостани з участю сосни кедрової європейської мають коефіцієнт зволоження 3 (вологі умови) у 99% випадків та коефіцієнт 4 (сирі) у 1% випадків.

Температура ґрунту теж виступає як обмежувачий фактор (в Тіролі під кедровим деревостаном на глибині 6 мм температура ґрунту становила 84°C) [16]. Можливо велика кількість опадів нівелує даний фактор.

За експозицією схилів в Європі сосна кедрова європейська поширена переважно на північних схилах і схилах суміжних експозицій, саме через більшу зволоженість ґрунтів на північних схилах [16].

У табл. 2 приведений розподіл деревостанів за експозицією схилів в Українських Карпатах та нижня і верхня межі поширеності за висотою над рівнем моря в залежності від експозиції. Як видно з табл. 2, в Українських Карпатах деревостани за участю сосни кедрової європейської зустрічаються на схилах усіх експозицій, але переважно (26%) розміщені на південно-західних схилах, що пояснюється тим, що на навітрених схилах випадає більше опадів: на висоті 700 м різниця в річній кількості опадів на південно-західних і південно-східних схилах складає 680 мм [17, 18], протягом року панують південно-західні вітри, північно-східні, східні і північні схили піддаються впливу холодних і сухих повітряних мас, про що свідчить невисока частка площі деревостанів на північних та східних схилах.

Нижня межа розповсюдження (700 м) і мала частка деревостанів на висоті 700-1000 м свідчить лише про антропогенну обумовленість даного явища. Приблизно однакова верхня межа поширення сосни кедрової європейської незалежна від експозиції схилу говорить про вирішальну роль не температурного фактору, а комплексу факторів з вирішальним критерієм – вітер. На висоті 1500-2061 м середня швидкість вітру становить 6,2-8,4 м/с, порівняно з висотою 500-850 м – 1,8-3,3 м/с. Кількість днів з вітром більше 15 м/с на високогір'ї досягає 107-158, порівняно з висотою 500 м – 8 днів (матеріали лісовпорядження Карпатського національного природного парку).

За крутизною схилів 67% (2770,4 га) деревостани знаходяться на крутих схилах (стрімкість 25-35 град.). Це обумовлено меншою доступністю для вирубки та більшою поширеністю на даних схилах кам'янистих розсипищ. Схили крутизною до 15 град. займають площу 49 га (1%), від 15 до 25 град. – 685,9 га (16%), від 35 до 60 град. – 689,3 га (16%).

Найбільш холодні райони Карпат відрізняються найбільшою кількістю атмосферних опадів, до них відносяться басейни Свічі, Лімниці, Бистриці Солотвинської та Бистриці Надвірнянської, Прута – ареал сосни кедрової європейської. Біля 80% загальної кількості опадів припадає на літній період, на відміну від Альп, де основна кількість опадів випадає взимку та восени. Річна кількість опадів за [19, 20] складає від 700 до 1200 мм, проте, за даними метеостанції в Яремче, на висоті 530 м річна кількість опадів – 881 мм, тоді як на найнижчій висоті розповсюдження *Pinus cembra* L., враховуючи, що при піднятті на 100 м опади зростають ~ на 100 мм, буде становити 1051 мм. На найвищій межі поширення *Pinus cembra* – висоті 1700 м, враховуючи, що за даними метеостанції Пожижевська (1429 м над р.м.), річна кількість опадів становить 1491 мм, цей показник буде дорівнювати ~ 1762-2051 мм. В Альпах річна кількість опадів в локалітетах *Pinus cembra* коливається в межах 800-2175 мм. Кількість днів від появи до сходу снігового покриву становить 130-150 днів [16]. В Українських Карпатах, згідно матеріалів лісовпорядження, кількість днів з стійким сніговим покривом на висоті 800 м становить 124, на висоті 1700 м – 190. Відносна вологість в локалітетах сосни кедрової європейської (за даними метеостанцій Яремче та Пожижевська) становить 77%. Сосна кедрова європейська є більш чутливою до вологості повітря, порівняно з модриною та ялиною [16].

Переважаюча більшість місцезростань за участю виду приурочена до торф'яно-підзолистих ґрунтів [21, 22], М.А. Голубець [23-25] називає їх гірсько-лісовими підзолистими ґрунтами. Розповсюджені дані ґрунти в районі Скибової зони на пісковиках яменської свити, Чорногірської зони на пісковиках та гравелітах чорногірської та топільчанської свит і моренних відкладах, складених чорногірськими пісковиками, а також на відрогах Мармарошського кристалічного масиву, особливо в районі Чивчин [26].

Кліматичні умови району не сприяють розкладанню органічної речовини, низькі температури і довготривалий сніговий покрив сприяють їх заторфуванню. Проте, частина органічних речовин просочується крізь щілини серед каміння і осідає. Таким чином, гумусовий горизонт наростає зверху за рахунок рослинності, яка відмирає, а знизу за рахунок просочування гумусу.

А.І. Зражевський [21] пропонує називати ці ґрунти підвісними і визначає для них декілька стадій розвитку на кам'янистих розсипищах. Піонерами є накипні лишайники. На контакті лишайника з пісковиком утворюється темнувато-сірий шар піщанистого ґрунту товщиною біля 0,3 см. З розвитком слоевища лишайника починають з'являтися гіпнові мохи і крупні лишайники *Cladonia subsquamosa* Nyb. Потужність ґрунту, що складається з розкладених в більшій чи меншій мірі рослинних залишків, збільшується. Формується органогенний ґрунт, що висить на камінні. На більш пізніших стадіях формується торф'янисто-підзолистий ґрунт, що має легкий піщаний склад. Типовий розріз торф'яно-підзолистого ґрунту під ялиново-кедровим деревостаном (Надвірнянський ДЛГ, Максимець-Глодищанське лісництво, квартал 114, 1380 м над рівнем моря, західний схил крутизною 30 град., склад деревостану – бяле4кдр, вік – 190р.) [21]:

- Н₀ – 2-0 см. Підстилка з відмерлих мохів, чорниці, хвої і гілок;
- Н_т – 0-7 см. Торф'янистий слабзорозкладений шар, переплетений корінням деревних порід;
- Е_р – 7-45 см. Шар уламків гірської породи (пісковика), на горизонтальних гранях якого відклався майже білий, місцями буруватий пісок;
- НР – 45-67 см. Темно-бурий, мокрий, дрібнозернистий, дуже кам'янистий (до 80% каміння) шар, перехід чіткий;
- ІР – 67-90 см. Світло-бурий, мокрий, безструктурний, піщаний сильнокам'янистий шар, який переходить в суцільний шар пісковика.

Ґрунт характеризується дуже кислою реакцією (табл. 3), яка послаблюється в горизонті 45-67 см. Наведені дані свідчать про первинність ґрунтоутворення процесу. Процес проходить в умовах дуже кислого середовища, що визначається продуктами життєдіяльності мохів, напівчагарників, кореневих систем і опадів деревних порід. Характерні для ґрунтів висока гідролітична кислотність і низький вміст поглинутих основ, а отже і низька насиченість основами. Відношення карбону до нітрогену в ґрунті широке, що свідчить про збіднення органічної речовини на нітроген. Значно вужче відношення карбону до нітрогену в нижніх горизонтах свідчить про різний характер в них мікробіологічних процесів. У процесі вивітрювання на перших стадіях, очевидно виноситься силіцій (IV) оксид, пізніше в ґрунтових горизонтах нагромаджується силіцій (IV), що характерно для підзолистого процесу, відносно мало накопичується ферум (III) оксид. Це можна пояснити специфічним складом гумусу, високим вмістом у ньому воску і смол, відносним зменшенням фульвокислот. У той же час помітне переміщення алюмінію оксиду на нижні горизонти. Для кальцію характерне накопичення його у верхньому шарі. У цілому розвиток ґрунтоутворення процесів слабкий. Проте сильна заторфованість, перерозподіл за профілем силіцій (IV) оксиду та алюмінію оксиду, дуже кислий характер водних витяжок, ненасиченість основами, перевага в обмінній кислотності йона гідрогену дає підстави віднести ці ґрунти до торфо-підзолистих. Вміст обмінного кальцію в ґрунтах у цілому незначний і зменшується донизу за профілем, що свідчить про бідність ґрунтоутворення порід цим елементом, проте, спостерігається перевага в обмінних основах йону Mg²⁺.

Г.А. Андрущенко встановив [21] таку закономірність: в міру підняття над рівнем моря вміст обмінного кальцію в ґрунтах зменшується, аж до повного його зникнення. Закономірностей щодо вмісту обмінного магнію не виявлено. Вміст обмінного гідрогену порівняно високий, найвищий його вміст спостерігається в елювіальному горизонті, значно знижуючись в горизонті материнської породи [21]. Запас гумусу порівняно високий. На вміст гумусу впливає висота над рівнем моря: існує вертикальна поясність ґрунтів, що полягає у зміні хімізму із збільшенням абсолютної висоти [21]. Із збільшенням абсолютної висоти вміст гумусу зростає, особливо у верхніх горизонтах, від 9 до 15%. Це свідчить про різний характер гумусоутворення на певних висотах, що пояснюється особливостями клімату і мікрокліматичних умов. За даними [21], помітна також різниця у співвідношенні карбону та нітрогену. На вищих місцезоположеннях вміст нітрогену в органічних речовинах менший, що свідчить про затримку у розкладанні органічних речовин. На швидкість розкладання впливає також стрімкість та експозиція схилу. Вміст гумусу в сирих типах лісу, сформованих на некрутих північних схилах, різко збільшується, порівняно з ґрунтами нормального зволоження, що пояснюється повільною мінералізацією рослинних решток і гумусових речовин [21].

Значно рідше сосна кедрова європейська зростає на гірсько-лісових бурих ґрунтах. Серед гірсько-лісових ґрунтів переважають суглинні різновиди. Над мінеральним горизонтом ґрунту залягає лісова підстилка – горизонт Н₀ – невеликої потужності (2-4 см до 6-8 см на висотах більше 1000-1100 м). Під підстилкою залягає гумусовий горизонт Н – потужністю до 30-40 см. У верхній частині до глибини 12-15 см, він має темно-бурий або сірувато-бурий колір, нем'яку горіхувату структуру, суглинистий механічний склад, містить багато хрища та ріні. Глибше 12-15 см у кольорі горизонту щезають темні тони, він набуває бурого кольору, дещо укрупнюється структура і зменшується рінність. Він дуже поступово змінюється перехідним горизонтом НР,

Таблиця 3
Фізико-хімічні властивості ґрунтів під ялиново-кедровими деревостанами (Надвірнянський ДЛГ) [21]

| Глибина, см | рН водний | Мг-екв на 100 г ґрунту | | Мг-екв на 100 г ґрунту | | Гумус, % | С, % | N, % | C:N |
|-------------|-----------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------------|----------|-------|-------|------|
| | | Гідролітична кислотність | Сума увібраних основ | H ¹⁺ | Al ³⁺ | | | | |
| 20-30 | 3,85 | 84,35 | 3,30 | 3,12 | 0,52 | 48,15 | 27,93 | 1,32 | 21,0 |
| 48-67 | 3,68 | 36,45 | 1,30 | 2,08 | 0,44 | 16,15 | 9,31 | 0,43 | 21,7 |
| 90-100 | 4,12 | 17,84 | 0,54 | 1,12 | 0,07 | 3,83 | 2,22 | 0,141 | 15,7 |

Фізико-хімічні властивості бурозему кислого важкосуглинистого слабокам'янистого на еловій-деловій карпатського флішу з переважанням пісковиків [18]

| Глибина відбору зразків | рН сольове | рН водне | Гумус, % | Вибрані йони, мг-екв на 100 г ґрунту | | Гідролітична кислотність, мг-екв/ 100 г ґрунту | Обмінні, мг-екв/ 100 г ґрунту | | Ступінь насиченості основами, % |
|-------------------------|------------|----------|----------|--------------------------------------|------------------|--|-------------------------------|------|---------------------------------|
| | | | | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | | H | Al | |
| 3-13 | 3,5 | 4,0 | 4,9 | 4,8 | 3,6 | 18,0 | 0,4 | 50,4 | 31,8 |
| 15-25 | 3,8 | 5,2 | 3,6 | 4,0 | 2,4 | 13,4 | 0,2 | 36,9 | 32,8 |
| 33-43 | 3,0 | 3,5 | 3,0 | | | | | | |

що має буру, поступово висвітлюючий з глибиною колір. У більшості випадків горизонт НР сильно ринівий і містить крупні уламки щільних порід. Як відмічено в [27], важливою особливістю бурих лісових ґрунтів є підвищена ринність верхньої частини горизонту Н. Хрящ і ринь верхнього горизонту є джерелом біологічно важливих елементів. Найбільш характерним процесом для буроземів є вилуговування. Він починається на самих ранніх стадіях вивітрювання гірських порід [27]. Тому, ґрунти, що сформувались навіть на багатих основами гірських породах, є бідними на катіони кальцію, магнію, натрію та інших лужних і лужноземельних елементів. У пісковиках і глинистих сланцях цементом є карбонати, що пов'язують зерна мінералів. По мірі наближення до поверхні вміст CaCO₃, як в пісковиках, так і в сланцях, зменшується, і до моменту перетворення їх в ґрунтовірну породу (горизонт Р) карбонати повністю виносяться, внаслідок цього порода збіднюється кальцієм і магнієм. Більша частина феруму у невивітреній породі знаходилась в формі двовалентного йону, що обумовлює сіро-стальний колір пісковиків і сланців. По мірі вивітрювання ферум окиснюється, переходить в тривалентну форму і надає корі вивітрювання теплі тони. Разом з тим, при вивітрюванні спостерігається тенденція до накопичення феруму. У ґрунтовірній породі (горизонт Р) ферум (II) оксид повністю відсутній, а на частку феруму (III) оксиду припадає 7,4% маси. Починаючи з глибини 75-85 см, на породу крім вивітрювання діє ґрунтовірний процес (вилужнювання). Бурі лісові ґрунти мають високу пористість і високу водопроникність, особливо верхнього горизонту, що пов'язано з його ринністю, гумусованістю та комкуватою структурою. Для бурих лісових ґрунтів характерний високий вміст гумусу. В ялинових деревостанах найбільш бідних основами і найбільш кислим є верхній горизонт, що залягає під лісовою підстилкою, що обумовлюється поверхневою кореневою системою ялини, що поглинає основну масу елементів живлення з верхнього горизонту. Бурі лісові ґрунти мають високу обмінну і гідролітичну кислотність (25-30 мг-екв/100 г ґрунту), сума поглинутих основ невелика (10-12 мг-екв/100 г ґрунту), ступінь насичення основами менше 50%. До низу за профілем кислотність зменшується, а ступінь насичення основами зростає. Кислотність ґрунтів обумовлена рухомими йонами алюмінію. Такі ґрунти не містять обмінних йонів водню. Високий вміст перегною, стадійна молодість і рухливість гумусу обумовлює утворення рухливих форм нітрогену (7-8 мг/100 г ґрунту). Мінеральні форми нітрогену представлені амонієковими формами. Процеси нітрогенізації у них пригнічені. ґрунти багаті валовим фосфором (0,20-0,25%). Вміст калію достатньо великий [27]. Для підтвердження цих висновків приводимо дані табл. 4 [18].

Дослідження розподілу площі за трофотопами свідчить про приуроченість деревостанів до оліготрофних вологих умов (47% площі – вологі кедрово-ялинові субори) (табл. 5).

У табл. 5 приведено аналіз розподілу деревостанів за типом умов місцезростання, виходячи з матеріалів лісовпорядження. Найбільша частка деревостанів за участю сосни кедрової європейської належить суборам – 76%, з них 46% – це вологий кедрово-ялиновий субір (ВЗКЯ) і 27% – вологий чистоялиновий субір (ВЗЯ). Сугрудки становлять 21%, з них найбільша частка припадає на вологий чистий суялиничник (СЗЯ) – 12%.

2.2. Кореляційний та регресійний аналізи.

1. Розглянемо математичну модель експерименту у вигляді «чорної скриньки» [10, 28-30] експериментального об'єкта дослідження (рис. 4). На рис. 4: $X [x_1, x_2, x_3, x_4]$ – матриця контрольованих та керованих факторів (вхідні змінні), зміна яких відбивається на функції відгуку $Y [y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7]$; $K [k_1, k_2, \dots, k_m]$ – матриця некерованих, але контрольованих змінних (наприклад, атмосферний тиск, вологість, температура та швидкість вітру повітря тощо); $Z [z_1, z_2, \dots, z_n]$ – матриця неконтрольованих та некерованих змінних (частіше K і Z впливають на Y випадковим чином).

2. Знайдемо лінійні та нелінійні зв'язки між $Y \sim X$ та всередині цих матриць методами кореляційного та регресійного аналізів [1, 5, 12]. Результати розрахунків вибіркового чисельного та групових характеристик функції відгуку y_i та вхідних параметрів (факторів) x_k зведені в табл. 6.

Розподіл площі деревостанів з участю сосни кедрової європейської за типом умов місцезростання

| Тип умов місцезростання | Показна площа, га | % | Сума, га (%) | |
|-------------------------|-------------------|----|--------------|-----------|
| АЗКЯ | 91,8 | 2 | 109,9(3) | |
| АЗСГ | 1,5 | 0 | | |
| АЗЯС | 16,6 | 0 | | |
| ВЗКЯ | 1928,4 | 46 | 3165,3(76) | |
| ВЗМКЯ | 21 | 0 | | |
| ВЗПЯ | 10,0 | 0 | | |
| ВЗЯ | 1129,4 | 27 | | |
| ВЗЯС | 24,0 | 1 | | |
| В4КЯ | 21,5 | 0 | | |
| В4Я | 28,9 | 1 | | |
| В4ЯС | 2,1 | 0 | | |
| СЗБПЯ | 74,8 | 2 | | 919,2(21) |
| СЗБЯ | 49,8 | 1 | | |
| СЗКЯ | 196,5 | 5 | | |
| СЗСГ | 14,8 | 0 | | |
| СЗПЕ | 8,1 | 0 | | |
| СЗПЯ | 66,4 | 2 | | |
| СЗЯ | 489,3 | 12 | | |
| СЗЯПБ | 19,5 | 1 | | |
| ДЗБПЯ | 0,2 | 0 | 0,2(0) | |

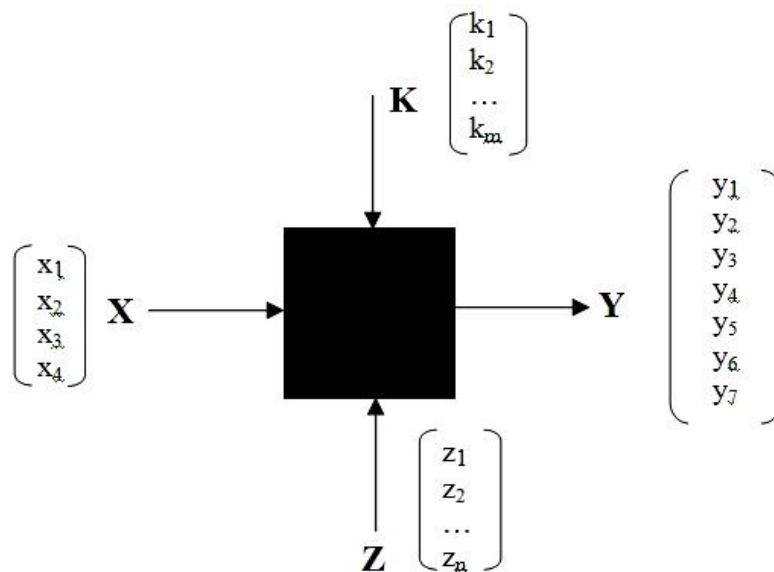


Рис. 4. Математична модель експерименту у вигляді «чорної скриньки»: **X** — матриця вхідних змінних; **Y** — матриця функцій відгуку; **K**, **Z** — матриці збудуючих [контрольованих, некерованих (**K**) та неконтрольованих, некерованих (**Z**)] змінних.

Таблиця 6

Результати розрахунків вибірових числових та групових характеристик функцій відгуку y_i та вхідних параметрів (факторів) x_k

| Функція | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 | y_5 | y_6 | y_7 | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------|-------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|----------------------|--------|
| \bar{x} | 9,139 | 19,13 | 29,582 | 3,983 | 7,069 | 0,579 | 121,06 | 4,963 | 27,141 | 1304,5 | 2,136 |
| $S^2[\text{од.}^2]$ | 147,76 | 18,84 | 58,37 | 0,766 | 87,79 | 0,011 | 1490,2 | 4,22 | 43,85 | 17432,7 | 0,208 |
| $S[\text{од.}]$ | 12,156 | 4,34 | 7,64 | 0,875 | 9,369 | 0,105 | 38,603 | 2,054 | 6,622 | 132,03 | 0,456 |
| $\gamma, \%$ | 133,0 | 22,7 | 25,8 | 22,0 | 132,5 | 18,2 | 31,9 | 41,4 | 24,4 | 10,1 | 21,4 |
| S^2/\bar{x} [од.] | 16,17 | 0,99 | 1,97 | 0,19 | 12,42 | 0,02 | 12,31 | 0,85 | 1,62 | 13,36 | 0,098 |
| $h_1[\text{од.}]$ | 9,139 | 19,130 | 29,582 | 3,983 | 7,069 | 0,579 | 121,1 | 4,963 | 27,141 | 1304,5 | 2,136 |
| $h_2[\text{од.}^2]$ | 231,0 | 384,7 | 933,1 | 16,62 | 137,6 | 0,346 | $1,614 \cdot 10^4$ | 28,85 | 780,4 | $17,19 \cdot 10^5$ | 4,770 |
| $h_3[\text{од.}^3]$ | $9,38 \cdot 10^3$ | $8,04 \cdot 10^3$ | $3,08 \cdot 10^4$ | 72,11 | $5,72 \cdot 10^3$ | 0,212 | $22,74 \cdot 10^5$ | 181,77 | $23,56 \cdot 10^3$ | $22,87 \cdot 10^8$ | 11,14 |
| $h_4[\text{од.}^4]$ | $47,7 \cdot 10^4$ | $17,3 \cdot 10^4$ | $10,6 \cdot 10^5$ | 322,6 | $37,3 \cdot 10^4$ | 0,133 | $33,3 \cdot 10^6$ | 1203 | $74,53 \cdot 10^4$ | $3,07 \cdot 10^{12}$ | 27,202 |
| $m_2[\text{од.}^2]$ | 147,5 | 18,73 | 58,01 | 0,758 | 87,63 | 0,011 | $1,488 \cdot 10^3$ | 4,213 | 43,77 | $17,4 \cdot 10^3$ | 0,208 |
| $m_3[\text{од.}^3]$ | 4571 | -34,91 | -216,2 | -0,150 | $3,51 \cdot 10^3$ | -0,001 | $-3,99 \cdot 10^4$ | -3,243 | 3,893 | $-8,9 \cdot 10^5$ | 0,059 |
| $m_4[\text{од.}^4]$ | $22,9 \cdot 10^4$ | 1027 | $10,3 \cdot 10^3$ | 1,111 | $24,5 \cdot 10^4$ | 0,001 | $62,98 \cdot 10^5$ | 37,80 | $8,73 \cdot 10^3$ | $13,35 \cdot 10^8$ | 0,192 |
| as | 2,552 | -0,431 | -0,489 | -0,227 | 4,280 | -0,513 | -0,695 | -0,375 | 0,013 | -0,388 | 0,622 |
| S_{as} | 0,102 | 0,188 | 0,190 | 0,238 | 0,102 | 0,102 | 0,102 | 0,102 | 0,102 | 0,102 | 0,102 |
| $3S_{as}$ | 0,305 | 0,565 | 0,570 | 0,714 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 |
| ex | 7,529 | -0,071 | 0,061 | -1,068 | 28,84 | 0,183 | -0,154 | -0,870 | 1,554 | 1,407 | 1,435 |
| S_{ex} | 0,203 | 0,370 | 0,373 | 0,462 | 0,203 | 0,203 | 0,203 | 0,203 | 0,203 | 0,203 | 0,203 |
| $5S_{ex}$ | 1,013 | 1,850 | 1,866 | 2,309 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 |
| ξ_1 | 0,04 | 0,44 | 0,39 | 1,05 | 0,02 | 0,20 | 0,15 | 0,27 | 7,57 | 0,26 | 0,16 |
| ξ_2 | 0,12 | 1,31 | 1,17 | 3,14 | 0,07 | 0,60 | 0,44 | 0,81 | 22,7 | 0,79 | 0,49 |
| ξ_3 | 0,03 | 5,23 | 6,13 | 0,43 | 0,01 | 1,11 | 1,32 | 0,23 | 0,13 | 0,14 | 0,14 |
| ξ_4 | 0,13 | 26,1 | 30,7 | 2,16 | 0,04 | 5,53 | 6,58 | 1,16 | 0,65 | 0,72 | 0,71 |

3. Оцінку підпорядкування вибіркового розподілу y_1, \dots, y_7 та x_1, \dots, x_4 нормальному розподілу Гаусса зроблена за ступенями відмінності показників асиметрії та ексцесу від відповідних їм середніх квадратичних відхилень [6]:

$$\xi_1 = \frac{S_{as}}{|as|}; \xi_2 = \frac{3S_{as}}{|as|}; \xi_3 = \frac{S_{ex}}{|ex|}; \xi_4 = \frac{5S_{ex}}{|ex|} \quad (1)$$

за умовою, що при $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4 \geq 1$, вибіркові результати не протирічать теоретичному нормальному закону Гаусса.

Як видно з табл. 6, можна прийняти, що вибіркові характеристики y_2 (висота *Pinus sembra* L.), y_3 (діаметр *Pinus sembra* L.), y_4 (бонітет) підпорядковані нормальному закону Гаусса (н.з.р.); вибіркові характеристики y_1 (склад насаджень); y_5 (показна площа), x_1 (експозиція схилу), x_2 (стрімкість схилу), x_3 (висота над рівнем моря), x_4 (тип лісу) – не підпорядковані нормальному закону розподілу, а y_6 (щільність насаджень), y_7 (вік особин *Pinus sembra* L.) – близькі до н.з.р. (необхідна перевірка за більш точними критеріями χ^2 або ω^2). Це накладає певні обмеження на висновки при оцінках результатів кореляційного аналізу.

4. Визначення «лідерів» і «аутсайдерів» за коефіцієнтом кореляції (лінійний вплив). Вибірковий коефіцієнт кореляції r розраховували за [1, 5], який давав оцінку генеральному коефіцієнту кореляції ρ . У табл. 7 приведені результати розрахунків коефіцієнтів кореляції зв'язків $y_i \sim y_j$, $y_i \sim x_k$ та $x_k \sim x_m$.

При визначенні найбільш показної функції відгуку y_i та найбільш показного вхідного фактора x_k за коефіцієнтами кореляції використали теорію графів [31, 32], розглядаючи матриці суміжності графів (табл. 8, 9), у яких двом суміжним вершинам (рис. 5) приписані значення, що дорівнюють величинам відповідних коефіцієнтів кореляції (табл. 7).

За процедурою [10] при виборі найбільш показних y_i та x_k із груп y_1, \dots, y_7 та x_1, \dots, x_4 давали оцінку сумарної сили лінійного впливу $\sum_{i,j=1}^{n=7} |r_{ij}|$ та $\sum_{k,m=1}^{n=4} |r_{km}|$ кожного y_i та x_k з відповідної групи y (або x) на решту y_j та

x_m за теорією графів [31, 32] (табл. 8, 9). У табл. 8 і 9: $|r_{ij}| = |r_{ji}|$, $|r_{km}| = |r_{mk}|$. Ці результати дозволили виявити мажорантні ряди за зростаючою сумарною силою зв'язку (сума елементів матриць табл. 8 і 9) та виявити «лідерів» і «аутсайдерів» за коефіцієнтами кореляції (табл. 7):

- за функцією відгуку

$$y_5 \leq y_1 < y_7 \leq y_6 < y_3 \leq y_4 < y_2; \quad (2)$$

$$\left(\begin{matrix} \text{показна} \\ \text{площа} \\ \text{насаджень} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{склад} \\ \text{насаджень} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{вік} \\ \text{особин} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{повнота} \\ \text{щільність} \\ \text{насаджень} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{діаметр} \\ \text{особин} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{бонітет} \\ \text{продуктивність} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{особин} \end{matrix} \right) \quad (3)$$

- за вхідними факторами

$$x_1 < x_4 < x_2 < x_3;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{(крутизна)} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над рівнем} \\ \text{моря} \end{matrix} \right). \quad (4)$$

Таким чином, за коефіцієнтами кореляції (лінійний вплив) найбільш показною функцією відгуку y_i є висота кедр (у₂), менш показними – бонітет (у₄) і діаметр кедр (у₃), далі – повнота насаджень (у₆) та вік кедр (у₇) і «аутсайдерами» мажорантного ряду є склад (у₁) і показна площа (у₅) насаджень. А найбільш показним «лідером» вхідних факторів x_k є висота над рівнем моря (х₃), далі – стрімкість схилу (х₂), тип лісу (х₄), «аутсайдером» мажорантного ряду є експозиція схилу (х₁).

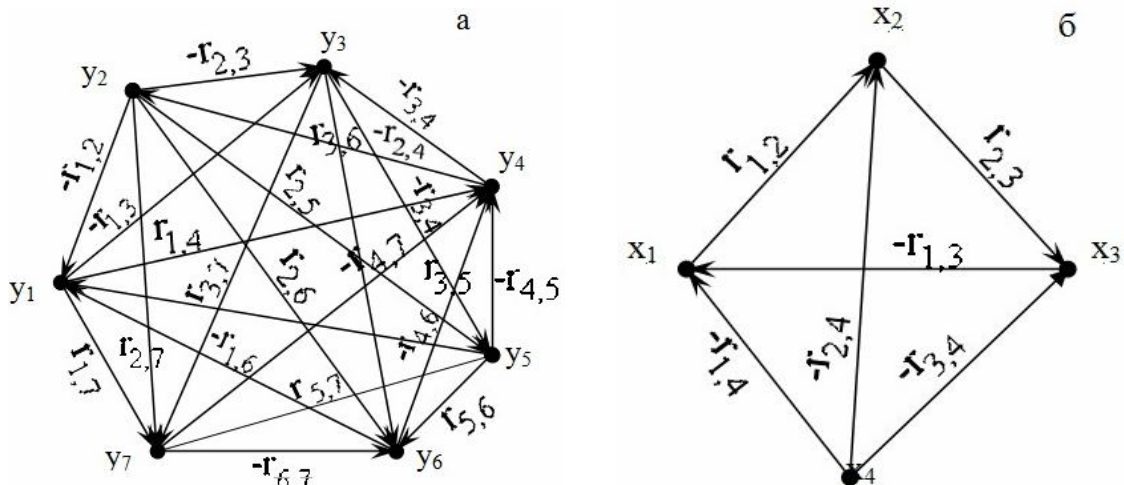


Рис. 5. Граф кореляційних зв'язків між $y_i \sim y_j$ (а) та $x_k \sim x_m$ (б).

Таблиця 7

Коефіцієнти кореляцій зв'язків $y_i \sim y_j$ та $y_i \sim x_k$ і перевірка нульової гіпотези $H_0: \rho = 0$ за критичним значенням $r_{кр}$ [11], функцією перетворення Фішера Z_T [1,5] та критерієм Стьюдента t_T [1, 5] для рівнів значущості $\alpha = 0,01$ та $\alpha = 0,05$ для особин *Pinus sembra* L

| Кореляційний зв'язок | | N | r | $\xi\alpha (\xi_\alpha)$ за $r_{кр}$ для α : | | Z | $\xi\alpha (\xi_\alpha)$ за Z_α | | t_p | $\xi\alpha (\xi_\alpha)$ за t_α | | $H_0: \rho = 0$ | | Рівняння лінії регресії |
|----------------------|--|-----|----------------|--|-------------|---------------|---|-------------|---------------|--|-------------|-----------------|------|----------------------------|
| | | | | 0,05 | 0,01 | | 0,05 | 0,01 | | 0,05 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| $x_1 \sim x_2$ | експозиція схилу ~ ~ крутизна схилу | 574 | 0,0756 | (2,58) | (3,31) | 0,0757 | (1,08) | (1,43) | 1,8185 | (1,09) | (1,44) | + | + | - |
| $x_1 \sim x_3$ | експозиція схилу ~ ~ висота над рівнем моря | 574 | -0,0270 | (7,22) | (9,26) | 0,0270 | (3,04) | (4,0) | 0,6462 | (3,06) | (4,05) | + | + | - |
| $x_1 \sim x_4$ | експозиція схилу ~ ~ тип лісу | 574 | -0,0207 | (9,42) | (12,08) | 0,0207 | (3,96) | (5,22) | 0,4953 | (4,0) | (5,28) | + | + | - |
| $x_2 \sim x_3$ | крутизна схилу ~ ~ висота над рівнем моря | 574 | 0,1473 | (1,32) | (1,70) | 0,1484 | 1,81 | 1,37 | 3,6010 | 1,82 | 1,38 | - | - | $x_2=17,5011+0,0074x_3;$ |
| $x_2 \sim x_4$ | крутизна схилу ~ ~ тип ліс | 574 | -0,0387 | (5,04) | (6,46) | 0,0387 | (2,12) | (2,79) | 0,9270 | (2,14) | (2,82) | + | + | - |
| $x_3 \sim x_4$ | висота над рівнем моря ~ ~ тип лісу | 574 | -0,1428 | (1,37) | (1,75) | 0,1438 | 1,75 | 1,33 | 3,4864 | 1,76 | 1,33 | - | - | $x_3=1392,76 - 41,3049x_4$ |
| $y_1 \sim x_1$ | склад насаджень ~ ~ експозиція схилу | 574 | 0,02851 | (6,84) | (8,77) | 0,0285 | (2,88) | (3,79) | 0,6822 | (2,90) | (3,84) | + | + | - |
| $y_1 \sim x_2$ | склад насаджень ~ ~ крутизна схилу | 574 | -0,0274 | (7,12) | (9,12) | 0,0274 | (2,99) | (3,94) | 0,6558 | (3,02) | (3,99) | + | + | - |
| $y_1 \sim x_3$ | склад насаджень ~ ~ висота над рівнем моря | 574 | 0,1146 | (1,70) | (2,18) | 0,1151 | 1,40 | 1,07 | 2,7773 | 1,40 | 1,06 | - | - | $y_1= -4,6217+0,0106x_3$ |
| $y_1 \sim x_4$ | склад насаджень ~ ~ тип лісу | 574 | -0,2129 | 1,09 | (1,17) | 0,2162 | 2,64 | 2,00 | 5,3336 | 2,69 | 2,04 | - | - | $y_1= 21,2475-5,6689x_4$ |
| $y_2 \sim x_1$ | висота особин ~ ~ експозиція схилу | 164 | -0,0072 | (27,1) | (34,7) | 0,0072 | (21,5) | (28,2) | 0,0917 | (21,6) | (28,5) | + | + | - |
| $y_2 \sim x_2$ | висота особин ~ ~ крутизна схилу | 164 | -0,1594 | (1,22) | (1,57) | 0,1608 | 1,04 | (1,26) | 2,0817 | 1,05 | (1,26) | - | + | $y_2= 21,9659-0,1045x_2$ |
| $y_2 \sim x_3$ | висота особин ~ висота над рівнем моря | 164 | -0,1162 | (1,68) | (2,15) | 0,1167 | (1,32) | (1,74) | 1,4992 | (1,32) | (1,75) | + | + | - |
| $y_2 \sim x_4$ | висота особин ~ ~ тип лісу | 164 | 0,3509 | 1,80 | 1,40 | 0,3665 | 2,37 | 1,80 | 5,0934 | 2,57 | 1,95 | - | - | $y_2= 12,0026+3,3370x_4$ |

| Кореляційний зв'язок | | N | r | $\xi\alpha (\xi_\alpha)$ за $r_{кр.}$ для α : | | Z | $\xi\alpha (\xi_\alpha)$ за Z_α | | t _p | $\xi\alpha (\xi_\alpha)$ за t_α | | H ₀ : $\rho = 0$ | | Рівняння лінії регресії |
|----------------------|---|-----|----------------|---|-------------|---------------|---|-------------|----------------|--|-------------|-----------------------------|------|-----------------------------|
| | | | | | | | 0,05 | 0,01 | | 0,05 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | |
| | | | | 0,05 | 0,01 | | | | | | | | | |
| $y_3 \sim x_1$ | діаметр особин ~ ~ експозиція схилу | 161 | 0,0416 | (4,69) | (6,01) | 0,0416 | (3,75) | (4,94) | 0,5255 | (3,77) | (4,98) | + | + | - |
| $y_3 \sim x_2$ | діаметр особин ~ ~ крутизна схилу | 161 | -0,1421 | (1,37) | (1,76) | 0,1431 | (1,09) | (1,44) | 1,8287 | (1,08) | (1,43) | + | + | - |
| $y_3 \sim x_3$ | діаметр особин ~ ~ висота над рівнем моря | 161 | -0,2509 | 1,29 | 1,00 | 0,2564 | 1,65 | 1,25 | 3,3763 | 1,71 | 1,29 | - | - | $y_3 = 48,5213 - 0,0145x_3$ |
| $y_3 \sim x_4$ | діаметр особин ~ ~ тип лісу | 161 | -0,0465 | (4,19) | (5,38) | 0,0466 | (3,35) | (4,41) | 0,5880 | (3,37) | (4,45) | + | + | - |
| $y_4 \sim x_1$ | бонітет ~ експозиція схилу | 101 | 0,1004 | (1,94) | (2,49) | 0,1007 | (1,97) | (2,59) | 1,0091 | (1,96) | (2,59) | + | + | - |
| $y_4 \sim x_2$ | бонітет ~ крутизна схилу | 101 | 0,1337 | (1,46) | (1,87) | 0,1345 | (1,47) | (1,94) | 1,3545 | (1,46) | (1,93) | + | + | - |
| $y_4 \sim x_3$ | бонітет ~ висота над рівнем моря | 101 | -0,0240 | (8,13) | (10,4) | 0,0241 | (8,22) | (10,8) | 0,2389 | (8,29) | (10,95) | + | + | - |
| $y_4 \sim x_4$ | бонітет ~ тип лісу | 101 | -0,2856 | 1,47 | 1,14 | 0,2937 | 1,48 | 1,13 | 3,0941 | 1,56 | 1,18 | - | - | $y_4 = 5,1526 - 0,5475x_4$ |
| $y_5 \sim x_1$ | показна площа насаджень ~ ~ експозиція схилу | 574 | 0,0272 | (7,17) | (9,19) | 0,0272 | (3,01) | (3,97) | 0,6505 | (3,04) | (4,02) | + | + | - |
| $y_5 \sim x_2$ | показна площа насаджень ~ ~ крутизна схилу | 574 | 0,0760 | (2,57) | (3,29) | 0,0761 | (1,08) | (1,42) | 1,8272 | (1,08) | (1,43) | + | + | - |
| $y_5 \sim x_3$ | показна площа насаджень ~ ~ висота над рівнем моря | 574 | 0,0345 | (5,65) | (7,25) | 0,0345 | (2,38) | (3,13) | 0,8259 | (2,40) | (3,17) | + | + | - |
| $y_5 \sim x_4$ | показна площа насаджень ~ ~ тип лісу | 574 | 0,0663 | (2,94) | (3,77) | 0,0664 | (1,24) | (1,63) | 1,5917 | (1,24) | (1,64) | + | + | - |
| $y_6 \sim x_1$ | повнота насаджень ~ ~ експозиція схилу | 574 | 0,0627 | (3,11) | (3,99) | 0,0627 | (1,31) | (1,72) | 1,5045 | (1,32) | (1,74) | + | + | - |
| $y_6 \sim x_2$ | повнота насаджень ~ ~ крутизна схилу | 574 | 0,0455 | (4,29) | (5,50) | 0,0455 | (1,80) | (2,37) | 1,0902 | (1,82) | (2,40) | + | + | - |

| Кореляційний зв'язок | | N | r | $\xi_{\alpha} (\xi_{\alpha})$ за $\Gamma_{кр.}$ для α : | | Z | $\xi_{\alpha} (\xi_{\alpha})$ за Z_{α} | | t _p | $\xi_{\alpha} (\xi_{\alpha})$ за t _α | | H ₀ : ρ = 0 | | Рівняння лінії регресії |
|---------------------------------|---|-----|----------------|---|-------------|---------------|--|-------------|----------------|---|-------------|------------------------|------|--|
| | | | | 0,05 | 0,01 | | 0,05 | 0,01 | | 0,05 | 0,01 | | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,05 | 0,01 | |
| y ₆ ~ x ₃ | повнота насаджень ~ ~ висота над рівнем моря | 574 | -0,2190 | 1,12 | (1,14) | 0,2226 | 2,71 | 2,06 | 5,5015 | 2,78 | 2,10 | - | - | y ₆ = 0,8059-0,0002x ₃ |
| y ₆ ~ x ₄ | повнота насаджень ~ ~ тип лісу | 574 | 0,1227 | (1,59) | (2,04) | 0,1233 | 1,50 | 1,14 | 2,9794 | 1,50 | 1,14 | - | - | y ₆ = 0,5183+0,0282x ₄ |
| y ₇ ~ x ₁ | вік особин ~ ~ експозиція схилу | 574 | 0,0526 | (3,71) | (4,75) | 0,0527 | (1,56) | (2,05) | 1,2626 | (1,57) | (2,07) | + | + | - |
| y ₇ ~ x ₂ | вік особин ~ ~ крутизна схилу | 574 | 0,0706 | (2,76) | (3,54) | 0,0707 | (1,16) | (1,53) | 1,6971 | (1,17) | (1,54) | + | + | - |
| y ₇ ~ x ₃ | вік особин ~ висота над рівнем моря | 574 | 0,1958 | 1,004 | (1,28) | 0,1983 | 2,42 | 1,84 | 4,8695 | 2,46 | 1,86 | - | - | y ₇ = 46,3847+0,0572x ₃ |
| y ₇ ~ x ₄ | вік особин ~ тип лісу | 574 | -0,0649 | (3,00) | (3,85) | 0,0650 | (1,26) | (1,66) | 1,5589 | (1,27) | (1,68) | + | + | - |
| y ₁ ~ y ₂ | склад насаджень ~ ~ висота особин | 164 | -0,2401 | 1,23 | (1,04) | 0,2449 | 1,59 | 1,21 | 3,2429 | 1,64 | 1,24 | - | - | y ₁ = 22,0036-0,6725y ₂ |
| y ₁ ~ y ₃ | склад насаджень ~ ~ діаметр особин | 161 | 0,0578 | (3,37) | (4,33) | 0,0578 | (2,70) | (3,55) | 0,7309 | (2,71) | (3,58) | + | + | - |
| y ₁ ~ y ₄ | склад насаджень ~ ~ бонітет | 101 | 0,3203 | 1,64 | 1,28 | 0,3320 | 1,68 | 1,27 | 3,5513 | 1,79 | 1,36 | - | - | y ₁ = 8,5786+4,4482y ₄ |
| y ₁ ~ y ₅ | склад насаджень ~ ~ показна площа насаджень | 574 | -0,0518 | (3,76) | (4,83) | 0,0519 | (1,58) | (2,08) | 1,2433 | (1,59) | (2,10) | + | + | - |
| y ₁ ~ y ₆ | склад насаджень ~ ~ повнота насаджень | 574 | -0,1735 | (1,12) | (1,44) | 0,1753 | 2,14 | 1,62 | 4,2783 | 2,16 | 1,64 | - | - | y ₁ = 20,7525-20,0721y ₆ |
| y ₁ ~ y ₇ | склад насаджень ~ ~ вік особин | 574 | 0,0716 | (2,72) | (3,49) | 0,0717 | (1,14) | (1,51) | 1,7213 | (1,15) | (1,52) | + | + | - |
| y ₂ ~ y ₃ | висота особин ~ ~ діаметр особин | 161 | 0,5157 | 2,65 | 2,06 | 0,5705 | 3,66 | 2,78 | 8,8587 | 4,47 | 3,39 | - | - | y ₂ = 10,4621+0,293y ₃ |
| y ₂ ~ y ₄ | висота особин ~ ~ бонітет | 101 | -0,5837 | 2,99 | 2,34 | 0,6681 | 3,37 | 2,56 | 8,8090 | 4,45 | 3,37 | - | - | y ₂ = 30,6615-2,895y ₄ |

| Кореляційний зв'язок | | N | r | $\xi_{\alpha} (\xi_{\alpha})$ | | Z | $\xi_{\alpha} (\xi_{\alpha})$ | | t _p | $\xi_{\alpha} (\xi_{\alpha})$ за t _α | | H ₀ : ρ = 0 | | Рівняння лінії регресії | | |
|---------------------------------|---|-----|----------------|-------------------------------|-------------|---------------|-------------------------------|-------------|----------------|---|-------------|------------------------|------|--|------|------|
| | | | | за Γ _{кр.} для α: | | | за Z _α | | | 0,05 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | | 0,05 | 0,01 |
| | | | | 0,05 | 0,01 | | | | | | | | | | | |
| y ₂ ~ y ₅ | висота особин ~ ~ показна площа насаджень | 164 | 0,1473 | (1,32) | (1,70) | 0,1483 | (1,04) | (1,37) | 1,9164 | (1,03) | (1,37) | + | + | - | | |
| y ₂ ~ y ₆ | висота особин ~ ~ повнота насаджень | 164 | 0,3799 | 1,95 | 1,52 | 0,3999 | 2,59 | 1,97 | 5,6509 | 2,85 | 2,16 | - | - | y ₂ = 10,0505+15,6932y ₆ | | |
| y ₂ ~ y ₇ | висота особин ~ вік особин | 164 | 0,2976 | 1,53 | 1,19 | 0,3069 | 1,99 | 1,51 | 4,1559 | 2,10 | 1,59 | - | - | y ₂ = 15,0785+0,0335y ₇ | | |
| y ₃ ~ y ₄ | діаметр особин ~ ~ бонітет | 101 | -0,2706 | 1,39 | 1,08 | 0,2775 | 1,40 | 1,07 | 2,9052 | 1,47 | 1,11 | - | - | y ₃ = 38,9898 – 2,362y ₄ | | |
| y ₃ ~ y ₅ | діаметр особин ~ ~ показна площа насаджень | 161 | 0,1617 | (1,21) | (1,55) | 0,1631 | 1,05 | (1,26) | 2,0937 | 1,06 | (1,25) | - | + | y ₃ = 28,6496+0,1319y ₅ | | |
| y ₃ ~ y ₆ | діаметр особин ~ ~ повнота насаджень | 161 | 0,2466 | 1,27 | (1,01) | 0,2518 | 1,62 | 1,23 | 3,3108 | 3,31 | 1,27 | - | - | y ₃ = 19,2072+17,9313y ₆ | | |
| y ₃ ~ y ₇ | діаметр особин ~ ~ вік особин | 161 | 0,6194 | 3,18 | 2,48 | 0,7240 | 4,64 | 3,53 | 12,6721 | 6,40 | 4,84 | - | - | y ₃ = 14,7414+0,1227y ₇ | | |
| y ₄ ~ y ₅ | бонітет ~ показна площа насаджень | 101 | -0,3174 | 1,63 | 1,27 | 0,3288 | 1,66 | 1,26 | 3,5119 | 1,77 | 1,34 | - | - | y ₄ = 4,1928–0,0297y ₅ | | |
| y ₄ ~ y ₆ | бонітет ~ повнота насаджень | 101 | -0,3014 | 1,55 | 1,21 | 0,3111 | 1,57 | 1,19 | 3,2985 | 1,32 | 1,26 | - | - | y ₄ = 5,4358–2,5107y ₆ | | |
| y ₄ ~ y ₇ | бонітет ~ вік особин | 101 | -0,1075 | (1,81) | (2,33) | 0,1079 | (1,84) | (2,42) | 1,0821 | (1,83) | (2,42) | + | + | - | | |
| y ₅ ~ y ₆ | показна площа насаджень ~ повнота насаджень | 574 | 0,1162 | (1,68) | (2,15) | 0,1167 | 1,42 | 1,08 | 2,8171 | 1,42 | 1,08 | - | - | y ₅ = 1,0744+10,3617y ₆ | | |
| y ₅ ~ y ₇ | показна площа насаджень ~ вік особин | 574 | 0,1004 | (1,94) | (2,49) | 0,1007 | 1,23 | (1,07) | 2,4257 | 1,23 | (1,08) | - | + | y ₅ = 4,1206+0,0244y ₇ | | |
| y ₆ ~ y ₇ | повнота насаджень ~ ~ вік особин | 574 | -0,1471 | (1,33) | (1,70) | 0,1481 | 1,81 | 1,37 | 3,5959 | 1,82 | 1,37 | - | - | y ₆ = 0,627–0,0004y ₇ | | |

Таблиця 8

Матриця коефіцієнтів кореляції між значеннями функції відгуку $y_i \sim y_j$

| $y_i \backslash y_j$ | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 | y_5 | y_6 | y_7 | $\sum_{j,i=1}^{n=7} r_{ij} $ | Ранг y_i |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|------------|
| y_1 | 1 | -0,2401 | 0,0578 | 0,3203 | -0,0518 | -0,1735 | 0,0716 | 1,9151 | 6 |
| y_2 | -0,2401 | 1 | 0,5157 | -0,5837 | 0,1473 | 0,3799 | 0,2976 | 3,1643 | 1 |
| y_3 | 0,0578 | 0,5157 | 1 | -0,2706 | 0,1617 | 0,2466 | 0,6194 | 2,8718 | 3 |
| y_4 | 0,3203 | -0,5837 | -0,2706 | 1 | -0,3174 | -0,3014 | -0,1075 | 2,9009 | 2 |
| y_5 | -0,0518 | 0,1473 | 0,1617 | -0,3174 | 1 | 0,1162 | 0,1004 | 1,8948 | 7 |
| y_6 | -0,1735 | 0,3799 | 0,2466 | -0,3014 | 0,1162 | 1 | -0,1471 | 2,3647 | 4 |
| y_7 | 0,0716 | 0,2976 | 0,6194 | -0,1075 | 0,1004 | -0,1471 | 1 | 2,3436 | 5 |

Таблиця 9

Матриця коефіцієнтів кореляції між значеннями вхідних факторів $x_k \sim x_m$

| $x_k \backslash x_m$ | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | $\sum_{k,m=1}^{n=4} r_{km} $ | Ранг x_k |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|------------|
| x_1 | 1 | 0,0756 | -0,0270 | -0,0207 | 1,1233 | 4 |
| x_2 | 0,0756 | 1 | 0,1473 | -0,0387 | 1,2616 | 2 |
| x_3 | -0,0270 | 0,1473 | 1 | -0,1428 | 1,3171 | 1 |
| x_4 | -0,0207 | -0,0387 | -0,1428 | 1 | 1,2022 | 3 |

5. Значущість коефіцієнта кореляції. Ступінь лінійності та нелінійності зв'язку. Значущість ρ доводили за t-критерієм Стьюдента [1, 5], функцією перетворення Фішера Z_p [1, 5] за допомогою критичного значення $Z_{кр.(\alpha)} = (Z_p \cdot \sigma_Z)$, де $Z_p \{p = 1 - \alpha/2\}$ – квантиль нормованого нормального розподілу Гаусса для ймовірності $p = 1 - \alpha/2$ [1], а σ_Z – середнє квадратичне відхилення розподілу функції Z [1, 5] та критичного значення коефіцієнта кореляції $r_{кр.(\alpha)}$ [11] для ступенів значущості $\alpha = 0,01$ і $\alpha = 0,05$ [2, 3, 9-11].

Ступінь лінійності ξ_α (ступінь нелінійності $\dot{\xi}_\alpha$) кореляційного зв'язку оцінювали за [5]:

$$\text{за } r_{кр.(\alpha)}: \quad \xi_\alpha = \frac{|r|}{r_{кр.(\alpha)}} \left(\dot{\xi}_\alpha = \frac{r_{кр.(\alpha)}}{|r|} \right); \quad (5)$$

$$\text{за } Z_p: \quad \xi_\alpha = \frac{|Z|}{(Z_p \cdot \sigma_Z)} \left(\dot{\xi}_\alpha = \frac{Z_p \cdot \sigma_Z}{|Z|} \right); \quad (6)$$

$$\text{за } t_\alpha: \quad \xi_\alpha = \frac{|t_p|}{t_\alpha} \left(\dot{\xi}_\alpha = \frac{t_\alpha}{|t_p|} \right). \quad (7)$$

У табл. 7 порівнювали:

- $|r|$ з $r_{кр. \{ \alpha = 0,01; f \geq 100 \}} = 0,250$ та $r_{кр. \{ \alpha = 0,05; f \geq 100 \}} = 0,195$ [11];
- $|Z|$ з $(Z_p \cdot \sigma_Z)$, де $Z_{0,995} = 2,58$ (для $\alpha = 0,01$) та $Z_{0,975} = 1,96$ (для $\alpha = 0,05$) [1];
- $|t_p|$ з $t_{0,01 \{ \alpha/2 = 0,005; f \geq 120 \}} = 2,617$ (для $\alpha = 0,01$) та $t_{0,05 \{ \alpha/2 = 0,025; f \geq 120 \}} = 1,980$ (для $\alpha = 0,05$) [2, 9];

- $\sigma_Z = 0,04185$ (для $N = 574$); $(Z_{0,995} \cdot \sigma_Z) = 0,1080$ (для $\alpha = 0,01$; $N = 574$) та $(Z_{0,975} \cdot \sigma_Z) = 0,0820$ (для $\alpha = 0,05$; $N = 574$);
- $\sigma_Z = 0,07881$ (для $N = 164$); $(Z_{0,995} \cdot \sigma_Z) = 0,2033$ (для $\alpha = 0,01$; $N = 164$) та $(Z_{0,975} \cdot \sigma_Z) = 0,1545$ (для $\alpha = 0,05$; $N = 164$);
- $\sigma_Z = 0,07956$ (для $N = 161$); $(Z_{0,995} \cdot \sigma_Z) = 0,2053$ (для $\alpha = 0,01$; $N = 161$); $(Z_{0,975} \cdot \sigma_Z) = 0,1559$ (для $\alpha = 0,05$; $N = 161$);
- $\sigma_Z = 0,10102$ (для $N = 101$); $(Z_{0,995} \cdot \sigma_Z) = 0,2606$ (для $\alpha = 0,01$; $N = 101$); $(Z_{0,975} \cdot \sigma_Z) = 0,1980$ (для $\alpha = 0,05$; $N = 101$).

У табл. 7 темним шрифтом показані значущі коефіцієнти кореляції (тобто між $y_i \sim y_j$, $y_i \sim x_k$ або $x_k \sim x_m$ є надійний лінійний зв'язок). У табл. 7 приведені розрахункові значення ступенів рівності (без дужок) та нерівностей (в дужках). У підсумку нульову гіпотезу $H_0: \rho = 0$ (рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції – немає лінійного зв'язку) приймали («+»), або відкидали («-») $H_1: \rho \neq 0$ (нерівність нулю генерального коефіцієнта кореляції – є надійний лінійний зв'язок).

Як видно з табл. 7, надійний лінійний зв'язок (значущий коефіцієнта кореляції з $\alpha = 0,01$ і $0,05$) спостерігається між $y_i \sim x_k$ у ряду за зростанням ступеня лінійності:

$$(y_2 \sim x_2)^* < (y_1 \sim x_3) < (y_6 \sim x_4) < (y_4 \sim x_4) < (y_3 \sim x_3) < (y_7 \sim x_3) < (y_2 \sim x_4) < (y_1 \sim x_4) < (y_6 \sim x_3); \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \text{(висота особин} \sim \text{стрімкість схилу)}^* < \text{(склад насаджень} \sim \text{висота над р. м.)} < \text{(повнота насаджень} \sim \text{тип лісу)} < \\ & < \text{(бонітет} \sim \text{тип лісу)} < \text{(діаметр особин} \sim \text{висота над р.м.)} < \text{(вік особин} \sim \text{висота над р. м.)} < \text{(висота особин} \sim \\ & \text{тип лісу)} < \text{(склад насаджень} \sim \text{тип лісу)} < \text{(повнота насаджень} \sim \text{висота над р.м.)}. \end{aligned} \quad (9)$$

(*лише для $\alpha = 0,05$).

Як видно з табл. 7, нелінійний зв'язок з рівнем значущості $\alpha = 0,01$ і $\alpha = 0,05$ спостерігається між $y_i \sim x_k$ у ряду за зростанням ступеня нелінійності:

$$\begin{aligned} (y_3 \sim x_2) = (y_5 \sim x_2) < (y_7 \sim x_2) < (y_5 \sim x_4) \leq (y_7 \sim x_4) < (y_6 \sim x_1) = (y_2 \sim x_3) \leq (y_4 \sim x_2) \leq (y_7 \sim x_1) < (y_6 \sim x_2) \leq (y_4 \sim x_1) \\ < (y_5 \sim x_3) < (y_1 \sim x_1) \leq (y_1 \sim x_2) \leq (y_5 \sim x_1) < (y_3 \sim x_4) < (y_3 \sim x_1) < (y_4 \sim x_3) < (y_2 \sim x_1); \end{aligned} \quad (10)$$

(діаметр особин \sim стрімкість схилу) = (показна площа насаджень \sim стрімкість схилу) < (вік особин \sim стрімкість схилу) < (показна площа насаджень \sim тип лісу) \leq (вік особин \sim тип лісу) < (щільність насаджень \sim експозиція схилу) = (висота особин \sim висота над рівнем моря) \leq (бонітет \sim стрімкість схилу) \leq (вік особин \sim експозиція схилу) < (щільність насаджень \sim стрімкість схилу) \leq (бонітет \sim експозиція схилу) < (показна площа насаджень \sim висота над рівнем моря) < (склад насаджень \sim експозиція схилу) \leq (склад насаджень \sim стрімкість схилу) \leq (показна площа насаджень \sim експозиція схилу) < (діаметр особин \sim тип лісу) < (діаметр

$$\begin{aligned} & \text{особин} \sim \text{експозиція схилу)} < \text{(бонітет} \sim \text{висота над рівнем моря)} < < \\ & < \text{(висота особин} \sim \text{експозиція схилу)}; \end{aligned} \quad (11)$$

При цьому, із зростанням висота над р.м. (x_3) склад насаджень зростає відносно відсотка особин (y_1) та збільшується вік особин *Pinus cembra* (y_7), а із зміною типу лісу від 1 до 4 (x_4) висота особин *Pinus cembra* зростає (y_2) та збільшується повнота насаджень (y_6) від 0,2 до 0,8, про що свідчать позитивні значення коефіцієнтів кореляції для зв'язків $y_1 \sim x_3$, $y_2 \sim x_4$, $y_6 \sim x_4$, $y_7 \sim x_3$, і, навпаки, при зростанні крутизни схилу (x_2) висота особин *Pinus cembra* (y_2) зменшується, із зростанням висоти над р.м. – діаметр особин *Pinus cembra* (y_3) та повнота насаджень (y_6) зменшується, а із зміною типу лісу від 1 до 4 (x_4) – склад насаджень відносно відсотка особин *Pinus cembra* (y_1) та бонітету (y_4) зменшується, про що свідчать негативні значення коефіцієнтів кореляції для зв'язків $y_2 \sim x_2$, $y_3 \sim x_3$, $y_6 \sim x_3$, $y_1 \sim x_4$, $y_4 \sim x_4$.

Надійні лінійні зв'язки спостерігаються між «лідерами» y_i та x_k : між висотою особин (y_2) (ранг 1) та висотою над р.м. (x_3) (ранг 1) [$r_{2,3} = 14,73\%$; ступінь лінійності $\xi_{0,05} = 1,82$ та $\xi_{0,01} = 1,38$]; між висотою особин (y_2) (ранг 1) та крутизною схилу (x_2) (ранг 2) [$r_{2,2} = -15,94\%$; $\xi_{0,05} = 1,05$], у той же час між бонітетом (y_4) (ранг 2) та висотою над р.м. (x_3) (ранг 1) залежність нелінійна [$r_{4,3} = -2,4\%$; ступінь нелінійності $\xi_{0,05} = 8,29$ та $\xi_{0,01} = 10,95$], між бонітетом (y_4) (ранг 2) та крутизною схилу (x_2) (ранг 2) залежність теж нелінійна [$r_{4,2} = 13,37\%$; ступінь нелінійності $\xi_{0,05} = 1,4$ та $\xi_{0,01} = 1,93$]; надійний лінійний зв'язок спостерігається між діаметром особин (y_3) (ранг 3) та висотою над р.м. (x_3) (ранг 1) [$r_{3,3} = -25,09\%$; ступінь лінійності $\xi_{0,05} = 1,71$ та $\xi_{0,01} = 1,29$]; між діаметром особин (y_3) (ранг 3) та крутизною схилу (x_2) (ранг 2) спостерігається нелінійний зв'язок [$r_{3,2} = -14,21\%$; ступінь нелінійності $\xi_{0,05} = 1,08$ та $\xi_{0,01} = 1,43$].

Нелінійні зв'язки спостерігаються також між «аутсайдерами» y_j та x_m : між віком особин (y_7) (ранг 5) та експозицією схилу (x_1) (ранг 4) [$r_{7,1} = 5,26\%$; ступінь нелінійності $\xi_{0,05} = 1,57$ та $\xi_{0,01} = 2,07$]; між складом насаджень відносно відсотка особин *Pinus cembra* (y_1) (ранг 6) та експозицією схилу (x_1) (ранг 4) [$r_{1,1} = 2,85\%$; ступінь нелінійності $\xi_{0,05} = 2,9$ та $\xi_{0,01} = 3,84$], у той же час між «аутсайдерами» y_j та «лідерами» x_k спостерігаються надійні лінійні зв'язки: між віком особин (y_7) (ранг 5) та висотою над р.м. (x_3) (ранг 1) [$r_{7,3} = 19,58\%$; ступінь лінійності $\xi_{0,05} = 2,46$ та $\xi_{0,01} = 1,86$]; між складом насаджень відносно відсотка особин *Pinus cembra* (y_1) (ранг 6) та висотою над р.м. (x_3) (ранг 1) [$r_{1,3} = 11,46\%$; ступінь лінійності $\xi_{0,05} = 1,40$ та $\xi_{0,01} = 1,06$].

Складемо мажорантні ряди впливу вхідних параметрів x_k на функцію відгуку y_i особин *Pinus cembra*:

1) на y_1 (склад насаджень відносно відсотка особин *Pinus cembra*):

- за коефіцієнтом кореляції (лінійний вплив):

$$x_k: x_2 \leq x_1 < x_3 \ll x_4; \left(\begin{array}{c} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{array} \right) \leq \left(\begin{array}{c} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{array} \right) \ll \left(\begin{array}{c} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{array} \right);$$

$$|r_{jk}| : 2,74\% \leq 2,85\% < 11,46\% \ll 21,29\%;$$

- за ступенем лінійності ξ_α (лінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_2 \leq x_1 < x_3 \ll x_4; \xi_{0,05}: \quad 0,33 \leq 0,35 < 1,40 \ll 2,69; \left(\begin{array}{c} \text{теж} \\ \text{саме} \end{array} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_2 \leq x_1 < x_3 \ll x_4; \xi_{0,01}: \quad 0,25 \leq 0,26 < 1,06 \ll 2,04; \left(\begin{array}{c} \text{теж} \\ \text{саме} \end{array} \right);$$

- за ступенем нелінійності $\dot{\xi}_\alpha$ (нелінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_4 < x_3 < x_1 < x_2; \dot{\xi}_{0,05}: 0,37 < 0,71 \ll 2,9 < 3,02;$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{array} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_4 < x_3 < x_1 < x_2; \dot{\xi}_{0,01}: \quad 0,49 \leq 0,94 \ll 3,84 < 3,99; \left(\begin{array}{c} \text{теж} \\ \text{саме} \end{array} \right)$$

- сумарний вплив $(\xi_\alpha + \dot{\xi}_\alpha)$ (лінійний + нелінійний впливи) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: x_3 < x_4 < x_1 < x_2; (\xi_{0,05} + \dot{\xi}_{0,05}): 2,11 < 3,06 < 3,25 < 3,35;$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{array} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_3 < x_4 < x_1 < x_2; (\xi_{0,01} + \dot{\xi}_{0,01}): 2,0 < 2,53 < 4,10 < 4,24; \left(\begin{array}{c} \text{теж} \\ \text{саме} \end{array} \right)$$

2) на y_2 (висота особин):

- за коефіцієнтом кореляції (лінійний вплив):

$$x_k: \quad x_1 \ll x_3 < x_2 \ll x_4; |r_{jk}| : 0,72\% \ll 11,62\% < 15,94\% \ll 35,09\%;$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{array} \right) \ll \left(\begin{array}{c} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{array} \right) \ll \left(\begin{array}{c} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{array} \right);$$

- за ступенем лінійності ξ_α (лінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_1 \ll x_3 < x_2 \ll x_4; \xi_{0,05}: \quad 0,05 \ll 0,76 < 1,05 \ll 2,57; \left(\begin{array}{c} \text{теж} \\ \text{саме} \end{array} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_1 \ll x_3 < x_2 \ll x_4; \xi_{0,01}: \quad 0,04 \ll 0,57 < 0,79 \ll 1,95; \left(\begin{array}{c} \text{теж} \\ \text{саме} \end{array} \right);$$

- за ступенем нелінійності $\dot{\xi}_\alpha$ (нелінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_4 < x_2 < x_3 < x_1; \dot{\xi}_{0,05}: 0,39 < 0,95 < 1,32 \ll 21,6;$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{array} \right) \ll \left(\begin{array}{c} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{array} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_4 < x_2 < x_3 < x_1; \dot{\xi}_{0,01}: \quad 0,51 < 1,26 < 1,75 \ll 28,5; \left(\begin{array}{c} \text{теж} \\ \text{саме} \end{array} \right);$$

- сумарний вплив $(\xi_\alpha + \dot{\xi}_\alpha)$ (лінійний + нелінійний впливи) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_2 \leq x_3 < x_4 \ll x_1; (\xi_{0,05} + \dot{\xi}_{0,05}): \quad 2,0 \leq 2,08 < 2,96 \ll 21,65;$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{array} \right) \leq \left(\begin{array}{c} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{array} \right) \ll \left(\begin{array}{c} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{array} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_2 < x_3 < x_4 \ll x_1; (\xi_{0,01} + \dot{\xi}_{0,01}): \quad 2,05 < 2,32 < 2,46 \ll 28,54; \left(\begin{array}{c} \text{теж} \\ \text{саме} \end{array} \right);$$

3) на y_3 (діаметр особин):

- за коефіцієнтом кореляції (лінійний вплив)

$$x_k: \quad x_1 < x_4 \ll x_2 < x_3; |r_{jk}| : 4,16\% < 4,65\% \ll 14,21\% < 25,09\%;$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{array} \right) \ll \left(\begin{array}{c} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{array} \right) < \left(\begin{array}{c} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{array} \right);$$

• за ступенем лінійності ξ_α (лінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_1 \leq x_4 < x_2 < x_3; \xi_{0,05} \quad 0,27 \leq 0,30 < 0,93 < 1,71; \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_1 < x_4 < x_2 < x_3; \xi_{0,01}: \quad 0,20 \leq 0,23 < 0,70 < 1,29; \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

• за ступенем нелінійності ξ_α (нелінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_3 < x_2 < x_4 < x_1; \xi_{0,05}: 0,61 < 1,09 < 3,35 < 3,75;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_3 < x_2 < x_4 < x_1; \xi_{0,01}: \quad 0,80 < 1,44 < 4,41 < 4,94; \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

• сумарний вплив ($\xi_\alpha + \xi_\alpha$) (лінійний + нелінійний впливи) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_2 < x_3 < x_4 < x_1; (\xi_{0,05} + \xi_{0,05}): 2,02 < 2,32 < 3,65 < 4,02;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_3 \leq x_2 < x_4 < x_1; (\xi_{0,01} + \xi_{0,01}): \quad 2,09 \leq 2,14 < 4,64 < 5,14;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right);$$

4) на y_4 (бонітет – продуктивність):

• за коефіцієнтом кореляції (лінійний вплив):

$$x_k: \quad x_3 < x_1 < x_2 < x_4; |r_{jk}|: 2,40\% < 10,04\% < 13,37\% < 28,56\%;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right);$$

• за ступенем лінійності ξ_α (лінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_3 < x_1 \leq x_2 < x_4; \xi_{0,05}: \quad 0,12 < 0,51 \leq 0,69 < 1,56; \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_3 < x_1 < x_2 < x_4; \xi_{0,01}: \quad 0,09 < 0,39 < 0,80 < 1,18; \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

• за ступенем нелінійності ξ_α (нелінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_4 < x_2 < x_1 < x_3; \xi_{0,05}: 0,64 < 1,46 < 1,96 < 8,29;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_4 < x_2 < x_1 < x_3; \xi_{0,01}: \quad 0,85 < 1,93 < 2,59 < 10,95; \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

• сумарний вплив ($\xi_\alpha + \xi_\alpha$) (лінійний + нелінійний впливи) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_2 \leq x_4 < x_1 < x_3; (\xi_{0,05} + \xi_{0,05}): \quad 2,15 \leq 2,20 < 2,47 < 8,41;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_4 \leq x_2 < x_1 < x_3; (\xi_{0,01} + \xi_{0,01}): 2,03 \leq 2,73 < 2,98 < 11,04;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right);$$

5) на y_5 (показна площа насаджень):

• за коефіцієнтом кореляції (лінійний вплив):

$$x_k: \quad x_1 < x_3 < x_4 < x_2; |r_{jk}|: 2,72\% < 3,45\% < 6,63\% < 7,60\%; \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right);$$

• за ступенем лінійності ξ_α (лінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_1 \leq x_3 < x_4 \leq x_2; \xi_{0,05}: \quad 0,33 \leq 0,42 < 0,81 \leq 0,93; \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_1 \leq x_3 < x_4 \leq x_2; \xi_{0,01}: \quad 0,25 \leq 0,32 < 0,61 \leq 0,70; \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

• за ступенем нелінійності ξ_α (нелінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_2 \leq x_4 < x_3 < x_1; \xi_{0,05}: 1,08 \leq 1,24 < 2,40 < 3,04;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_2 \leq x_4 < x_3 < x_1; \quad \xi_{0,01}: \quad 1,43 \leq 1,64 < 3,17 < 4,02; \quad \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

- сумарний вплив $(\xi_\alpha + \dot{\xi}_\alpha)$ (лінійний + нелінійний впливи) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_2 \leq x_4 < x_3 < x_1; \quad (\xi_{0,05} + \dot{\xi}_{0,05}): \quad 2,01 \leq 2,05 < 2,82 < 3,37;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) \ll \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_2 \leq x_4 < x_3 < x_1; \quad (\xi_{0,01} + \dot{\xi}_{0,01}): \quad 2,13 \leq 2,25 < 3,49 < 4,27; \quad \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

б) на y_6 (повнота – щільність насаджень):

- за коефіцієнтом кореляції (лінійний вплив)

$$x_k: \quad x_2 \leq x_1 < x_4 < x_3; \quad |r_{ik}|: \quad 4,55\% \leq 6,27\% < 12,27\% < 21,9\%; \quad \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right);$$

- за ступенем лінійності ξ_α (лінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_2 \leq x_1 < x_4 < x_3; \quad \xi_{0,05}: \quad 0,55 \leq 0,76 < 1,50 < 2,78; \quad \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_2 \leq x_1 < x_4 < x_3; \quad \xi_{0,01}: \quad 0,42 \leq 0,58 < 1,14 < 2,10; \quad \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

- за ступенем нелінійності $\dot{\xi}_\alpha$ (нелінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_3 < x_4 < x_1 < x_2; \quad \dot{\xi}_{0,05}: \quad 0,36 < 0,67 < 1,32 < 1,82;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_3 < x_4 < x_1 < x_2; \quad \dot{\xi}_{0,01}: \quad 0,48 < 0,88 < 1,74 < 2,40; \quad \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

- сумарний вплив $(\xi_\alpha + \dot{\xi}_\alpha)$ (лінійний + нелінійний впливи) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_4 < x_1 \leq x_2 < x_3; \quad (\xi_{0,05} + \dot{\xi}_{0,05}): \quad 1,17 < 2,08 \leq 2,37 < 3,14; \quad \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_4 < x_1 \leq x_3 \leq x_2; \quad (\xi_{0,01} + \dot{\xi}_{0,01}): \quad 2,02 < 2,32 \leq 2,58 \leq 2,82;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right);$$

7) на y_7 (вік особин):

- за коефіцієнтом кореляції (лінійний вплив):

$$x_k: \quad x_1 \leq x_4 \leq x_2 < x_3; \quad |r_{ik}|: \quad 5,26\% \leq 6,49\% \leq 7,06\% \ll 19,58\%;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{крутизна} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) \ll \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right);$$

- за ступенем лінійності ξ_α (лінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_1 \leq x_4 \leq x_2 < x_3; \quad \xi_{0,05}: \quad 0,64 \leq 0,79 \leq 0,86 < 2,46; \quad \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_1 \leq x_4 \leq x_2 < x_3; \quad \xi_{0,01}: \quad 0,48 \leq 0,60 < 0,65 \ll 1,86; \quad \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

- за ступенем нелінійності $\dot{\xi}_\alpha$ (нелінійний вплив) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_3 < x_2 < x_4 < x_1; \quad \dot{\xi}_{0,05}: \quad 0,41 < 1,17 \leq 1,27 < 1,57;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{крутизна} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_3 < x_2 < x_4 \ll x_1; \quad \dot{\xi}_{0,01}: \quad 0,54 < 1,54 \leq 1,68 < 2,07; \quad \left(\begin{matrix} \text{теж} \\ \text{саме} \end{matrix} \right);$$

- сумарний вплив $(\xi_\alpha + \dot{\xi}_\alpha)$ (лінійний + нелінійний впливи) за t_α :

$$\alpha = 0,05 \quad x_k: \quad x_2 < x_4 \leq x_1 < x_3; \quad (\xi_{0,05} + \dot{\xi}_{0,05}): \quad 0,85 < 2,06 \leq 2,21 < 2,87;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{крутизна} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right);$$

$$\alpha = 0,01 \quad x_k: \quad x_2 < x_4 \leq x_3 \leq x_1; \quad (\xi_{0,01} + \dot{\xi}_{0,01}): \quad 2,19 < 2,28 \leq 2,40 \leq 2,55;$$

$$\left(\begin{matrix} \text{стрімкість} \\ \text{крутизна} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right) < \left(\begin{matrix} \text{тип} \\ \text{лісу} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{висота} \\ \text{над р.м.} \end{matrix} \right) \leq \left(\begin{matrix} \text{експозиція} \\ \text{схилу} \end{matrix} \right);$$

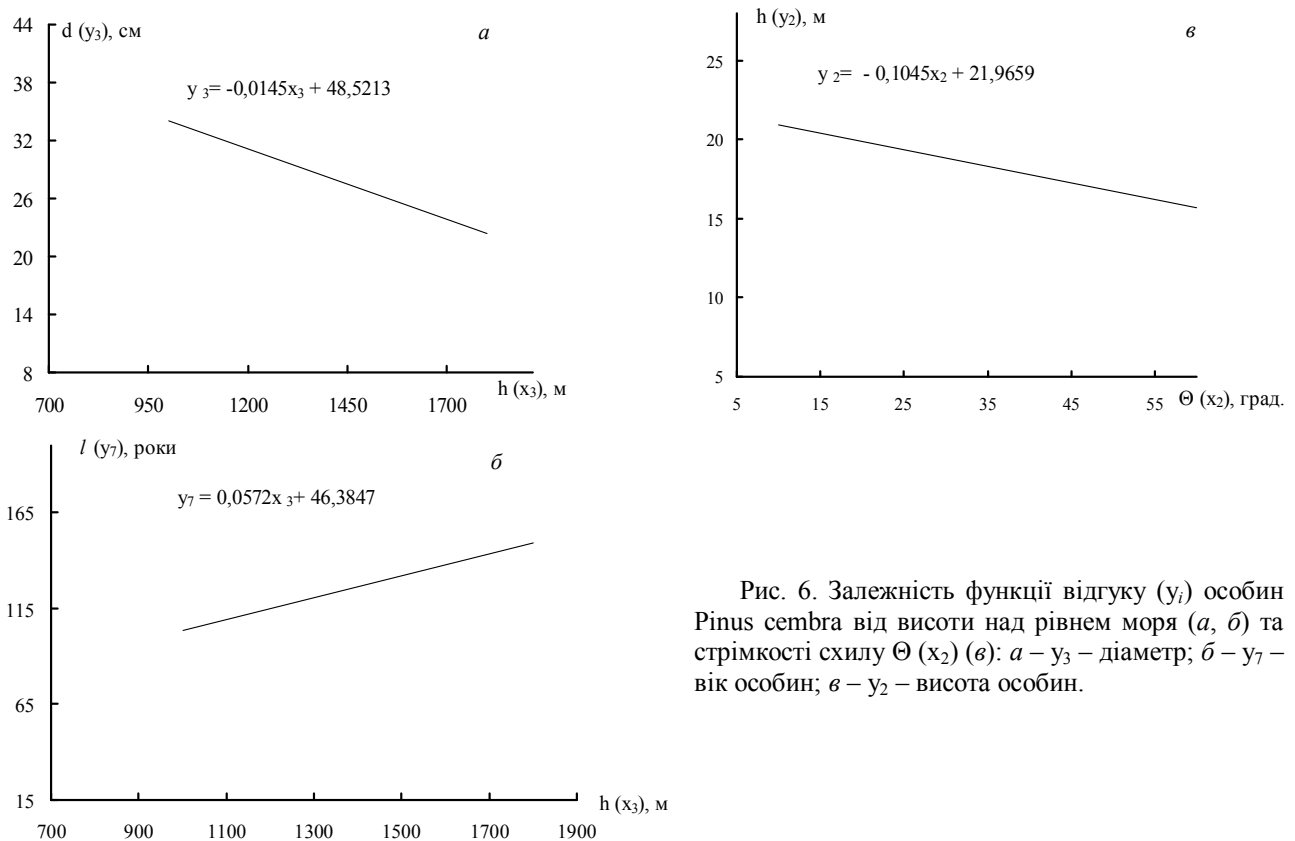


Рис. 6. Залежність функції відгуку (y_i) особин *Pinus sibirica* від висоти над рівнем моря (*a*, *б*) та стрімкості схилу Θ (x_2) (*в*): *a* – y_3 – діаметр; *б* – y_7 – вік особин; *в* – y_2 – висота особин.

6. Регресійний аналіз. Регресійний аналіз здійснено за результатами кореляційного аналізу (лінійна модель) [1, 5] та МНК [1, 5-12]. Рівняння ліній регресії для кореляційних зв'язків $x_k \sim x_m$, $y_i \sim x_k$, $y_i \sim y_j$ за значущими коефіцієнтами кореляції між величинами зведені в табл. 7. На рис. 6 показані такі залежності для $y_j \sim x_k$.

Висновки

1. Середньорічна температура в локалітетах сосни кедрової європейської коливається в межах $-1,2^\circ \dots +5,9^\circ\text{C}$; середні температури липня коливаються в межах $+9,1^\circ \dots +16,2^\circ\text{C}$, січня $-5,1^\circ \dots -12,2^\circ\text{C}$. Верхня межа поширення виду залежить від комплексу факторів: температура повітря, вітер, сніг, вологість та температура ґрунту.

2. Деревостани з участю виду *Pinus sibirica* переважно (26%) розміщені на південно-західних схилах, через їх більшу зволоженість. Річна кількість опадів у локалітетах становить 1762-2051 мм. Відносна вологість повітря в локалітетах сосни кедрової європейської становить 77%. За крутизною схилів 67% деревостанів знаходяться на крутих схилах (стрімкість 25-35 град.).

3. Переважна більшість місцезростань з участю виду приурочена до торф'яно-підзолистих ґрунтів, значно рідше сосна кедрова європейська зростає на гірсько-лісових бурих ґрунтах. Найбільша частка деревостанів з участю сосни кедрової європейської належить суборам – 76%, з них 46% це вологий кедрово-ялиновий субір і 27% – вологий чистоялиновий субір. Сутрудки становлять 21%, з них найбільша частка припадає на вологий чистий суялиник – 12%.

4. Вибрана математична модель експерименту «чорної скриньки» дозволила провести кореляційний аналіз між складом насаджень відносно відсотка особин *Pinus sibirica*, віку, висоти та діаметра особин, бонітету (продуктивності), показної площі та щільності (повноти) насаджень експозиції та стрімкості (крутизни) схилу, висоти над рівнем моря та типом лісу.

5. Доведено, що вибірковий розподіл бонітету, висоти та діаметру особин *Pinus sibirica* підпорядкований теоретичному нормальному закону Гаусса, а вибірковий розподіл щільності насаджень та віку особин близькі до нормального закону розподілу.

6. За допомогою теорії графів та коефіцієнтів кореляцій виявлені «лідери» серед функцій відгуку (висота і діаметр особин, бонітет) та серед вхідних факторів (висота над рівнем моря) та «аутсайдерів» серед функцій відгуку (показна площа та склад насаджень) та серед вхідних факторів (експозиція схилу).

7. За *t*-критерієм Стюдента, функцією перетворення Фішера *Z* та критичним значенням коефіцієнта кореляції доведена значущість коефіцієнтів кореляції між вхідними факторами, функціями відгуку та вхідними факторами і функціями відгуку.

8. За коефіцієнтами лінійності та нелінійності зв'язку показаний ступінь лінійності значущих кореляційних зв'язків (у порядку зростання ступеня лінійності) між висотою особин *Pinus sibirica* та крутизною схилу, складом насаджень та висотою над рівнем моря (над р.м.), повнотою насаджень та типом лісу, бонітетом

та типом лісу, діаметром особин та висотою над р.м., віком особин та висотою над р.м., висотою особин та типом лісу, складом насаджень та типом лісу, повнотою насаджень та висотою над р.м.

9. За коефіцієнтами кореляцій, ступенями лінійності та нелінійності кореляційних зв'язків та їх суми складено мажорантні ряди впливу вхідних факторів на функції цілі.

Література

1. М.Н. Степнов, Статистическая обработка результатов механических испытаний (Машиностроение, Москва, 1972).
2. Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков, Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента (Атомиздат, Москва, 1978).
3. А.Б. Волощенко, І.А. Джалладова, Теорія ймовірностей та математична статистика: навч.-метод. посібник для самост. вивчення дисц. (Київ. Нац. економ. ун-т, Київ, 2003).
4. О.Г. Сіренко, О.В. Кузишин, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Серія Біологія, X, 95 (2008).
5. О.Г. Сіренко, О.В. Кузишин, Л.Я. Мідак, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Серія Біологія, XI, 76 (2008).
6. О.Г. Сіренко, О.В. Кузишин, Л.Я. Мідак, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Серія Біологія, XI, 90 (2008).
7. В.П. Сигорский Математический аппарат инженера. 2 изд. (Техніка, Київ, 1977).
8. Г. Корн, Т. Корн, Справочник математика для научных работников и инженеров (Наука, Москва, 1978).
9. Дж.С. Бендат, А.Г. Пирсол, Измерение и анализ случайных процессов (Мир, Москва, 1971).
10. В.Б. Тихомиров, Планирование и анализ эксперимента (Легкая индустрия, Москва, 1974).
11. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский, Планирование эксперимента при порске оптимальных условий (Наука, Москва, 1976).
12. С.Н. Воловельская, А.И. Жилин, С.А. Кулиш, В.Б. Сивый, Нелинейная корреляция и регрессия (Техніка, Київ, 1971).
13. К.К. Смаглюк, Лесоведение, 1, 3 (1969).
14. К.К. Смаглюк, Рослинні ресурси України, їх вивчення та раціональне використання (Наук. думка, Київ, 1973).
15. Н.Е. Судачкова, Е.Я. Расторгуева, Р.А. Коловский, Физиология подростка кедра. Исследование в кедровнике Западного Саяна (Наука, Москва, 1967).
16. L. Contini, Y. Lavarello, Le Pin cembro (Paris, 1982).
17. І.О. Бучинський, М.М. Волеваха, В.О. Коржов, Клімат Українських Карпат (Наук. думка, Київ, 1971).
18. С.П. Позняк та ін., Біорізноманіття Карпатського біосферного заповідника (Київ, 1997).
19. М.С. Андрианов, Географический сборник, Вып. 4, 189 (1957).
20. М.С. Андрианов, Природа Украинских Карпат (Львів, 1968).
21. П.С. Пастернак, Лісові ґрунти Українських Карпат (Карпати, Ужгород, 1967).
22. Н.Б. Вернадер, И.Н. Гоголев, Д.И. Ковалишин и др., Почвы (Наук. думка, Київ, 1986).
23. М.А. Голубец, Ельники Украинских Карпат (Наук. думка, Київ, 1978).
24. М.А. Голубец, А.Н. Гаврусевич, И.К. Загайкевич и др., Украинские Карпаты. Природа (Наук. Думка, Київ, 1988).
25. М.А. Голубец, К.А. Малиновский, Проблемы ботаники: в 2-х томах (Наука, Ленинград, 1969).
26. М.А. Голубец, А.Н. Гаврусевич, И.К. Загайкевич и др., Украинские Карпаты: Природа (Наук. думка, Київ, 1988).
27. Н.Б. Вернадер, И.Н. Гоголев, Д.И. Ковалишин и др., Природа Украинской ССР: Почвы (Наук. думка, Київ, 1986).
28. С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров, Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии (Высш. шк., Москва, 1978).
29. В.В. Федоров, Теория оптимального эксперимента (планирование регрессионных экспериментов): монография (Наука, Москва, 1971).
30. В.В. Налимов, Н.А. Чернова, Статистические методы планирования экстремальных экспериментов (Наука, Москва, 1965).
31. Л.Ю. Березина, Графы и их применение: Пособие для учителей (Просвещение, Москва, 1979).
32. Р.Дж. Уилсон, Введение в теорию графов (Мир, Москва, 1977).

Сіренко Оксана Геннадіївна – кандидат біологічних наук, науковий співробітник лабораторії екології та захисту рослин відділу ландшафтного будівництва.

Сіренко Геннадій Олександрович – доктор технічних наук, професор, академік Академії технологічних наук України, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії.

Кузишин Ольга Василівна – кандидат фізико-математичних наук, викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії.

Мідак Лілія Ярославівна – кандидат хімічних наук, доцент, член-кореспондент Академії технологічних наук України, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії.