

---

## ЗНАЧЕННЯ КОРЕНЕВОЇ СИСТЕМИ В ПРОЯВІ АДАПТИВНОСТІ ДО АБІОТИЧНИХ СТРЕС-ФАКТОРІВ

---

Тищенко А. В., Тищенко О. Д., Коблай О. О.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-389-7-14>

### ВСТУП

Бобові трави, в т. ч. люцерна, є прекрасними, екологічно значущими фітомеліорантами, оскільки займають переважаче місце серед ґрунтозахисних культур, що мають розвинену кореневу систему, яка дозволяє зміцнювати структуру ґрунтів, перетворює їх верхні шари в пласт, не схильний до руйнування<sup>1</sup>. Встановлено позитивний вплив люцерни на перебіг гумусоутворюючого процесу, що знаходить відображення в підвищенні вмісту гумусу і його енергозапасів. За три роки люцерна, при дотриманні агротехнічних прийомів, залежно від ґрунтової відмінності накопичує в орному шарі до 17 т на гектарі кореневих залишків, що містять більше 300 кг азоту, 80 кг фосфору і 120 кг калію<sup>2</sup>.

В сучасних умовах поширення посівів люцерни слід розглядати як один із шляхів призупинення негативних процесів у ґрунті, підвищення його родючості, поліпшення структури, збагачення елементами живлення. Вона, завдяки своїй біологічній властивості – азотфіксації, фіксує азот з повітря та накопичує його в ґрунті, забезпечуючи цим важливим елементом живлення себе і наступні культури в сівозміні. Але, від морфології кореневої системи (форми її структури) залежить здатність накопичувати кореневу масу, рівень азотфіксуючої активності, тим самим визначається її цінність як попередника для наступних культур.

На думку Д. Ф. С. Ламба та ін. зміна морфології кореня збільшила б ефективність люцерни для використання в фітомеліорації, тим більше, що ознаки морфології коренів у люцерни є спадковими, хоча на них

---

<sup>1</sup> Тараріко О. Г., Шерстобоева О. В., Патика В. П. Концепція і наукове обґрунтування основних напрямків удосконалення систем випуску і реалізації мікробіологічних препаратів для сільськогосподарського виробництва. *Мікробіологічний журнал*. 1997. № 4. С. 102–108.

<sup>2</sup> Ciagło-Androsiuk S. Relationship between root and yield related morphological characters in pea (*Pisum sativum* L.). *Plant breeding and seed science*. 2012. Vol. 66. P. 4–15. DOI: 10.2478/v10129-011-0053-7.

сильно впливають період спокою і географічне походження<sup>3</sup>. В даний час проблема селекції рослин з морфології кореня, здатності фенотипувати і вибирати бажані характеристики коренів обмежена, через їх підземне розташування. Але зусилля селекціонерів спрямовані на зміну кореневих ознак, які можуть привести до появи нових, більш стійких до стресу сортів і збільшення врожайності за рахунок підвищення здатності рослини розвивати потужну кореневу систему і, таким чином, забезпечувати рослини водою, поживними речовинами, адаптацію до посухи, підвищену стійкість до біотичних стресів<sup>4, 5, 6, 7</sup>.

Проте досить сказати, що сорти сільськогосподарських культур у однакових умовах дають неоднаковий урожай як за величиною, так і за якістю. Отже, вони відрізняються за своєю природою, генотипом, потужністю та фізіологічною активністю кореневих систем<sup>8</sup>. Тому розширення знань про морфологічну структуру кореневої системи, її форму, архітекtonіку має не лише теоретичне, але й практичне значення.

Як свідчать результати досліджень вчених, існує велика різноманітність кореневих систем, яка є невикористаною. Тому дослідження складності кореневих систем, генетичної мінливості ознак, ідентифікація відповідних ознак для поліпшення врожаю та включення їх у селекційні програми для створення нових сортів сільськогосподарських культур є актуальним питанням<sup>9</sup>.

---

<sup>3</sup> Lamb J. F. S., Samac D. A., Barnes D. K. & Henjum K. I. Increased Herbage Yield in Alfalfa Associated with Selection for Fibrous and Lateral Roots. *Crop Sci.* 2000. № 40. P. 693–699.

<sup>4</sup> Chen Y., Ghanem M. E. & Kadambot H. M. Siddique. Characterising root trait variability in chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasm. *Journal of Experimental Botany.* 2017. Vol. 68. № 8. P. 1987–1999. DOI:10.1093/jxb/erw368

<sup>5</sup> Liu L., Zhang H., Ju C., Xiong Y., Bian J., Zhao B., Yang J. Changes in Grain Yield and Root Morphology and Physiology of Mid-Season Rice in the Yangtze River Basin of China During the Last 60 Years. *Journal of Agricultural Science*, 2014. Vol. 6. №. 7. DOI: 10.5539/jas.v6n7p1

<sup>6</sup> Meister R., Rajani M., Ruzicka D., Schachtman D. P. Challenges of modifying root traits in crops for agriculture. *Trends Plant Sci.* 2014. Vol. 19. № 12. P. 779–789. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.tplants. 2014.08.005

<sup>7</sup> Paez-Garcia A., Motes C. M., Scheible W. R., Chen R., Blancaflor E. B., Monteros M. J. Root Traits and Phenotyping Strategies for Plant Improvement. *Plants (Basel)*. 2015. № 15/4 (2). 334–55. DOI: 10.3390/plants4020334.

<sup>8</sup> Uga Y., Sugimoto K., Ogawa S., Rane J., Ishitani M., Hara N., Kitomi Y., Inukai Y., Ono K., Kanno N., et al. Control of root system architecture by Deeper rooting increases rice yield under drought conditions. *Nat. Genet.* 2013. № 45. P. 1097–1102. DOI: 10.1038/ng.2725.

<sup>9</sup> Comas L. H., Becker S. R., Cruz V. M. V., Byrne P. F. & Dierig D. A. Root traits contributing to plant productivity under drought. *Front. Plant Sci.* 2013 Vol. 4. P. 442. DOI: doi.org/10.3389/fpls.2013.00442.

## 1. Морфологічна структура кореневої системи популяцій люцерни

Наші дослідження показали, що види, сорти люцерни розрізняються за формою кореневої системи, здатністю накопичувати різну кількість кореневої маси, азотфіксуючим потенціалом. Форма кореневої системи – одна із визначальних ознак накопичення кореневої маси. У процесі селекційно-генетичної роботи нами встановлена неоднорідність популяцій за формою кореневої системи. Проявлялись дві форми: стрижнева та стрижнево-розгалужена. Серед вивчених номерів переважала стрижнево-розгалужена коренева система. Її частка була різною та коливалась у межах 59–66 %. Слід відмітити, що біотипи із стрижнево-розгалуженою формою мають переважно більшу кореневу масу, ніж біотипи із стрижневою формою. Ця різниця становила від 7,7 до 260 %, залежно від генотипу і ступеня виявлення обох форм. Проте стрижнево-розгалужена форма кореневої системи, як єдине поняття, не виключає своїх особливостей за кількістю бокових коренів, їх товщиною, тобто за потужністю кореневої системи.

В процесі роботи було встановлено, що сорти, популяції люцерни формували різну загальну кількість бокових розгалужень першого порядку, та вона коливалась від 19,9 шт./роsl. у сорту Надєжда до 29,24; 30,33 шт./роsl. – відповідно сортів Луїза та Унітро. Трохи менше (28,1 шт./роsl.) цей показник складав у популяції МО-115. Решта популяцій: РК/98, ПР, НМГ формували на кореневій системі в межах 25 бокових коренів (табл. 1).

Для характеристики кореневої системи люцерни враховували також товщину бокових відгалужень тому, що саме ці показники визначають цінність люцерни – попередника та фізіологічну активність кореня – органу забезпечення водою, поживними речовинами всієї рослини. Але серед вчених немає єдиної думки про чітку диференціацію бічних коренів за їх діаметром. Наприклад В. С. Косинський відносить до дрібних коренів товщиною менше 1,5 мм, вся решта – крупні<sup>10</sup>. А. І. Соколик та ін. ділять бічні коріння на дві фракції: до товстих зараховують коріння, товщі 1 мм, інші – дрібні. Фракція товстих бічних коренів найменша, за загальною кількістю вона становила 0,4–2,0 %<sup>11</sup>. Т. Літвінова ділить корені люцерни на три фракції: більше 1,5 мм – великі; середні – 0,6–1,5 мм; тонкі – до 0,6 мм<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> Tyshchenko O., Tyshchenko A., Piliarska O., Biliaeva I., Kuts H., Lykhovyd P. Morphological Features of Roots and Their Variation in Alfalfa Genotypes. *Technology Reports of Kansai University*. 2020. July, Vol. 62, Is. 06. P. 2957–2964.

<sup>11</sup> Тищенко О. Д., Тищенко А. В., Куц Г. М., Пілярська О. О. Про кореневу систему люцерни. *Зрошуване землеробство* : міжвідомчий тематичний науковий збірник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2018. № 70. С. 88–94.

<sup>12</sup> Тищенко О. Д., Тищенко А. В., Куц Г. М. Характеристика вихідного матеріалу люцерни. *Вісник Львівського Національного аграрного ун-ту Агронімія*. 2018. № 22 (1). С. 33–39.

Таблиця 1  
**Морфологічна структура кореневої системи популяцій люцерни (середнє за 2015–2018 рр.)**

Назва популяції, сорту	Загальна кількість бокових коренів, $\bar{x} \pm S_x$	Фракція бокових коренів першого порядку					
		тонкі – до 1 мм		середні – 1–3 мм		товсті > 3 мм	
		%	$\bar{x} \pm S_x$	%	$\bar{x} \pm S_x$	%	$\bar{x} \pm S_x$
Луїза	29,24 ± 1,07	84,9	24,88 ± 1,09	14,0	4,03 ± 0,35	1,1	0,33 ± 0,09
RK/98	25,00 ± 1,01	84,9	21,30 ± 0,87	13,7	3,40 ± 0,20	1,4	0,35 ± 0,07
ПР-04	25,14 ± 0,99	83,0	21,90 ± 1,47	15,3	2,80 ± 0,32	1,7	0,44 ± 0,10
Унітро	30,33 ± 1,08	82,7	25,09 ± 0,97	15,3	4,62 ± 0,37	2,0	0,62 ± 0,12
Серафіма	26,23 ± 1,19	79,9	21,12 ± 1,27	16,1	4,10 ± 0,30	4,0	1,01 ± 0,20
HMG	25,07 ± 1,12	79,9	20,44 ± 1,15	17,2	3,96 ± 0,31	2,9	0,67 ± 0,18
МО-115	28,10 ± 1,10	78,8	22,30 ± 1,24	18,4	5,04 ± 0,48	2,8	0,76 ± 0,17
SV	21,62 ± 0,92	77,8	16,77 ± 0,90	18,8	4,10 ± 0,26	3,4	0,75 ± 0,13
Надежда	19,90 ± 0,90	86,4	17,2 ± 0,89	10,1	2,01 ± 0,20	3,5	0,69 ± 0,019

Дослідження виявили, що діаметр бокових коренів першого порядку коливається в широких межах – від одного до трьох та більше міліметрів. Тому ми розділили їх на тонкі – до 1,0 мм, середні – 1,1–3,0 мм і товсті – більше 3-х мм. Така градація дозволила нам візуально класифікувати бокові корені за діаметром на 3 фракції. Фракція тонких – у загальній кількості – найчисельніша, залежно від генотипу вона складає 77,8–86,4 %. Фракція середніх коренів набагато поступалась фракції тонких і складала 10,1–18,8 %. Із всіх фракцій, фракція товстих коренів найменш чисельна в загальній кількості бокових розгалужень, становила 1,1–4,0 % (табл. 1). Таке ж співвідношення фракцій бічних коренів відзначали у нуту, більшу частину (67,7 %) становили дрібні, діаметром від 0,45 до 0,9 мм і лише 2,5 % коренів з діаметром вище 1,5 мм (товсті). Тонкі коріння є основним компонентом кореневих систем і найбільш активною частиною кореневої системи для забезпечення рослин водою і поживними речовинами<sup>1</sup>.

Саме за рахунок поширення бічних дрібних коренів, у горизонтальному напрямку, формується велика площа коренів, збільшується поглинальна здатність кореневої системи, що сприятливо позначається на продуктивності рослин<sup>2</sup>. Крім того, в умовах водного дефіциту, якщо архітектоніка кореневої системи представлена більшим числом кінчиків і розгалужень, а також максимальним розвитком у довжину головних коренів меншого діаметра, вона здатна підтримувати позитивний водний статус синтетичних ліній ярої пшениці<sup>3</sup>.

Визначення взаємозв'язків ознак кореневої системи з ознаками надземної частини, таких як висота рослини, суха вага пагонів, розмір насіння та інших, які можна легко відібрати, дозволять разом з тим використовувати ознаки коренів для підвищення врожаю в оптимальних та стресових умовах<sup>4</sup>. Тому, для з'ясування взаємозв'язку між накопиченням повітряно-сухої кореневої маси ( $x$ ) і висотою рослин ( $y$ ) та кількістю стебел ( $z$ ), були обраховані коефіцієнти множинної кореляції. Статистичний аналіз даних показав, що існує високо-достовірний зв'язок – від середнього до високого,  $R_{x.yz} = 0,686–0,919$ . У формування надземної і кореневої маси робить свій внесок і кількість

---

<sup>1</sup> Pierret A., Moran C. J., Doussan C. Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. *New Phytol.* 2005. № 166. P. 967–980. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01389.x

<sup>2</sup> Ehdaie B., Layne A. P. & Waines J. G. Root system plasticity to drought influence grain in bread wheat. *Euphytica.* 2012. № 186 (1). P. 219–232. DOI: 10.1007/s10681-011-0585-9

<sup>3</sup> Crespi M., Frugier F. De novo organ formation from differentiated cells: root nodule organogenesis. *Sci Signal.* 2008. № 1 (49) P. re11. DOI: 10.1126/scisignal.149re11

<sup>4</sup> Harrison G. F., Sruthi N. Characterization of a soybean (*Glycine max* L. Merr.) germplasm collection for root traits. *PLOS ONE*, 2018, 1/19. doi.org/10.1371/journal.pone.0200463

бічних відгалужень кореневої системи. Цей зв'язок досягав від середніх до високих значень –  $R_{y.xz} = 0,480-0,949$ .

Подібну ж закономірність відзначають Д. Ф. С. Ламб та ін., які спостерігають, що генотипи люцерни з більш високим числом бічних коренів мали вищий загальний урожай. Кількість бічних коренів враховують у селекційних програмах з іншими сільськогосподарськими культурами. Так, наприклад, найбільший вплив на врожайність гороху та елементи його продуктивності надають число бічних коренів і щільність бічних коренів. У баклажанів, для отримання якісної розсади, на проростках враховують кількість бічних коренів, які використовують як критерій відбору.

Слід зазначити, що за кількістю бічних коренів, їх товщиною не можливо зробити висновок про потужність кореневої системи. Ми вважаємо, що про розвиток кореневої системи можна судити за її об'ємом. Об'єм кореня – ознака інтегральна, що включає потужність кореневої системи, кількість бокових відгалужень, їх товщину, наявність кореневих волосків. Середні показники ознаки об'єму кореневої системи свідчать про значне її варіювання ( $V = 41,6-73,4\%$ ) у популяції люцерни (табл. 2).

Таблиця 2

**Об'єм кореневої системи у різних популяцій люцерни  
(у середньому за 2015–2018 рр.)**

Назва сорту, гібридної популяції	Об'єм кореневої системи, $x \pm sx$ , мл	Lim, мл	Варіювання, V, %
Луїза	5,00±0,58	1,41–8,78	56,0
Зоряна	7,00±0,72	2,16–16,45	70,7
МО – 115	7,00±0,68	2,63–16,47	67,7
Серафіма	6,90±0,65	2,19–8,70	54,9
HMG	6,80±0,47	1,41–8,78	56,0
ПР- 04	6,65±0,47	1,41–15,53	73,3
SV	6,58±0,49	2,52–15,08	73,4
Унітро	5,69 ±0,48	1,62–6,82	54,0
RK/98	5,20±0,32	1,26–7,65	53,8
Наdejда	2,75±0,20	1,53–4,15	41,6
Середньопопуляційна	6,09±0,31	1,68–10,60	–

Відмічається внутрішньо популяційний поліморфізм об'єму кореневої системи у сорту Зоряна, популяції ПР-04, SV з варіюванням цієї ознаки від 1,41 до 16,47 мл та високим значенням середньої (6,65–7,00 мл). Меншим варіюванням (1,26–8,78 мл) ознаки характеризувались сорти Унітро, Серафіма та популяції RK/98, HMG.

Мінімальним об'ємом (2,75 мл) та незначним коливанням (1,53–4,15 мл) характеризувався сорт Надежда.

Дослідження корелятивних залежностей дозволяє визначати ознаки, що можуть бути факторіальними та слугувати критеріями добору за продуктивністю. Вираховані кореляційні зв'язки показали, що з об'ємом кореневої системи тісно пов'язані основні господарсько-цінні ознаки, насамперед урожайність зеленої і кореневої маси (табл. 3).

Таблиця 3

**Коефіцієнти кореляції між об'ємом кореневої системи і основними господарсько-цінними ознаками (середнє 2015–2018 рр.)**

Сорт, гібридна популяція	Ознаки			
	висота рослини	кількість стебел	маса	
			надземна	коренева
Луїза	0,49 ± 0,16	0,45 ± 0,17	0,79 ± 0,12	0,92 ± 0,07
Зоряна	0,53 ± 0,16	0,50 ± 0,16	0,75 ± 0,13	0,94 ± 0,06
SV	0,41 ± 0,17	0,52 ± 0,16	0,81 ± 0,11	0,92 ± 0,07
RK/98	0,61 ± 0,15	0,46 ± 0,17	0,46 ± 0,17	0,77 ± 0,12
Серафіма	0,67 ± 0,14	0,50 ± 0,16	0,73 ± 0,13	0,94 ± 0,06
HMG	0,51 ± 0,16	0,41 ± 0,17	0,78 ± 0,12	0,92 ± 0,07
Унітро	0,68 ± 0,14	0,23 ± 0,18*	0,88 ± 0,09	0,92 ± 0,07
МО – 115	0,64 ± 0,15	0,32 ± 0,18*	0,69 ± 0,14	0,91 ± 0,08
ПР-04	0,70 ± 0,13	0,51 ± 0,16	0,86 ± 0,10	0,94 ± 0,06
Надежда	0,58 ± 0,15	0,26 ± 0,18*	0,54 ± 0,16	0,44 ± 0,17

**Примітка:** \* – не істотна, при  $r \geq 0,36$  істотна на 0,05 % рівні значимості

Дані таблиці свідчать про сильний позитивний зв'язок об'єму кореневої системи з урожаєм зеленої ( $r = 0,73$ – $0,88$ ) і кореневої маси ( $r = 0,77$ – $0,94$ ). І тільки в окремих популяції RK/98 і сорту Надежда відзначалася середня величина ( $r = 0,46$ ;  $r = 0,54$ ) зв'язку між цими ознаками. Це знаходить підтвердження у дослідженнях С. А. Омара та ін. За їх даними великий розмір кореня та характер його поширення пов'язані зі збільшенням врожайності кормової маси й її якостю. Отже вибір найбільшого кореня слід враховувати в селекційних програмах з люцерною для підвищення її врожайності. У рису також виявили позитивну кореляцію врожайності зерна з сухою масою коренів, їх довжиною та діаметром.

Проведений подальший аналіз свідчить про те, що сполученість об'єму кореневої системи з іншими ознаками: висотою рослин і кількістю стебел має середньої сили зв'язок, відповідно:  $r = 0,41$ – $0,68$ ;  $r = 0,41$ – $0,52$ , за винятком сортів Унітро, Надежда та популяції МО-115, у яких сила зв'язку між об'ємом кореневої системи та кількістю стебел

слабка ( $r = 0,23-0,32$ ) і вона є несуттєвою. Проте Р. Скуодієне та ін., навпаки, говорять про сильну лінійну кореляцію ( $r = 0,848$ ) між масою коренів та пагонами люцери і ця залежність виражається рівнянням регресії:  $y = 116,287 + 0,608x$ . За даними авторів 79% варіації біомаси пагонів залежить від маси кореня<sup>5</sup>. У інших сільськогосподарських культур також встановлюють зв'язок між кореневою системою і надземною масою, наприклад, у ярї пшениці виявлена позитивна, вище середнього значення, сполученість висоти рослин з довжиною коренів  $r = 0,56-0,66$ ; площею і об'ємом коренів, числом кінчиків і розгалуженням коренів  $r = 0,64-0,68$  і тому висота рослин може слугувати маркерною ознакою при відборі рослин з добрими показниками кореневої системи, а отже й більш посухостійких<sup>6</sup>. У той же час, відсутність кореляції між висотою рослини і загальною довжиною кореня та негативні кореляції висоти рослини із загальною площею поверхні кореня і загальним об'ємом кореня ще не говорять про те, що відбір рослин з меншою висотою призведе до зменшення у них кореневої системи. Автори припускають, що негативні кореляції висоти рослин із загальною площею поверхні кореня та загальним об'ємом кореня можуть бути пов'язані з тим, що асиміляти, які не використовуються для збільшення висоти рослини, могли бути спрямовані в кореневу систему, щоб збільшити її площу та об'єм. Тим більше селекціонери зазвичай припускають, що прямий відбір по врожайності буде побічно вибирати сорти з оптимальною кореневою системою для отримання найвищих врожаїв.

## 2. Селекційне значення діаметра головного кореня

Проведений нами аналіз кореляційної структури кількісних ознак люцери дав можливість знайти морфологічну ознаку, яка показує тісну залежність між продуктивністю надземної та підземної частини рослини і вона може бути використана як непрямий критерій добору за кореневою системою, ця ознака є «діаметр головного кореня». Дослідження показали, що діаметр головного кореня знаходиться в зв'язку з об'ємом кореневої маси, продуктивністю надземної і кореневої маси, висотою рослини, кількістю бокових відгалужень кореня (табл. 4).

---

<sup>5</sup> Skuodienė R. & Tomchuk D. Root mass and root to shoot ratio of different perennial forage plants under western Lithuania climatic conditions. *Romanian agricultural research*. 2015. № 32. P. 209–219. DII 2067-5720 RAR 2015-125.

<sup>6</sup> Вожегова Р. А., Тищенко О. Д., Тищенко А. В. Характеристика симбіотичних ознак у генотипів люцери (*Medicago L.*) та їх мінливість. *Сортовивчення та охорона прав*. 2018. Т. 14. № 1. С. 45–51.



Таблиця 4

**Коефіцієнти кореляції між діаметром головного кореня та іншими ознаками (в середньому за 2015–2018 рр.)**

Назва сорту, популяції	Коефіцієнти кореляції $r \pm s_r, z$				
	об'ємом кореневої системи	висотою рослини	загальною кількістю бокових відгалужень	повітряно-сухої масою	
				надземною	кореневою
Луїза	0,78 ± 0,11	0,57 ± 0,14	0,32 ± 0,16	0,79 ± 0,10	0,81 ± 0,10
РК/98	0,80 ± 0,10	0,55 ± 0,15	0,22 ± 0,16	0,75 ± 0,11	0,80 ± 0,10
ПР-04	0,78 ± 0,11	0,60 ± 0,14	0,33 ± 0,16	0,82 ± 0,10	0,85 ± 0,09
Унітро	0,84 ± 0,09	0,64 ± 0,13	0,39 ± 0,16	0,84 ± 0,09	0,78 ± 0,11
Серафіма	0,82 ± 0,10	0,70 ± 0,12	0,28 ± 0,17	0,85 ± 0,07	0,80 ± 0,10
НMG	0,85 ± 0,09	0,55 ± 0,14	0,30 ± 0,17	0,75 ± 0,09	0,79 ± 0,11
МО-115	0,73 ± 0,12	0,48 ± 0,15	0,20 ± 0,17	0,71 ± 0,12	0,65 ± 0,13
SV	0,84 ± 0,09	0,51 ± 0,15	0,45 ± 0,16	0,80 ± 0,10	0,80 ± 0,10
Наджда	0,70 ± 0,12	0,50 ± 0,15	0,38 ± 0,16	0,82 ± 0,10	0,70 ± 0,12

**Примітка:** при  $r \geq 0,39$  зв'язок істотний за 5 % рівня значущості

Сильний зв'язок відмічали між діаметром кореня і об'ємом кореневої системи ( $r = 0,70-0,85$ ), продуктивністю надземної маси ( $r = 0,71-0,85$ ) та кореневої ( $r = 0,65-0,85$ ). Висота рослин люцерни істотно, в багатьох випадках, залежить від діаметру кореня ( $r = 0,48-0,70$ ). Залежність загальної кількості бокових відгалужень від діаметра частіше відсутня, та інколи вона істотна ( $r = 0,20-0,48$ ). Але, дослідниками К. Хаклом та ін., навпаки, встановлена значна кореляція діаметра кореня з кількістю бічних коренів, їх діаметром, інтенсивністю розгалуження кореня. Вони розглядають діаметр кореня як найбільш важливу ознаку, що визначає розвиток морфології кореня люцерни. Автори також відмічають позитивний зв'язок діаметра кореня з вагою кореня на квадратному метрі та щільністю травостою<sup>7,8</sup>. На дуже тісний зв'язок ( $r = 0,99$ ) діаметра кореня люцерни з врожайністю зеленої маси, виходом сухої речовини і показниками якості корму: вмістом сирого білка і золи

<sup>7</sup> Haki J., Písařík M., Hřevušová Z., Šantrůček J. In-field lucerne root morphology traits over time in relation to forage yield, plant density, and root disease under two cutting managements. *Field Crops Research*. 2017. 213. P. 109–117. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.017>.

<sup>8</sup> Haki K., Mášková J. & Šantrůček Z. Hřevušová. development of root morphology traits of the czech lucerne varieties in chernozem over a three year period. *acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis*. *Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun.* 2012. Vol. LX. № 3. S. 25–34.

вказують Б. Р. Бекет та ін.<sup>9</sup>. Найбільш важливою морфологічною ознакою для збільшення врожайності рису є діаметр кореня, який позитивно корелює з компонентами врожайності.

При вивченні морфологічної структури кореневої системи нами встановлено, що діаметр головного кореня, залежно від генотипу, в абсолютному вираженні, знаходиться в межах 5,10–7,80 мм, при амплітуді коливання коефіцієнту варіювання  $V = 26,4\text{--}31,4\%$  (табл. 5.). Це дає можливість передбачити ефективний добір за цією ознакою. За рівнем його показників можна судити про ступінь розвитку кореня, як органу, який забезпечує весь рослинний організм необхідними поживними речовинами, водою; де відбувається синтез різних сполук, а також орган відкладення запасних речовин, необхідних для наступного росту і розвитку рослин.

Таблиця 5

**Діаметр головного кореня у різних популяцій люцерни  
(в середньому за 2015–2018 рр.)**

Назва сорту, гібридної популяції	Діаметр головного кореня, $\bar{x} \pm s_x$ , мм	Варіювання, V, %
Луїза	5,90 ± 0,22	31,0
Зоряна	6,43 ± 0,24	31,4
МО – 115	7,04 ± 0,25	29,5
Серафіма	5,10 ± 0,16	28,0
НМГ	7,00 ± 0,26	29,5
ПР-04	7,80 ± 0,22	30,2
SV	6,44 ± 0,24	30,0
Унітро	6,09 ± 0,23	30,9
RK/98	5,70 ± 0,17	27,0
Наdejда	5,65 ± 0,21	26,4

Це знаходить підтвердження у дослідженнях Б. Р. Бекета та ін. За їх даними діапазон діаметра кореня у люцерни коливається в широких межах, від 6,67 до 9,67 мм. Як свідчать результати їх досліджень, після одного циклу добору по діаметру кореня його збільшення досягло 21,24% від базової популяції. Тому прямий відбір ефективний для поліпшення цієї ознаки й інших господарсько-цінних ознак. Наприклад, після другого циклу відборів збільшується продуктивність надземної маси на 9,77%. Тому вони вважають цю ознаку кількісною характеристикою, яку необхідно враховувати при розробці стратегії

<sup>9</sup> Bakheit B. R., Ali M. A. & Helmy A. A. Effect of Selection for Crown Diameter on Forage Yield and Quality Components in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Asian Journal of Crop Science*. 2011. Vol. 3 (2). P. 68–76. DOI: 10.3923/ajcs.2011.68.76.

селекції нового сорту люцерни. Такої ж думки дотримуються й інші дослідники, які вважають, що для поліпшення продуктивності надземної маси є непрямий відбір по діаметру кореня<sup>10</sup>.

Аналіз наукової літератури та наші дослідження діаметра головного кореня дозволяють вважати цю ознаку однією із визначаючих у селекційній роботі на підвищення продуктивності надземної та кореневої маси. Відповідно, необхідно дослідити ефективність добору за діаметром головного кореня. Така інформація дозволить прогнозувати результати стосовно продуктивності загалом, а також бути важливим орієнтиром для розробки правильної стратегії селекційно-генетичних досліджень у цьому напрямі. Також необхідно установити критерій добору, який ми визначили, виходячи із значення середньопопуляційної. Діаметр кореня, рівний 6,0 мм, був прийнятий за критерій добору. У якій мірі ефективний добір за селективною ознакою, можна судити з рисунку 1.

Слід відмітити, що реакція на добір за діаметром головного кореня та його кратність була неоднозначною. Так, у сортів Луїза, Серафіма та популяції ПР-04, РК/98 добір був ефективним в обох циклах і привів до зміни діаметру кореня, відповідно з 5,8; 5,9; 6,4 мм у вихідних форм – до 6,7; 6,9; 6,4 мм у доборів. Одночасно відбулись зміни у структурі популяції за відносним вмістом рослин із діаметром кореня  $\geq 6,0$  мм. У сортів частота зустрічності таких рослин збільшилась із 60,0 (вихідна форма) до 86,7 % у доборів. У популяції ПР-04 вже після першого циклу вона складала 80,0 % проти 47,0 % у вихідної форми. Аналогічні зміни спостерігались у популяції РК/98.

У сорту Унітро добір виявився ефективним тільки після другого циклу, популяції МО-115 відзначено збільшення діаметру з 6,1 мм (вихідна) до 6,5 мм – після першого циклу, в другому – зменшився до рівня вихідної – 6,1. У сорту Зоряна реакції на добір не спостерігалось. Абсолютне значення цієї ознаки та частота зустрічності рослин з її рівнем  $\geq 6,0$  мм не змінювалась.

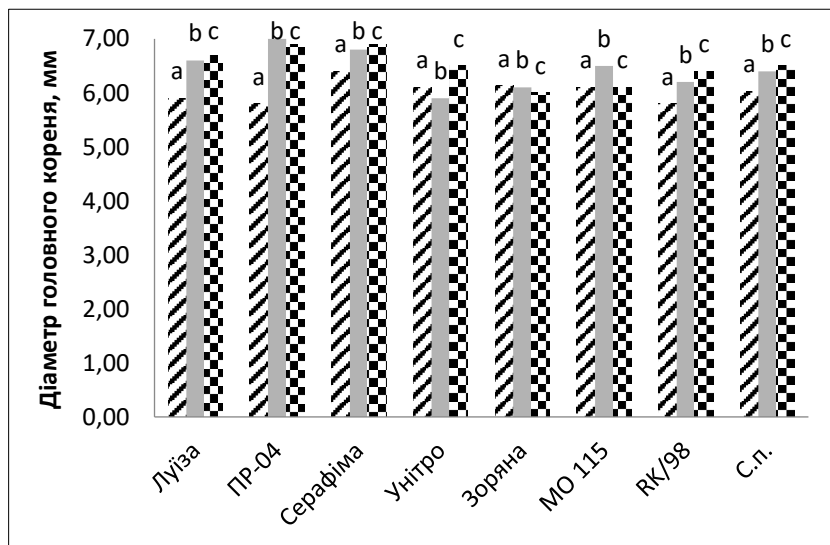
Крім того, у доборів за діаметром головного кореня у більшості генотипів підвищуються показники продуктивності надземної та кореневої маси чи одного з них (табл. 6).

Дані таблиці свідчать, що у сортів Луїза, Серафіма та популяції ПР-04 рослини з діаметром 5,8–6,4 мм формували повітряно-суху надземну масу 3,92–4,40 г, кореневу – 2,87–3,35 г. При збільшенні діаметра до 6,7–6,9 мм, після другого циклу доборів, підвищується продуктивність надземної маси до 4,75–6,37 г, кореневої – до 4,71–5,26 г. Така ж закономірність спостерігається і щодо середньопопуляційних показ-

---

<sup>10</sup> Awad I. M. H. Selection response in berseem (*Trifolium alexandrinum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.). Ph.D. Thesis, Faculty of Agric., Assiut Univ., Egypt. 2001.

ників. По-іншому ведуть себе сорт Зоряна та популяція МО-115. При стабільному прояві ознаки «діаметр головного кореня» збільшується його повітряно-суха надземна та коренева маса.



**Рис. 1. Ефективність добору за ознакою діаметру головного кореня (2016–2018 рр.)**

**Примітка:** а – вихідна форма, b – перший цикл добору, c – другий цикл добору, С.п. – середньопопуляційна.

Таблиця 6

**Характеристика популяцій люцерни за господарсько-цінними ознаками (2016–2018 рр.)**

Назва сорту, популяції	Цикл добору	Ознаки		
		діаметр головного кореня, мм	вага повітряно-сухої маси, г	
			надземної	кореневої
1	2	3	4	5
Луїза	Вихідна	5,90±0,22	4,19±0,34	3,35±0,24
	Д <sub>1</sub>	6,6±0,26 <sup>xxx</sup>	4,15±0,33	3,70±0,24
	Д <sub>2</sub>	6,7±0,17 <sup>xxx</sup>	5,71±0,50 <sup>x</sup>	4,73±0,30 <sup>xxx</sup>
PR- 04	Вихідна	5,80±0,19	4,40±0,58	2,87±0,26
	Д <sub>1</sub>	7,0±0,19 <sup>xxx</sup>	6,43±0,51 <sup>xxx</sup>	4,77±0,33 <sup>xxx</sup>
	Д <sub>2</sub>	6,9±0,20	6,37±0,46 <sup>xxx</sup>	5,26±0,32 <sup>xx</sup>

1	2	3	4	5
Серафіма	Вихідна	6,40±0,22	3,92±0,30	3,21±0,24
	Д <sub>1</sub>	6,8±0,16 <sup>xxx</sup>	4,56±0,25 <sup>x</sup>	4,24±0,28 <sup>xxx</sup>
	Д <sub>2</sub>	6,9±0,22 <sup>xxx</sup>	4,75±0,36 <sup>x</sup>	4,71±0,33 <sup>xxx</sup>
Зоряна	Вихідна	6,13±0,24	4,08±0,37	3,04±0,22
	Д <sub>1</sub>	6,1±0,18	4,15±0,33	3,70±0,24 <sup>xx</sup>
	Д <sub>2</sub>	6,0±0,17	4,53±0,33	3,63±0,20 <sup>xx</sup>
МО-115	Вихідна	6,10±0,16	4,01±0,26	3,24±0,17
	Д <sub>1</sub>	6,5±0,17	4,70±0,25 <sup>x</sup>	4,46±0,30 <sup>xxx</sup>
	Д <sub>2</sub>	6,1±0,19	4,52±0,32	4,40±0,34 <sup>xx</sup>
RK/98	Вихідна	5,80±0,20	3,58±0,35	3,34±0,31
	Д <sub>1</sub>	6,2±0,18	4,33±0,32 <sup>x</sup>	4,23±0,23 <sup>xxx</sup>
	Д <sub>2</sub>	6,4±0,18	4,56±0,29 <sup>xx</sup>	3,67±0,24
Середньо-популяційна	Вихідна	6,03±0,20	4,01±0,11	3,17±0,06
	Д <sub>1</sub>	6,4±0,15 <sup>x</sup>	4,57±0,33	4,01±0,22 <sup>xxx</sup>
	Д <sub>2</sub>	6,5±0,14 <sup>xx</sup>	4,96±0,29 <sup>xx</sup>	4,32±0,24 <sup>xxx</sup>

**Примітка:** істотний на рівні значущості: x – 5 %; xx – 1 %; xxx – 0,1 %.

### 3. Вплив інокуляції та рістрегулюючих препаратів на накопичення кореневої маси люцерни

Вивчення росту і розвитку кореневої системи сільськогосподарських культур при різних факторах їх вирощування сприяє вирішенню важливого завдання в рослинництві – регулювання процесів життєдіяльності рослин. Глибока і потужна коренева система є запорукою високої врожайності для різних культур<sup>11, 12</sup>. Особливо це стосується культури люцерни, яка є добрим попередником, накопичує велику кількість коренів у ґрунті та покращує його меліоративний стан.

Розвиток кореневої системи залежить від багатьох факторів. Основним фактором, що впливає на утворення кореневої системи люцерни, як і всіх сільськогосподарських культур, є ступінь забезпеченості ґрунту поживними речовинами. Важливими факторами, що впливають на розвиток кореневої системи, є вологозабезпеченість та поживний склад ґрунту. Низька доступність поживних речовин або

<sup>11</sup> Kell, D. B. Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. *Ann. Bot.-London*. 2011. № 108. P. 407–418. DOI: 10.1093/aob/mcr175.

<sup>12</sup> Smith S. & De Smet I. Root system architecture: insights from Arabidopsis and cereal crops Introduction. *Philos. T R Soc. B*. 2012. № 367. P. 1441–1452.

вологи зменшує або зупиняє поділ і подовження клітин, що призведе до зупинки росту первинних коренів<sup>13, 14</sup>.

Коріння рослин живуть у тісному зв'язку з великою кількістю видів бактерій і грибів у ризосфері<sup>15</sup>. Деякі з цих видів можуть впливати на ріст та розвиток коренів, виробляючи речовини, що регулюють ріст рослин, включаючи етилен, ауксини і цитокініни. Ауксин і етилен регулюють процеси, що змінюють архітектуру кореневої системи, включаючи подовження первинного кореня<sup>16</sup>, а також утворення і подовження кореневих волосків<sup>17</sup>.

Вплив бактеріальних препаратів на морфогенез коренів включає надлишкове утворення кореневих волосків і бічних коренів, що збільшує площу поверхні та зазвичай це пов'язане з підвищеною здатністю рослин реагувати на складні умови навколишнього середовища<sup>18</sup>. Крім того, кореневі структури, такі як кластерні коріння, азотфіксуючі бульбочки<sup>19, 20</sup> і мікоризи<sup>21</sup> сприяють поліпшенню вологозабезпечення, переводу недоступних форм поживних речовин у доступні та поглинання їх кореневою системою рослин. Стимулювання росту

---

<sup>13</sup> López-Bucio J., Hernández-Abreu E., Sánchez-Calderón L., Nieto-Jacobo M. F., Simpson J. & Herrera-Estrella L. Phosphate availability alters architecture and causes changes in hormone sensitivity in the Arabidopsis root system. *Plant Physiol.* 2002. 129. P. 244–256.

<sup>14</sup> Sánchez-Calderón L., López-Bucio J., Chacón-López A., Cruz-Ramírez A., Nieto-Jacobo M. F., Dubrovsky J. G., Herrera-Estrella L. Phosphate starvation induces a determinate developmental program in the roots of Arabidopsis thaliana. *Plant Cell Physiol.* 2005. № 46. P. 174–184.

<sup>15</sup> Berg G., Smalla K. Plant species and soil type cooperatively shape the structure and function of microbial communities in the rhizosphere. *FEMS Microbiol Ecol.* 2009. № 68 (1). P. 1–13. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2009.00654.x

<sup>16</sup> Alonso J. M., Stepanova A. N., Solano R., Wisman E., Ferrari S., Ausubel F. M., & Ecker J. R. Five components of the ethylene-response pathway identified in a screen for weak ethylene-insensitive mutants in Arabidopsis. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2003. № 100. P. 2992–2997.

<sup>17</sup> Vozhehova R., Tyshchenko A., Tyshchenko O., Piliarska O., Konovalova V., Sharii V., Fundirat K. Economic feasibility of application of bacterial and fungal drugs on seed-used alfalfa. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development.* 2022. Vol. 22, Issue 4. P. 827–834. PRINT ISSN 2284-7995

<sup>18</sup> Lynch J. P. & Ho M. D. Rhizoeconomics: Carbon costs of phos-phorus acquisition. *Plant Soil.* 2005. 269. P. 45–56.

<sup>19</sup> Glick B. R. Phytoremediation: Synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnol. Adv.* 2003. 21. P. 383–393. DOI: 10.1016/S0734-9750(03)00055-7

<sup>20</sup> Oldroyd G. E., Downie J. A. Coordinating nodule morphogenesis with rhizobial infection in legumes. *Annu Rev Plant Biol.* 2008. № 59. P. 519–546. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092839

<sup>21</sup> Bonfante P., Requena N. Dating in the dark: how roots respond to fungal signals to establish arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Curr Opin Plant Biol.* 2011. № 14 (4). P. 451–457. DOI: 10.1016/j.pbi.2011.03.014

коренів – один з основних маркерів, за якими вимірюється позитивний ефект бактерій, що сприяють росту рослин<sup>22</sup>.

Вміст органічних речовин, макро- і мікроелементів, води, кисню, а також рН, температура, і наявність патогенних мікроорганізмів у ґрунті<sup>23</sup> значно впливають на кількість, фізіологічний та метаболічний стан мікроорганізмів. Мінеральна добрива – один з чинників, що гальмує ефективність ґрунтових мікроорганізмів<sup>24, 25, 26</sup>.

Аналіз отриманих результатів показує, що застосування ціаноризобіальних консорціумів сприяє різкому підвищенню насінневої продуктивності, накопиченню кореневої маси та поліпшенню азотфіксуючої активності, порівняно як з контролем, так і моноінокуляцією. Деякі автори вказують на стимуляцію росту, розвитку, підвищення врожайності рослин та посилення ефекту нітрагінізації бобових рослин під впливом штучних консорціумів ціанобактерій і різних видів *Rhizobium*<sup>27</sup>.

Ефективна взаємодія між усіма партнерами симбіозу забезпечує активізацію ряду метаболічних процесів, перш за все, фіксацію атмосферного азоту, також підсилює різогенний ефект<sup>28</sup>. Наші дослідження показали, що разом зі збільшенням врожайності насіння відбуваються й зміни параметрів накопичення повітряно-сухої кореневої маси та азотфіксації. Накопичення сухої маси коренів по варіантах досліджує має також істотні коливання залежно від застосування бактеріальних препаратів. Найбільша маса спостерігалася у сортів Зоряна й Унітро при застосуванні ціанобактеріального препарату (ЦБП) 5,76 та 5,80 т/га,

---

<sup>22</sup> Коць С. Я., Воробей Н. А., Кириченко О. В., Мельникова Н. М., Михалків Л. М., Пухтаєвич П. П. Мікробіологічні препарати для сільського господарства. Київ: ТОВ-Видавництво ЛОГОС, 2016. 48 с.

<sup>23</sup> Ciccanti B., Grego S. Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology*, 2000.72, 9.

<sup>24</sup> Hufnagel B., de Sousa S. M., Assis L., Guimaraes C. T., Leiser W., Azevedo G. C., Negri B., Larson B. G., Shaff J. E., Pastina M. M., et al. Duplicate and conquer: Multiple homologs of phosphorus-starvation tolerance enhance phosphorus acquisition and sorghum performance on low-phosphorus soils. *Plant Physiol.* 2014. № 166. P. 659–677. DOI: 10.1104/pp.114.243949.

<sup>25</sup> Mijangos I., Pérez R., Albitu I., Garbisu C. Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme and Microbiology Technology*. 2006. № 40. P. 100.

<sup>26</sup> Saikia P., Bhattacharya S. S., Baruah K. K. Organic substitution in fertilizer schedule: Impacts on soil health, photosynthetic efficiency, yield and assimilation in wheat grown in alluvial soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2015. № 203. P. 102–109. DOI: 10.1016/j.agee.2015.02.003

<sup>27</sup> Пацко О. В., Воробей Н. А., Коць С. Я., Паршикова Т. В. Дослідження ефективності агроконсорціумів азотфіксувальних мікроорганізмів. *Физиол. биохим. культ. раст.* 2010. Т. 42. № 2. С. 137–145.31.

<sup>28</sup> Моргун В. В. Роль біологічного азоту в азотному живленні рослин. *Вісн. НАН України*. 2018. № 1. С. 62–74. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2018.01.062>

відповідно, тоді як на контрольних варіантах становила 4,52 й 4,50 т/га (табл. 7).

Таблиця 7

**Накопичення повітряно-сухої кореневої маси та фіксація атмосферного азоту рослинами люцерни другого року залежно від сорту та застосування бактеріальних препаратів (середнє за 2016–2018 рр.)**

Сорт (фактор А)	Застосування бактеріальних препаратів (фактор В)	Накопичення повітряно-сухої кореневої маси, т/га	Фіксація атмосферного азоту, кг/га
Унітро	контроль І (без обробок)	4,50	162
	Ризобіфіт	4,60	193
	КБП (комплекс біопрепаратів)	5,00	205
	ЦБК (ціанобактеріальний консорціум)	5,62	215
	ЦБП (ціанобактеріальний препарат)	5,80	222
	<b>середнє</b>	<b>5,10</b>	<b>200</b>
Зоряна	контроль І (без обробок)	4,52	168
	Ризобіфіт	4,72	194
	КБП (комплекс біопрепаратів)	5,08	213
	ЦБК (ціанобактеріальний консорціум)	5,62	220
	ЦБП (ціанобактеріальний препарат)	5,76	228
	<b>середнє</b>	<b>5,14</b>	<b>205</b>

Оцінка істотності часткових відмінностей

НІР <sub>05</sub>	А	0,228	4,40
НІР <sub>05</sub>	В	0,209	10,35
	Оцінка істотності головних ефектів		
НІР <sub>05</sub>	А	0,114	1,97
НІР <sub>05</sub>	В	0,148	7,32

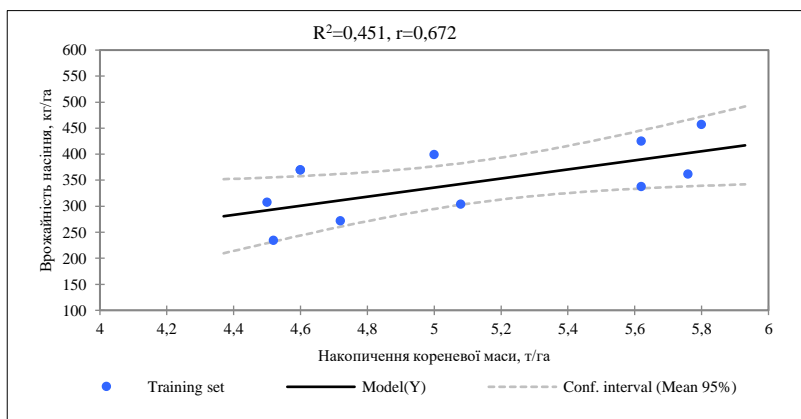
Відзначено збільшення активності процесів азотфіксації при обробці тими ж препаратами ЦБК та ЦБП, але найбільша азотфіксація відмічена при використанні ціанобактеріального препарату (ЦБП), яка склала 222 й 228 кг/га у сортів Унітро і Зоряна, відповідно, при низьких показниках на контрольному варіанті 162 кг/га (Унітро) та 168 кг/га (Зоряна).

Проведений подальший аналіз результатів свідчить про тісний прямий кореляційний зв'язок між врожайністю насіння, накопиченням кореневої маси та азотфіксацією. Це знаходить підтвердження у

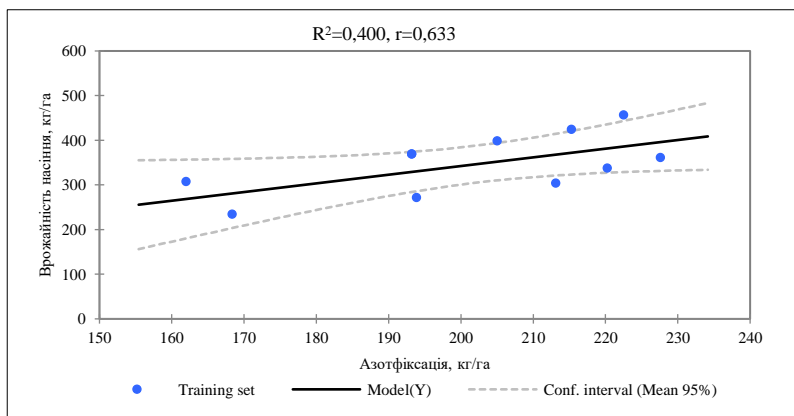


дослідженнях вчених. За їх даними існує позитивна кореляція між врожайністю надземної маси і масою коренів<sup>29</sup>.

Зокрема, коефіцієнт кореляції між врожайністю насіння та накопиченням кореневої маси становив  $r = 0,672$ , тоді як між врожайністю насіння та азотфіксацією –  $r = 0,633$  (рис. 2).



А

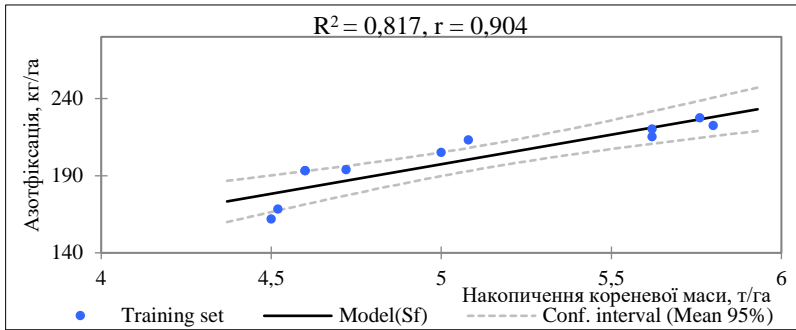


Б

**Рис. 2. Регресія між врожайністю насіння, накопиченням кореневої маси (А) та азотфіксацією (Б)**

<sup>29</sup> Li L., Peng Z., Mao X., Wang J., Chang X., Reynolds M. & Jing R. Genome-wide association study reveals genomic regions controlling root and shoot traits at late growth stages in wheat. *Annals of Botany*. 2019. № 124. P. 993–1006. DOI: 10.1093/aob/mcz041

При збільшенні кореневої маси й азотфіксації підвищується насіннева продуктивність рослин обох сортів люцерни. Але також, чим більш потужна та розвинена коренева система, тим сильнішою є азотфіксуюча здатність рослин, що підтверджує високий коефіцієнт кореляції (рис. 3). Так, за даними кореляційного аналізу між накопиченням кореневої маси і азотфіксацією був встановлений високий зв'язок, що становив  $r = 0,904$ .

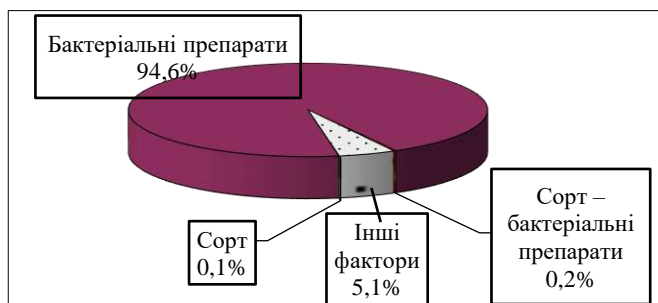


**Рис. 3. Регресія між накопиченням кореневої маси та фіксацією атмосферного азоту**

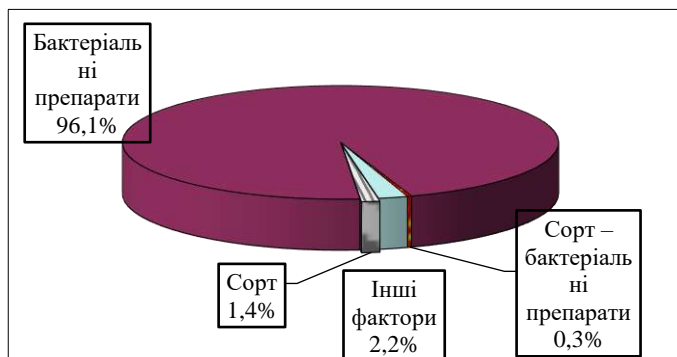
За даними дисперсійного аналізу встановлено, що найбільший вплив на накопичення кореневої маси та азотфіксацію сортів люцерни надавали бактеріальні препарати, частка впливу становила 94,6% та 96,1%, відповідно. Це підтверджує те, що основним фактором формування накопичення кореневої маси та азотфіксації є бактеріальні добрива. Сорт мав вплив на накопичення кореневої маси та азотфіксацію 0,1 та 1,4%, відповідно (рис. 4, 5).

Окрім бактеріальних препаратів, нами було досліджено вплив умов зволоження та регуляторів росту на накопичення кореневої маси сортами люцерни при насінневому використанні. Аналізуючи отримані експериментальні дані, необхідно зазначити, що умови зростання і агроприйоми, що вивчалися, мали істотний вплив на ступінь розвитку кореневої системи. Так, в умовах природного вологозабезпечення, накопичення кореневої маси було в межах 1,55 і 1,61 т/га, краплинне зрошення сприяло збільшенню рівня цієї ознаки до 1,95 і 2,03 т/га у сортів Унітро і Зоряна, відповідно. Препарати Агростимулін, Люцис, Емістим С і Гарт проявляли стимулюючу дію відносно маси кореневої системи. Найбільш позитивний вплив регуляторів росту отримано при краплинному зрошенні. Їх застосування сприяло накопиченню

кореневої маси за роками життя: Агростимуліну – 2,46; 5,36; 6,78 т/га, Люцису – 2,50; 5,61; 7,05, Емістиму С – 2,42; 5,28; 6,72 та Гарту – 2,53; 5,73; і 7,25 т/га у сорту Зоряна. Як видно з наведених даних особливо ефективним виявилось застосування препарату Гарт. Це забезпечило отримання максимального накопичення кореневої маси (табл. 9).



**Рис. 4. Вплив факторів на ознаку «накопичення кореневої маси» сортів люцерни (2016–2018 рр.)**



**Рис. 5. Вплив факторів на ознаку «азотфіксація» сортів люцерни (2016–2018 рр.)**

Подібну ж закономірність відзначають Растогі Р. П., Сінха Р. П., які спостерігають, що застосування регуляторів росту підвищувало до 10 % кількість кореневої маси бобових трав і показники кореневої забезпеченості рослин<sup>30</sup>.

<sup>30</sup> Rastogi R. P., Sinha R. P. Biotechnological and industrial significance of cyanobacterial secondary metabolites. *Biotech. Adv.* 2009. № 27. P. 521–539.

Таблиця 9

**Накопичення повітряно-сухої кореневої маси люцерни по роках життя залежно від зрошення, сорту та застосування регуляторів росту, т/га (середнє за 2012–2015 рр.)**

Умови зволоження (фактор А)	Сорт (фактор В)	Застосування регуляторів росту (фактор С)	Роки життя			
			перший	другий	третій	
Без зрошення	Унітро	контроль 1 (без обробок)	1,55	2,89	3,44	
		контроль 2 (обробка водою)	1,57	2,92	3,46	
		Агростимулін	1,88	3,08	3,57	
		Гарт	2,01	3,26	3,70	
		Люцис	1,99	3,23	3,66	
		Емістим С	1,82	3,05	3,53	
		<b>середнє</b>	1,80	3,07	3,56	
	Зоряна	контроль 1 (без обробок)	1,61	3,04	3,50	
		контроль 2 (обробка водою)	1,62	3,07	3,51	
		Агростимулін	1,96	3,17	3,62	
		Гарт	2,01	3,35	3,76	
		Люцис	1,99	3,31	3,71	
		Емістим С	1,93	3,14	3,56	
		<b>середнє</b>	1,85	3,18	3,61	
	<b>середнє</b>		1,83	3,13	3,59	
	Краплинне зрошення	Унітро	контроль 1 (без обробок)	1,95	4,93	6,42
			контроль 2 (обробка водою)	1,95	4,94	6,44
			Агростимулін	2,33	5,26	6,75
Гарт			2,54	5,52	7,13	
Люцис			2,51	5,47	6,97	
Емістим С			2,27	5,21	6,61	
<b>середнє</b>			2,26	5,22	6,72	
Зоряна		контроль 1 (без обробок)	2,03	5,21	6,55	
		контроль 2 (обробка водою)	2,04	5,22	6,56	
		Агростимулін	2,46	5,36	6,78	
		Гарт	2,53	5,73	7,25	
		Люцис	2,50	5,61	7,05	
		Емістим С	2,42	5,28	6,72	
		<b>середнє</b>	2,33	5,40	6,82	
<b>середнє</b>			2,29	5,31	6,77	

Оцінка істотності часткових відмінностей

НІР <sub>05</sub>	А	0,003	0,20	0,12
НІР <sub>05</sub>	В	0,030	0,41	0,22
НІР <sub>05</sub>	С	0,016	0,08	0,09

Оцінка істотності головних ефектів

НІР <sub>05</sub>	А	0,001	0,06	0,04
НІР <sub>05</sub>	В	0,009	0,13	0,07
НІР <sub>05</sub>	С	0,008	0,04	0,05

Люцерна, завдяки своїй біологічній властивості – азотфіксації, фіксує азот з повітря та є активним накопичувачем азоту в ґрунті зі зростанням цього процесу на другому році життя<sup>31</sup>. Як вважають Прасанна Р. та ін., ефективність симбіозу зростає від 1-го до 3-го року вирощування люцерни<sup>32</sup>. Але рівень його залежить від сорту, а саме від сортових особливостей розташування та розвитку кореневої системи рослин, умов вирощування. Створити сприятливі умови для симбіотичної азотфіксації можливо шляхом впливу на бобово-ризобіальний симбіоз регуляторами росту<sup>33</sup>. Рістстимулюючі речовини активізують мікробіологічні процеси в зоні кореневої системи, істотно впливають на симбіоз, що проявляється в участі цих речовин в інокуляційному процесі, генезисі бульбочок, регуляції активності азотфіксації<sup>34</sup>.

Визначення показника фіксації атмосферного азоту показало, що він також змінюється залежно від умов вирощування та років життя травостою. Так, підвищення її відбувалося від першого до другого року життя<sup>35</sup>. Однак на третьому році реакція була різною та залежала від умов зволоження. Так, без зрошення фіксація азоту у сорту Унітро на контрольних варіантах з 132–133 кг/га в другому році, знизилася до 123–124 кг/га в третьому, в умовах краплинного зрошення відзначається невелике збільшення – з 194–195 до 201–201 кг/га, відповідно. Аналогічна ситуація була і у сорту Зоряна в умовах природного зволоження – 138–139 кг/га на другому році та 128–129 кг/га на третьому, за краплинного зрошення 200–201 кг/га і 208–209 кг/га, відповідно. Така картина спостерігалася і при застосуванні стимуляторів росту (табл. 10).

---

<sup>31</sup> Патица В. П., Гнатюк Т. Т., Булеца Н. М., Кириленко Л. В. Біологічний азот у системі землеробства. *Землеробство*. 2015. Вип. 2. С. 12–20.

<sup>32</sup> Prasanna R., Sood A., Ratha S. K., Singh P. K. Cyanobacteria as a “green” option for sustainable agriculture. Cyanobacteria: an economic perspective. 1. / Naveen K. Sharma, Ashwani K. Rai and Lucas J. Sta (eds.). 2014. Ch. 9. 145–166.

<sup>33</sup> O’Dea J. K., Jones C. A., Zabinski C. A., Miller P. R., Keren I. N. Legume, cropping intensity, and N-fertilization effects on soil attributes and processes from an eight-year-old semiarid wheat system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2015. Vol. 102. P. 179–194. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9687-4>

<sup>34</sup> Tyshchenko O., Tyshchenko A., Piliarska O., Biliaeva I., Kuts H., Lykhovyd P., Halchenko N. Seed productivity of alfalfa varieties depending on the conditions of humidification and growth regulators in the southern steppe of Ukraine. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*. Vol. 20. 2020. Issue 4. P. 551–562. PRINT ISSN 2284-7995

<sup>35</sup> Тищенко О. Д., Тищенко А. В., Куц Г. М., Пілярська О. О. Особливості морфології кореневої системи у популяції люцерни. *Зрошуване землеробство: міжвідомчий тематичний науковий збірник*. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. № 72. С. 118–121.

Таблиця 10

**Фіксація атмосферного азоту залежно від зрошення, застосування регуляторів росту та сорту люцерни по роках життя, кг/га (середнє за 2012–2015 рр.)**

Умови зволоження (фактор А)	Сорт (фактор В)	Застосування регуляторів росту (фактор С)	Роки життя		
			перший	другий	третій
Без зрошення	Унітро	контроль 1 (без обробок)	70	132	123
		контроль 2 (обробка водою)	70	133	124
		Агростимулін	77	139	133
		Гарт	87	149	145
		Люїсис	86	145	140
		Емістим С	75	137	130
		<b>середнє</b>	<b>77</b>	<b>139</b>	<b>134</b>
	Зоряна	контроль 1 (без обробок)	77	138	128
		контроль 2 (обробка водою)	78	139	129
		Агростимулін	87	149	137
		Гарт	95	162	156
		Люїсис	93	157	148
		Емістим С	85	147	133
		<b>середнє</b>	<b>86</b>	<b>149</b>	<b>140</b>
<i>середнє</i>			<b>86</b>	<b>144</b>	<b>137</b>
Кращинне зрошення	Унітро	контроль 1 (без обробок)	119	194	201
		контроль 2 (обробка водою)	119	195	201
		Агростимулін	140	206	214
		Гарт	150	219	227
		Люїсис	145	211	221
		Емістим С	141	202	211
		<b>середнє</b>	<b>136</b>	<b>205</b>	<b>215</b>
	Зоряна	контроль 1 (без обробок)	122	200	208
		контроль 2 (обробка водою)	123	201	209
		Агростимулін	148	213	218
		Гарт	154	223	232
		Люїсис	150	218	226
		Емістим С	145	210	213
		<b>середнє</b>	<b>140</b>	<b>211</b>	<b>220</b>
<i>середнє</i>			<b>138</b>	<b>208</b>	<b>217</b>

Оцінка істотності часткових відмінностей

НІР <sub>05</sub>	А	0,867	26,02	0,849
НІР <sub>05</sub>	В	0,455	9,84	6,563
НІР <sub>05</sub>	С	0,708	2,63	3,609

Оцінка істотності головних ефектів

НІР <sub>05</sub>	А	0,274	8,23	0,268
НІР <sub>05</sub>	В	0,144	3,11	2,076
НІР <sub>05</sub>	С	0,354	1,31	1,804

Аналіз даних таблиці вказує на позитивний вплив досліджуваних регуляторів росту на показник фіксації атмосферного азоту за різних умов зволоження. Застосування препаратів Агростимуліну, Люцису та Емістиму С сприяє підвищенню фіксації атмосферного азоту в порівнянні з контролем<sup>36</sup>. Зокрема в умовах природного зволоження фіксація атмосферного азоту у сорту Унітро становила: в перший рік 77; 86; 75 кг/га, другий – 139; 145; 137 кг/га та в третій – 133; 140; 130 кг/га, у сорту Зоряна: перший – 87; 93; 85 кг/га, другий – 149; 157; 147 кг/га, третій – 137; 148; 133 кг/га, тоді як на контрольних варіантах у сорту Унітро – 70; 132–133; 123–124 кг/га та 77–78; 138–139; 128–129 кг/га у сорту Зоряна, відповідно.

За краплинного зрошення цей показник був набагато вищим та склав у сорту Унітро в першому році – 139; 145; 141, другому – 206; 211; 202, третьому – 214; 221; 211 кг/га, у сорту Зоряна – 148; 150; 145 на першому році, другому – 213; 218; 210, третьому – 218; 226; 213 кг/га проти контрольних варіантів у сорту Унітро – 119; 194–195; 201 кг/га та 123–124; 200–201; 208–209 кг/га у сорту Зоряна, відповідно.

Найбільш ефективним виявилось застосування препарату Гарт, що забезпечувало максимальну фіксацію атмосферного азоту в умовах природного зволоження у сорту Унітро 87; 149; 145 і 95; 162; 156 кг/га у сорту Зоряна та за краплинного зрошення 150; 219; 227 кг/га і 154; 223; 232 кг/га, відповідно.

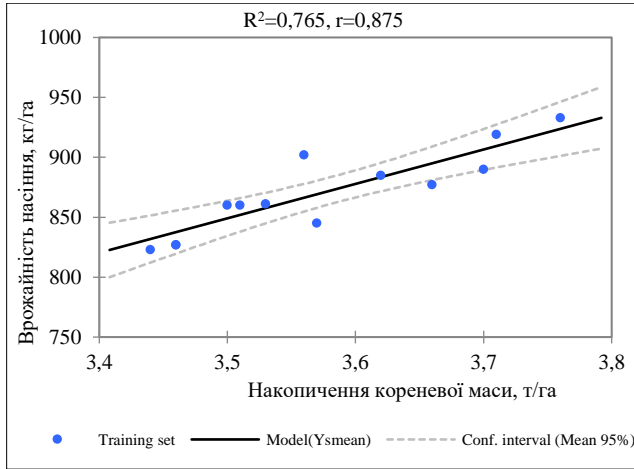
Нижче нами було проаналізовано зв'язки між накопиченням кореневої маси і азотфіксацією та насінневою продуктивністю люцерни за три роки при різних умовах зволоження<sup>37</sup>. Дослідженнями було встановлено, що існують тісні зв'язки врожайності насіння з накопиченням кореневої маси та азотфіксацією. Зокрема, коефіцієнт кореляції між врожайністю насіння та накопиченням кореневої маси в умовах природного зволоження становив  $r = 0,875$ , а за краплинного зрошення значення кореляції було вищим –  $r = 0,922$  (рис. 6).

Висока азотфіксуюча здатність рослин забезпечує їх симбіотичним азотом, покращуючи їх живлення, що збільшує врожайність насіння. Так, в умовах природного зволоження зв'язок між насінневою продуктивністю та фіксацією атмосферного азоту становив  $r = 0,955$  та  $r = 0,958$  за краплинного зрошення (рис. 7).

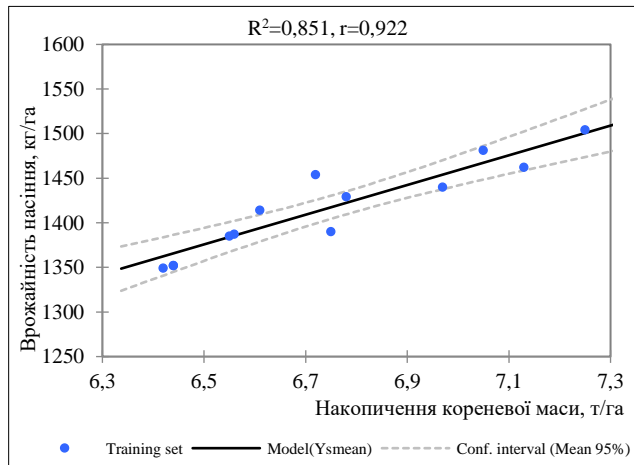
---

<sup>36</sup> Тищенко О. Д., Тищенко А. В., Пілярська О. О., Куц Г. М., Гальченко Н. М., Коновалова В. М. Зв'язок насінневої продуктивності сортів люцерни першого року життя від накопичення кореневої маси та азотфіксуючої здатності. *Зрошуване землеробство: міжвідомчий тематичний науковий збірник*. Херсон : ВД «Гельветика», 2020. № 73. С. 45–53.

<sup>37</sup> Тищенко О. Д., Тищенко А. В. Методика селекції люцерни на підвищений рівень симбіотичної азотфіксації. Херсон : Грін Д. С., 2016. 20 с.



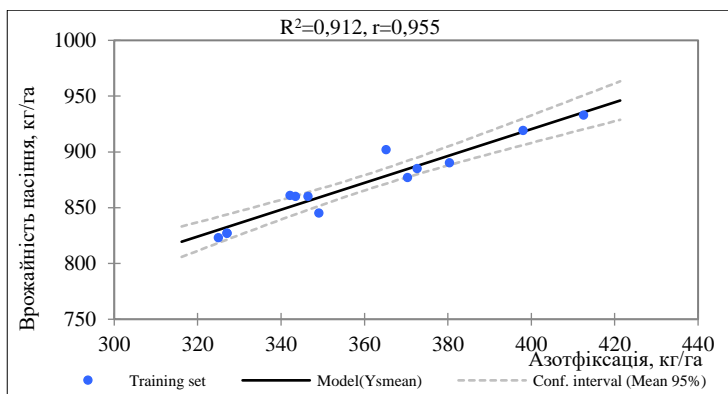
**А**



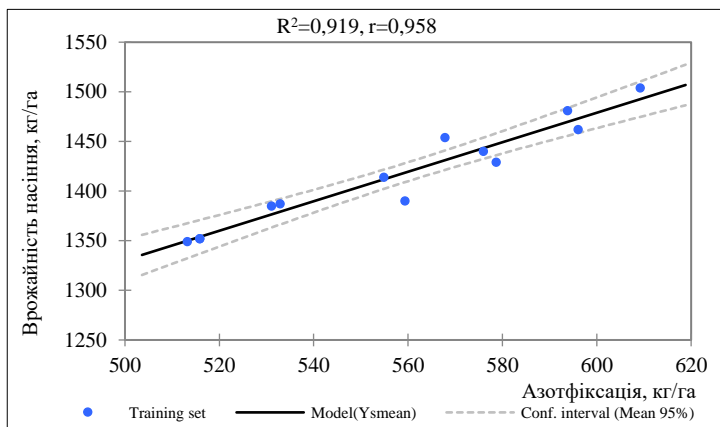
**Б**

**Рис. 6. Регресія між врожайністю насіння та накопиченням кореневої маси в умовах природного зволоження (А) і при зрошенні (Б) (середнє за 2012–2015 рр.)**





А



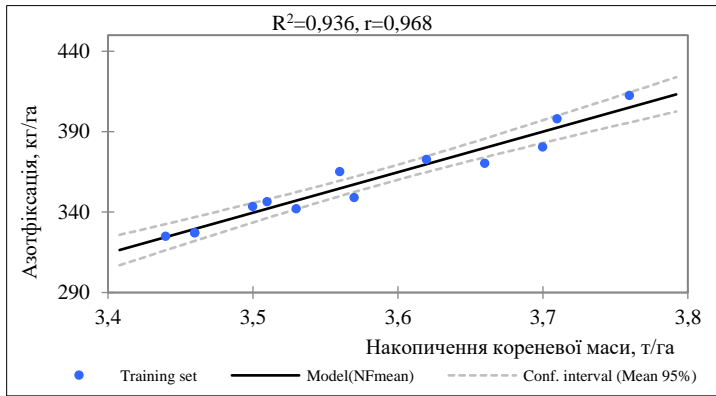
Б

**Рис. 7. Регресія між врожайністю насіння та фіксацією атмосферного азоту в умовах природного зволоження (зліва) і при зрошенні (справа) (середнє за 2012–2015 рр.)**

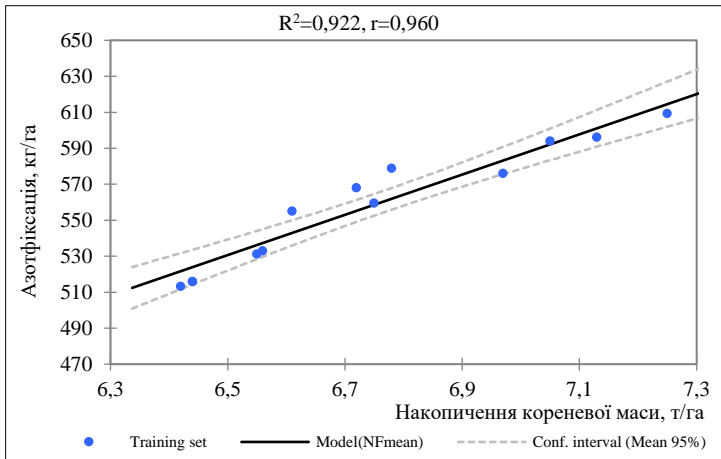
Разом з тим, чим потужніша коренева система, тобто більш розвинена, тим краще рослини люцерни фіксують азот з повітря, що підтверджує високий коефіцієнт кореляції<sup>38</sup>. Так, за краплинного зрошення кореляційна залежність між накопиченням кореневої маси та

<sup>38</sup> Tyshchenko O., Tyshchenko A., Piliarska O., Biliaeva I., Kuts H., Bidnyna I., Lykhovyd P., Halchenko N. The Importance of Main Root Diameter in Alfalfa Plant Breeding. *Technology Reports of Kansai University*. 2020, October. Vol. 62. Iss. 09. P. 5443–5450.

фіксацією атмосферного азоту становила  $r = 0,960$ , тоді як в умовах природного зволоження –  $r = 0,968$  (рис. 8).



**Б**

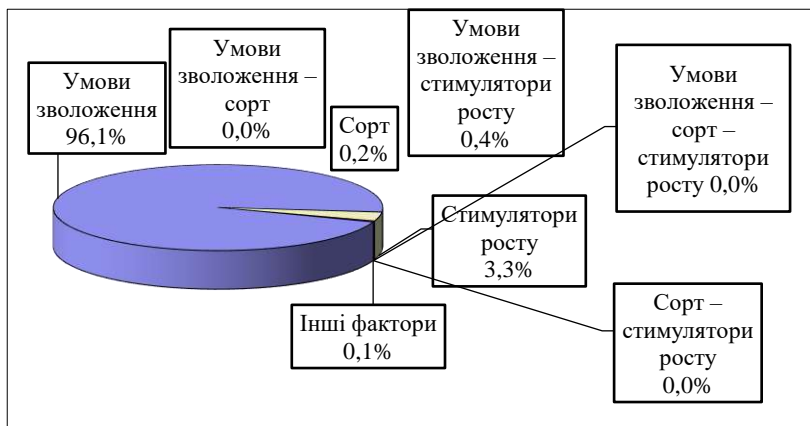


**Б**

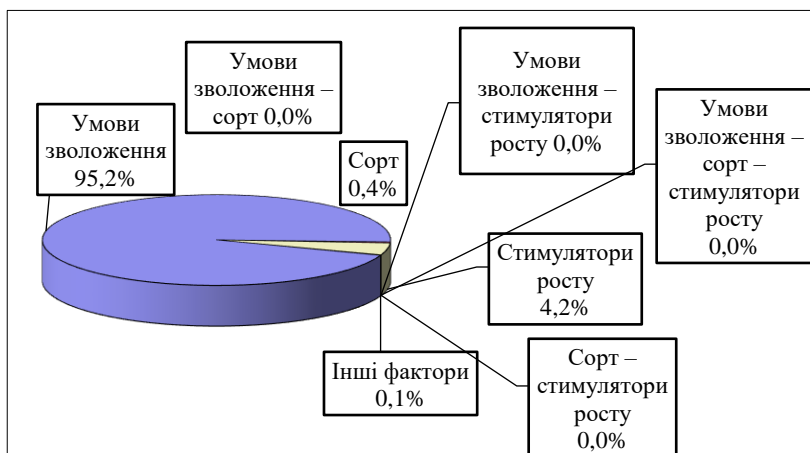
**Рис. 8. Регресія між фіксацією атмосферного азоту та накопичення кореневої маси в умовах природного зволоження (зліва) і при зрошенні (справа) (середнє за 2012–2015 рр.)**

За даними дисперсійного аналізу встановлено, що найбільший вплив на накопичення кореневої маси та азотфіксацію сортів люцерни чинили умови зволоження, у яких частка впливу становила 96,1% та 95,2%,

відповідно. Стимулятори росту мали вплив на накопичення кореневої маси 3,3% та азотфіксацію 4,2%. Сорт мав вплив на накопичення кореневої маси та азотфіксацію 0,2 та 0,4%, відповідно (рис. 9, 10).



**Рис. 9. Вплив факторів на ознаку «накопичення кореневої маси» сортів люцерни (2012–2015 рр.)**



**Рис. 10. Вплив факторів на ознаку «азотфіксація» сортів люцерни (2012–2015 рр.)**

## ВИСНОВКИ

За результатами вивчення різних сортів і популяцій люцерни встановлено, що у них виявлялися дві форми кореневої системи – стрижнева та стрижнево-розгалужена, де переважала стрижнево-розгалужена коренева система (59–66 %).

Сорти і популяції формували різну загальну кількість бокових розгалужень першого порядку за їх діаметром: фракція тонких – у загальній кількості – найчисельніша, вона складає 77,8–86,4 %, середніх – 10,1–18,8 %, фракція товстих коренів становила всього 1,1–4,0 %.

Вирахувані кореляційні зв'язки показали, що з об'ємом кореневої системи тісно пов'язані надземна ( $r = 0,69-0,88$ ) і коренева ( $r = 0,77-0,94$ ) маса, між висотою рослин і кількістю стебел зв'язок слабший, відповідно:  $r = 0,41-0,68$ ;  $r = 0,41-0,52$ .

Були виділені сорти Зоряна, Серафіма та популяція МО-115 з високим об'ємом кореневої системи (6,9–7,0 мл) та встановлені зв'язки між ознаками будуть використовуватися в подальшій селекційній роботі.

За результатами дослідження різних сортів і популяцій люцерни встановлено морфологічну ознаку – діаметр головного кореня, що вказує на тісну залежність між продуктивністю надземної та підземної частини рослини і використано як непрямий критерій добору ( $\geq 6,0$  мм).

Добори за діаметром головного кореня сприяють збільшенню чи стабілізації рослин з діаметром кореня  $\geq 6,0$  мм, а також підвищенню продуктивності підземної і надземної маси.

Виділено генотипи люцерни ПР-04, РК/98, Серафіма, які будуть використовуватися в практичній селекції.

Обробка насіння ціанобактеріальним препаратом сприяє збільшенню накопичення кореневої маси на 2,5–26,1 %, ніж у інших інокулянтів і на 27,4–28,9 % більше за контроль та посиленню процесу азотфіксації на 3,3–17,4 % і на 35,2–37,4 %, відповідно.

Найбільший вплив на накопичення кореневої маси та азотфіксацію сортів люцерни надавали бактеріальні препарати, частка впливу становила 94,6 % та 96,1 %, відповідно.

При застосуванні бактеріальних препаратів коефіцієнт кореляції між накопиченням кореневої маси та азотфіксацією становив  $r = 0,904$ .

Встановлено, що зрошення сприяє збільшенню накопичення кореневої маси на 88,6 % (перший рік), 69,6 (другий рік) і 88,6 % (третій рік) та посиленню фіксації атмосферного азоту на 60,8, 44,4 і 58,4 %, відповідно.

Встановлено, що застосування стимуляторів росту сприяє збільшенню накопичення кореневої маси та посиленню процесу азотфіксації, найкращі показники мав регулятор росту Гарт.

При застосуванні стимуляторів росту коефіцієнт кореляції між накопиченням кореневої маси та азотфіксацією становив  $r = 0,968$  в умовах природного зволоження та  $r = 0,960$  при зрошенні.

## АНОТАЦІЯ

Економічна і екологічна криза привели до різкого зменшення внесення органічних і мінеральних добрив, зниження площ посівів багаторічних бобових трав, ігнорування сівозмін. Це підсилює деградацію ґрунтів, активує процес дегуміфікації та переущільнення ґрунтів, знижуючи інтенсивність біологічного кругообігу, що негативно позначається на ефективності їх родючості і врожайності вирощуваних культур. Метою роботи було визначити особливості морфологічних ознак кореневої системи селекційного матеріалу люцерни, встановити кореляційні зв'язки ознак кореневої системи та надземної маси. Виділити кращі генотипи для використання їх у практичній селекції. У розділі монографії наведено результати дослідження морфологічних особливостей кореневої системи та її зв'язку з травостою у різних генотипів люцерни, представлених сортами та популяціями: Луїза, Зоряна, Надія, Унітро, Серафима, ПК/98, ПР-04, МО-115, SV, НМГ. Дослідження проводили протягом 2015–2018 рр. в польових умовах в Інституті зрошуваного землеробства НААН на темно-каштановому ґрунті. Технологія вирощування культури була стандартною для зрошуваних умов зони проведення досліджень. Експериментальні дані обробляли за загальноприйнятою методикою дисперсійного аналізу та кореляційного аналізу Пірсона. Результати дослідження свідчать про суттєві відмінності морфології кореневої системи в різних генотипів люцерни та їх неоднакове значення для селекційної роботи. Сорти Зоряна, Серафим та популяція МО-115 з високим об'ємом кореневої системи 6,9–7,0 мл та встановленими зв'язками між вивченими особливостями кореневою та надземною масою рекомендовано використовувати в подальшій селекційній роботі люцерни. При вивченні морфологічної структури кореневої системи було встановлено, що діаметр головного кореня, залежно від генотипу, в абсолютному вираженні, знаходиться в межах 5,10–7,80 мм, при амплітуді коливання коефіцієнту варіювання  $V=26,4–31,4\%$ , що дає можливість передбачити ефективний добір за цією ознакою. У доборів за діаметром головного кореня у більшості генотипів підвищуються показники продуктивності надземної та кореневої маси чи одного з них. При збільшенні діаметра до

6,7–6,9 мм, після другого циклу доборів, підвищується продуктивність надземної маси до 4,75–6,37 г, кореневої – до 4,71–5,26 г.

### Література

1. Тараріко О. Г., Шерстобоева О. В., Патики В. П. Концепція і наукове обґрунтування основних напрямків удосконалення систем випуску і реалізації мікробіологічних препаратів для сільськогосподарського виробництва. *Мікробіологічний журнал*. 1997. № 4. С. 102–108.
2. Ciaglo-Androsiuk S. Relationship between root and yield related morphological characters in pea (*Pisum sativum* L.). *Plant breeding and seed science*. 2012. Vol. 66. P. 4–15. DOI: 10.2478/v10129-011-0053-7.
3. Lamb J. F. S., Samac D. A., Barnes D. K. & Henjum K. I. Increased Herbage Yield in Alfalfa Associated with Selection for Fibrous and Lateral Roots. *Crop Sci*. 2000. № 40. P. 693–699.
4. Chen Y., Ghanem M. E. & Kadambot H. M. Siddique. Characterising root trait variability in chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasm. *Journal of Experimental Botany*. 2017. Vol. 68. № 8. P. 1987–1999. DOI: 10.1093/jxb/erw368.
5. Liu L., Zhang H., Ju C., Xiong Y., Bian J., Zhao B., Yang J. Changes in Grain Yield and Root Morphology and Physiology of Mid-Season Rice in the Yangtze River Basin of China During the Last 60 Years. *Journal of Agricultural Science*. 2014. Vol. 6. № 7. DOI: 10.5539/jas.v6n7p1.
6. Meister R., Rajani M., Ruzicka D., Schachtman D. P. Challenges of modifying root traits in crops for agriculture. *Trends Plant Sci*. 2014. Vol. 19. № 12. P. 779–789. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.tplants. 2014.08.005.
7. Paez-Garcia A., Motes C. M., Scheible W. R., Chen R., Blancaflor E. B., Monteros M. J. Root Traits and Phenotyping Strategies for Plant Improvement. *Plants (Basel)*. 2015. № 15/4 (2). P. 334–55. DOI: 10.3390/plants4020334.
8. Uga Y., Sugimoto K., Ogawa S., Rane J., Ishitani M., Hara N., Kitomi Y., Inukai Y., Ono K., Kanno N., et al. Control of root system architecture by Deeper rooting increases rice yield under drought conditions. *Nat. Genet*. 2013. № 45. P. 1097–1102. DOI: 10.1038/ng.2725.
9. Comas L. H., Becker S. R., Cruz V. M. V., Byrne P. F. & Dierig D. A. Root traits contributing to plant productivity under drought. *Front. Plant Sci*. 2013. Vol. 4. P. 442. DOI: doi.org/10.3389/fpls.2013.00442.
10. Tyshchenko O., Tyshchenko A., Piliarska O., Biliaeva I., Kuts H., Lykhovyd P. Morphological Features of Roots and Their Variation in Alfalfa Genotypes. *Technology Reports of Kansai University*. 2020. July. Vol. 62. Is. 06. P. 2957–2964.

11. Тищенко О. Д., Тищенко А. В., Куц Г. М., Пілярська О. О. Про кореневу систему люцерни. *Зрошуване землеробство : міжвідомчий тематичний науковий збірник*. Херсон : ОЛДІ–ПІЮС, 2018. № 70. С. 88–94.
12. Тищенко О. Д., Тищенко А. В., Куц Г. М. Характеристика вихідного матеріалу люцерни. *Вісник Львівського Національного аграрного ун-ту Агронія*. 2018. № 22 (1). С. 33–39.
13. Pierret A., Moran C. J., Doussan C. Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. *New Phytol.* 2005. № 166. P. 967–980. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01389.x.
14. Ehdiae B., Layne A. P. & Waines J. G. Root system plasticity to drought influence grain in bread wheat. *Euphytica*. 2012. № 186 (1). P. 219–232. DOI: 10.1007/s10681-011-0585-9.
15. Crespi M., Frugier F. De novo organ formation from differentiated cells: root nodule organogenesis. *Sci Signal*. 2008. № 1 (49):re11. DOI: 10.1126/scisignal.149re11
16. Harrison G. F., Sruthi N. Characterization of a soybean (*Glycine max* L. Merr.) germplasm collection for root traits. *PLOS ONE*. 2018. № 1/19. DOI: doi.org/10.1371/journal.pone.0200463.
17. Skudienė R. & Tomchuk D. Root mass and root to shoot ratio of different perennial forage plants under western Lithuania climatic conditions. *Romanian agricultural research*. 2015. № 32. P. 209–219. DII 2067-5720 RAR 2015-125.
18. Вожегова Р. А., Тищенко О. Д., Тищенко А. В. Характеристика симбіотичних ознак у генотипів люцерни (*Medicago* L.) та їх мінливість. *Сортовивчення та охорона прав*. 2018. Т. 14. № 1. С. 45–51.
19. Hakl J., Pisaričik M., Hrevušová Z., Šantrůček J. In-field lucerne root morphology traits over time in relation to forage yield, plant density, and root disease under two cutting managements. *Field Crops Research*. 2017. № 213. P. 109–117. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.017>.
20. Hakl K., Mášková J. & Šantrůček Z. Hrevušová. development of root morphology traits of the czech lucerne varieties in chernozem over a three year period. *acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis*. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2012. Vol. LX. № 3. P. 25–34.
21. Bakheit B. R., Ali M. A. & Helmy A. A. Effect of Selection for Crown Diameter on Forage Yield and Quality Components in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Asian Journal of Crop Science*. 2011. Vol. 3 (2). P. 68–76. DOI: 10.3923/ajcs.2011.68.76.
22. Awad I. M.H. Selection response in berseem (*Trifolium alexandrinum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.). Ph.D. Thesis, Faculty of Agric., Assiut Univ. Egypt, 2001.

23. Kell, D. B. Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. *Ann. Bot.-London*. 2011. № 108. P. 407–418. DOI: 10.1093/aob/mcr175.

24. Smith S. & De Smet I. Root system architecture: insights from Arabidopsis and cereal crops Introduction. *Philos. T R Soc. B*. 2012. № 367. P. 1441–1452.

25. López-Bucio J., Hernández-Abreu E., Sánchez-Calderón L., Nieto-Jacobo M. F., Simpson J. & Herrera-Estrella L. Phosphate availability alters architecture and causes changes in hormone sensitivity in the Arabidopsis root system. *Plant Physiol*. 2002. № 129. P. 244–256.

26. Sánchez-Calderón L., López-Bucio J., Chacón-López A., Cruz-Ramírez A., Nieto-Jacobo M. F., Dubrovsky J. G. & Herrera-Estrella L. Phosphate starvation induces a determinate developmental program in the roots of Arabidopsis thaliana. *Plant Cell Physiol*. 2005. № 46. P. 174–184.

27. Berg G., Smalla K. Plant species and soil type cooperatively shape the structure and function of microbial communities in the rhizosphere. *FEMS Microbiol Ecol*. 2009. № 68 (1). P. 1–13. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2009.00654.x.

28. Alonso J. M., Stepanova A. N., Solano R., Wisman E., Ferrari S., Ausubel F. M., & Ecker J. R. Five components of the ethylene-response pathway identified in a screen for weak ethylene-insensitive mutants in Arabidopsis. *Proc. Natl. Acad. Sci*. 2003. № 100. P. 2992–2997.

29. Vozhehova R., Tyshchenko A., Tyshchenko O., Piliarska O., Konovalova V., Sharii V., Fundirat K. Economic feasibility of application of bacterial and fungal drugs on seed-used alfalfa. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*. 2022. Vol. 22. Issue 4. P. 827–834. PRINT ISSN 2284-7995

30. Lynch J. P. & Ho M. D. Rhizoeconomics: Carbon costs of phosphorus acquisition. *Plant Soil*. 2005. № 269. P. 45–56.

31. Glick B. R. Phytoremediation: Synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnol. Adv*. 2003. № 21. P. 383–393. DOI: 10.1016/S0734-9750(03)00055-7

32. Oldroyd G. E., Downie J. A. Coordinating nodule morphogenesis with rhizobial infection in legumes. *Annu Rev Plant Biol*. 2008. № 59. P. 519–546. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092839.

33. Bonfante P., Requena N. Dating in the dark: how roots respond to fungal signals to establish arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Curr Opin Plant Biol*. 2011. № 14 (4). P. 451–457. DOI: 10.1016/j.pbi.2011.03.014.

34. Коць С. Я., Воробей Н. А., Кириченко О. В., Мельникова Н. М., Михалків Л.М, Пухтаєвич П. П. Мікробіологічні препарати для сільського господарства. Київ : ТОВ-Видавництво ЛОГОС, 2016. 48 с.



35. Ceccanti B., Grego S. Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology*. 2000. № 72. P. 9.
36. Hufnagel B., de Sousa S. M., Assis L., Guimaraes C. T., Leiser W., Azevedo G. C., Negri B., Larson B. G., Shaff J. E., Pastina M. M., et al. Duplicate and conquer: Multiple homologs of phosphorus-starvation tolerance enhance phosphorus acquisition and sorghum performance on low-phosphorus soils. *Plant Physiol*. 2014. № 166. P. 659–677. DOI: 10.1104/pp.114.243949.
37. Mijangos I., Pérez R., Albitu I., Garbisu C. Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme and Microbiology Technology*. 2006. № 40. P. 100.
38. Saikia P., Bhattacharya S. S., Baruah K. K. Organic substitution in fertilizer schedule: Impacts on soil health, photosynthetic efficiency, yield and assimilation in wheat grown in alluvial soil. *Agric. Ecosyst. Environ*. 2015. № 203. P. 102–109. DOI: 10.1016/j.agee.2015.02.003.
39. Пацко О. В., Воробей Н. А., Коць С. Я., Паршикова Т. В. Дослідження ефективності агроконсорціумів азотфіксувальних мікроорганізмів. *Физиол. биохим. культ. раст.* 2010. Т. 42. № 2. С. 137–145.31.
40. Моргун В. В. Роль біологічного азоту в азотному живленні рослин. *Вісн. НАН України*. 2018. № 1. С. 62–74. DOI: <https://doi.org/10.15407/vsn2018.01.062>.
41. Li L., Peng Z., Mao X., Wang J., Chang X., Reynolds M. & Jing R. Genome-wide association study reveals genomic regions controlling root and shoot traits at late growth stages in wheat. *Annals of Botany*. 2019. № 124. P. 993–1006. DOI: 10.1093/aob/mcz041.
42. Rastogi R. P., Sinha R. P. Biotechnological and industrial significance of cyanobacterial secondary metabolites. *Biotech. Adv.* 2009. № 27. P. 521–539.
43. Патика В. П., Гнатюк Т. Т., Булеца Н. М., Кириленко Л. В. Біологічний азот у системі землеробства. *Землеробство*. 2015. Вип. 2. С. 12–20.
44. Prasanna R., Sood A., Ratha S. K., Singh P. K. Cyanobacteria as a “green” option for sustainable agriculture. Cyanobacteria: an economic perspective I. / Naveen K. Sharma, Ashwani K. Rai and Lucas J. Sta (eds.). 2014. Ch. 9. 145–166.
45. O’Dea J. K., Jones C. A., Zabinski C. A., Miller P. R., Keren I. N. Legume, cropping intensity, and N-fertilization effects on soil attributes and processes from an eight-year-old semiarid wheat system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2015. Vol. 102, 179–194. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9687-4>.
46. Tyshchenko O., Tyshchenko A., Piliarska O., Biliaeva I., Kuts H., Lykhovyd P., Halchenko N. Seed productivity of alfalfa varieties depending on the conditions of humidification and growth regulators in the southern

steppe of Ukraine. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*. Vol. 20. Issue 4. 2020. P. 551–562. PRINT ISSN 2284-7995

47. Тищенко О. Д., Тищенко А. В., Куц Г. М., Пілярська О. О. Особливості морфології коревої системи у популяції люцерни. *Зрошуване землеробство : міжвідомчий тематичний науковий збірник*. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. № 72. С. 118–121.

48. Тищенко О. Д., Тищенко А. В., Пілярська О. О., Куц Г. М., Гальченко Н. М., Коновалова В. М. Зв'язок насінневої продуктивності сортів люцерни першого року життя від накопичення кореневої маси та азотфіксуючої здатності. *Зрошуване землеробство: міжвідомчий тематичний науковий збірник*. Херсон : ВД «Гельветика», 2020. № 73. С. 45–53

49. Тищенко О. Д., Тищенко А. В. Методика селекції люцерни на підвищений рівень симбіотичної азотфіксації. Херсон : Грінв Д. С., 2016. 20 с.

50. Tyshchenko O., Tyshchenko A., Piliarska O., Biliaeva I., Kuts H., Bidnyna I., Lykhovyd P., Halchenko N. The Importance of Main Root Diameter in Alfalfa Plant Breeding. *Technology Reports of Kansai University*. 2020. October, Vol. 62. Iss. 09. P. 5443–5450.

**Information about the authors:**

**Tyshchenko Andrii Viktorovich,**

Doctor of Agricultural Sciences,

Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy  
of Agrarian Sciences of Ukraine,

24, Maiatska doroha str., Khibodarske, Odesa region, 67667, Ukraine

**Tyshchenko Olena Dmytrivna,**

Candidate of Agricultural Sciences,

Senior Research Fellow,

Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy  
of Agrarian Sciences of Ukraine,

24, Maiatska doroha str., Khibodarske, Odesa region, 67667, Ukraine

**Koblai Oleksandr Oleksandrovych,**

Doctoral Student,

Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy  
of Agrarian Sciences of Ukraine,

24, Maiatska doroha str., Khibodarske, Odesa region, 67667, Ukraine