

---

**Біофізика**

УДК 576.3:577.34:581.13

**МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ РОСТУ ХРІННИЦІ  
ПОСІВНОЇ ЗАЛЕЖНО ВІД ЧАСОВИХ УМОВ ЛАЗЕРНОЇ  
СТИМУЛЯЦІЇ**

**Р. Гумецький, К. Скварко**

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул.Грушевського 4, м. Львів 79005, Україна,  
e-mail: [biolog@franko.lviv.ua](mailto:biolog@franko.lviv.ua)*

Біометричні методи дисперсійного та порівняльного аналізу застосовано для дослідження динаміки росту хрінниці посівної за контрольованих умов після лазерної фотоактивації її насіння в різні пори доби. З'ясовано, що лазерне опромінення у вечірню пору зменшує час проростання насіння на 10–12 год порівняно з ранковим. Серед досліджуваних факторів впливу на динаміку ростових параметрів – пори опромінювання, режиму опромінення (неперервного чи сканувального) та тривалості росту – домінуючою є зміна швидкості росту на послідовних його часових етапах (6-годинних інтервалах). Дія сканованого випромінювання є сильнішою порівняно з дією неперервного. Вплив часової пори фотоактивації та висівання насіння виявився статистично достовірним тільки у взаємодії з іншими досліджуваними факторами.

*Ключові слова:* хрінниця посівна, динаміка росту, лазерна стимуляція, біометричний аналіз.

Функціонування біологічної системи – це комплекс динамічних процесів, на які може впливати низка факторів – як природних (наприклад, зміна часових умов росту), так і введених в експеримент дослідником (у цьому випадку – дія лазерного опромінення). Вважають, що в природному середовищі ростовими процесами керує певний осцилятор [8]. У світловий період доби він перебуває в стані мінімальної енергетичної напруженості та малочутливий до зовнішніх впливів. У темновий період його напруженість досягає максимуму й саме тоді біологічні ритми можуть бути чутливішими до зовнішніх впливів. Це може виявлятися у зміні швидкості фізіологічних процесів залежно від того, коли впливали зовнішні фактори – зранку чи ввечері. Знаючи природу біологічного явища, легко визначити, які процеси в ньому зазнають найбільших змін і яким способом можна ними керувати.

Експериментально досліджено вплив різних типів лазерів на ріст і розвиток рослин [3], продуктивність [4,7], спадкову мінливість [2], фітопатогенну резистентність [1] та ін. Проте в цих працях немає даних про пору опромінення об'єктів – ранковий чи вечірній час доби, що важливо для оцінки впливу цього фактора на інтенсивність ростових процесів та ефективність дії лазерного опромінення. Наше дослідження є спробою з'ясувати це питання, застосовуючи методи математичного аналізу [5,6] у вивченні ростових процесів фотоактивованих лазерними променями рослин на фоні природної мінливості швидкості їхнього росту (індивідуальної та часової). У цьому випадку поставлено такі завдання:

дослідити зміни ростових параметрів рослин (час схожості, приріст кореня) після передпосівного лазерного опромінення насіння та наступного його висівання в різний (ранковий, вечірній) час доби;

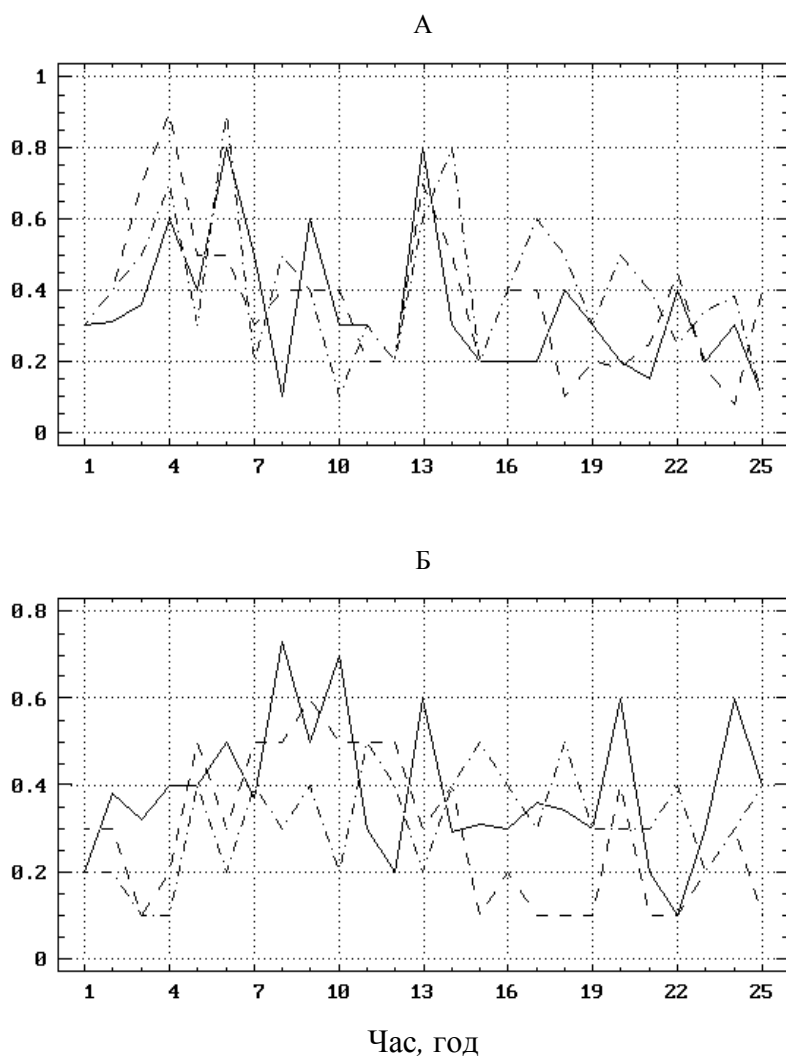
виявити фактори, які найсуттєвіше впливають на об'єкт досліджень, проаналізувати кількісні характеристики та достовірність їхнього впливу;

порівняти статистичні показники динаміки росту контрольних і фотоактивованих рослин за різних часових умов експериментальних впливів.

Об'єктом дослідження була хрінниця посівна (крес-салат, *Lepidium sativum* L.), вирощена в Ботанічному саду ЛНУ ім. Івана Франка 1998 р. Стисло опишемо підготовку рослинного матеріалу для вивчення ростових процесів. Насіння рівномірно розміщували в чашках Петрі в один шар на фільтрувальному папері, змоченому 5 мл дистильованої води. Частина неопроміненого насіння залишалась контролем, іншу опромінювали за стаціонарних умов стимульовальними дозами лазерних випромінювань у неперервному режимі та в умовах сканування. Опромінення насіння у неперервному режимі забезпечено розфокусованими за допомогою приставки ВК-1 лазерними променями, генерованими установкою ЛГ-75 або ЛГ-126. Густина випромінювання становила 1,0–1,2 мВт/см<sup>2</sup>. Сканувального режиму опромінення досягали за допомогою сканера СУ-1, який на установці ЛГН-104 виконував покадрову ( $T_{\text{кдр}} = 5$  Гц) та рядкову ( $T_{\text{ряд}} = 87$  Гц) розгортки променя з густиною випромінювання 0,8–1,0 мВт/см<sup>2</sup>. Стимульовальні дози неперервного ( $E = 0,95$  Дж) і сканованого (0,043–0,069 Дж) лазерного випромінювання визначали емпірично шляхом їхнього попереднього визначення за лабораторних умов [7]. Ефективність опромінення оцінювали за лабораторною схожістю насіння та швидкістю його проростання. Через кожну годину протягом доби визначали приріст кореневої системи в кожній з вибірок контрольних і опромінених рослин. Виконано шість серій дослідів за різних режимів опромінення насіння і різних часових умов його висівання. Первинне статистичне опрацювання даних кожного варіанта досліді полягало в усередненні сукупностей 25 вимірювань, одержаних в однакові моменти часу.

Попередній аналіз динаміки росту коріння крес-салату виявив велику мінливість його швидкості (рисунок), що на першому етапі дослідження зумовило необхідність використання статистичних показників добового росту, визначених

для усіх комбінацій експериментальних умов із наступним їх порівнянням. Результати аналізу наведені в табл. 1.



Швидкість росту корінців хрінниці посівної (мм/год) після ранкової (А) та вечірньої (Б) стимуляції: в контролі (—), після сканованого (---) і неперервного (- · -) лазерного опромінення насіння.

Вплив передпосівного лазерного опромінення насіння на швидкість росту рослин порівняно зі швидкістю росту з контрольного (неопроміненого) насіння

по-різному виявляється залежно від пори стимуляції ростових процесів. Наприклад, після ранкової стимуляції, особливо сканованими лазерними променями, середньодобова швидкість росту виявилась достовірно нижчою на 96 мкм/год ( $p > 0,95$ ) порівняно з неопроміненим контролем. Також на 72 мкм/год ( $p = 0,93$ ) вона знижується після лазерного опромінення в неперервному режимі. Натомість передпосівна лазерна обробка насіння у вечірній час у обох випадках забезпечувала певне зростання швидкості росту крес-салату.

Безпосереднє порівняння ростових ефектів, зумовлених різною порою лазерного опромінення, підтверджує, що вечірня стимуляція порівняно з ранковою спричиняє достовірне збільшення середньодобової швидкості росту на 91 мкм/год ( $p > 0,95$ ) після неперервного опромінення та суттєве збільшення на 78 мкм/год ( $p \approx 0,9$ ) у разі застосування сканованих лазерних променів. У контрольній групі рослин простежувалося незначне зменшення швидкості росту коріння крес-салату на 47 мкм/год ( $p \approx 0,7$ ).

Таблиця 1

Статистичні характеристики середньодобової швидкості росту за різних часових умов його стимуляції, (мкм/год)

Умови досліджу		Показник	Контроль (без опромінення)	Лазерне опромінення	
				Скановане	неперервне
Пора стимуляції росту	Ранкова, 9-та година	$M \pm m$	388 ± 32	292 ± 34	316 ± 24
		$C_v, \%$	41,2	58,2	38,6
		$d$	–	– 96	– 72
		$t$	–	2,05	1,80
		$p$	–	0,95	0,93
	Вечірня, 19-та година	$M \pm m$	341 ± 38	370 ± 39	407 ± 36
		$C_v, \%$	55,7	52,7	44,2
		$d$	–	+ 29	+ 66
		$t$	–	0,53	1,26
		$p$	–	0,40	0,79
Порівняльні характеристики		$d$	– 47	+ 78	+ 91
		$t$	0,95	1,51	2,10
		$p$	0,66	0,87	> 0,95

Примітки.  $M$  – середнє арифметичне значення;  $m$  – його стандартна похибка;  $C_v$  – коефіцієнт варіації;  $d$  – різниця середніх арифметичних;  $t$  – коефіцієнт Стьюдента;  $p$  – достовірність різниці.

В усіх досліджуваних випадках швидкість росту має високі значення коефіцієнта варіації (від 39 до 58 %), що, очевидно, зумовлене впливом інших факторів (крім розглянутих вище), які спричиняють флуктуації інтенсивності росту впро-

довж доби. Для детальнішого аналізу цих флуктуацій у кожному досліді замість середньодобового значення розглядали середні значення швидкості росту на чотирьох послідовних 6-годинних інтервалах першої доби вегетації. Це дало змогу оцінити динаміку росту не тільки за різних часових умов його стимуляції, а й з урахуванням ще фактора тривалості росту. В цьому випадку для математичного опрацювання всього комплексу експериментальних даних застосовано метод трифакторного дисперсійного аналізу [6] (незалежно для кожного з режимів опромінення), результати якого наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Статистичні характеристики впливу досліджуваних факторів на швидкість росту

Фактори впливу	Показники впливу					
	У разі сканованого опромінення			У разі неперервного опромінення		
	$\eta^2$ , %	F	<i>p</i>	$\eta^2$ , %	F	P
Лазерне опромінення А	0,9	0,99	0,67	0,1	0,01	0,08
Пора стимуляції В	0,2	0,20	0,34	0,4	0,44	0,49
Тривалість росту С	13,6	5,62	> 0,99	4,7	1,73	0,83
А і В	3,0	2,98	0,91	4,0	2,05	0,87
В і С	12,4	3,87	> 0,99	12,1	3,31	> 0,99
А і С	1,4	0,37	0,17	3,6	0,90	0,53
Усі фактори разом	31,5	–	–	24,9	–	–
Невраховані фактори	68,5	–	–	75,1	–	–

Примітки.  $\eta^2$  – частка впливу (фактора, взаємодії факторів); *F* – коефіцієнт Фішера.

Весь матеріал вимірювання годинних приростів корінців контрольних і опромінених рослин аналізували з урахуванням таких факторів впливу на спостережувану мінливість експериментальних даних:

наявність або відсутність передпосівного лазерного опромінення насіння (фактор А);

ранкова або вечірня пора лазерної стимуляції росту (фактор В);

тривалість росту, яку визначали 6-годинними інтервалами від моменту проростання насіння (фактор С);

взаємодія впливів усіх парних комбінацій названих вище факторів.

Виявилося, що домінуючими є зміни швидкості росту на різних етапах його тривалості – частка впливу тільки цього фактора, незалежно від інших, досягає 14% ( $p > 0,99$ ) від сумарної дії всіх факторів разом з неврахованими, що буває після сканованого опромінення насіння, і не така суттєва (до 5%;  $p \approx 0,8$ ) після

застосування неперервного лазерного опромінення. Майже вдвоє підвищується частка впливу тривалості росту на його швидкість унаслідок сильної взаємодії з таким фактором, як пора лазерної стимуляції росту: його частка впливу збільшується ще на 12 % ( $p > 0,99$ ) для кожного з досліджуваних режимів опромінення. Незалежна дія факторів опромінення та пори стимуляції росту не перевищує 1 %, до того ж вона недостовірна ( $p < 0,67$ ), а ці фактори суттєво виявляються лише в разі їхньої взаємодії і досягають суттєвої частки впливу 3–4 % ( $p \sim 0,9$ ) за кожного режиму опромінення.

У цілому лише третину всієї спостережуваної мінливості швидкості росту можна пояснити як окремою, так і сумісною дією всіх досліджуваних факторів. Незважаючи на велику залишкову мінливість цього ростового показника (68,5 %), не враховувану названими вище факторами, статистичні методи все ж дають змогу виявити певні закономірності в нерівномірностях росту впродовж досліджуваного добового періоду. Результати застосованого для цього порівняльного аналізу [5] наведені в табл. 3.

Аналіз тривалості росту, як фактора найсуттєвішого впливу на швидкість росту, виявляє особливості динаміки приросту кореня впродовж доби, а саме: в усіх дослідках за умов ранкової стимуляції росту середній приріст досягає максимальних значень після 7–12 год росту, тоді як за умов вечірньої його максимальні значення зафіксовано вже на 1–6 год росту. В контролі зміни швидкості росту в різних інтервалах першої доби недостовірні ( $0,61 \leq p \leq 0,72$ ). У ранкових дослідках із неперервно опроміненим насінням вони достовірні ( $p > 0,95$ ) лише на початку росту й чітко виявляються у випадку застосування сканованого лазерного опромінення ( $p > 0,99$ ). Зівставлення змін середньої швидкості росту контрольних і опромінених рослин за усіх умов дослідів і в усіх часових інтервалах засвідчило, що вплив неперервного режиму опромінення мало суттєвий ( $p < 0,9$ ), за винятком 1–6 год росту після ранкової стимуляції, коли опромінення зменшує середній приріст кореня ( $p > 0,95$ ). Часово більш виражена й достовірна різниця з контролем, зумовлена сканувальним режимом опромінення, простежується також тільки за умов ранкової стимуляції росту, де його прискорення (на 7–12-ту год росту) й наступне сповільнення (на 13–24 год) чіткіше виражені саме в разі застосування цього режиму опромінення ( $p > 0,95$ ).

Отже, результати як дисперсійного, так і порівняльного аналізу свідчать про те, що пора стимуляції росту (ранковий чи вечірній час) є фактором, який у взаємодії з іншими факторами достовірно впливає на швидкість ростових процесів. Завдяки цьому впливові за умов вечірньої стимуляції росту в усіх випадках час до початку проростання насіння зменшується на 10–12 год (в 1,8 раза) та досягається максимальна швидкість росту вже на першому його 6-годинному інтервалі; вона на 30 % вища, ніж за умов ранкової стимуляції у контрольних рослин і на 90–150 % вища в опромінених залежно від режиму лазерного опромінення. Після опромінення також відповідно зростає на 25–30 % і середньодобова швидкість росту, тоді як у контрольних рослин вплив пори висівання насіння на цей

показник суттєво не виявляється.

Таблиця 3

Статистичні характеристики швидкості росту в різних часових інтервалах першої доби вегетації, (мкм/год)

Умови досліджу		Тривал. росту, год	Показник	Контроль (без опромінення)	Лазерне опромінення	
					скановане	неперервне
Пора стимуляції росту	Ранкова, 9-та година	1–6	$M \pm t$ $p$	$367 \pm 41$ 0,67	$283 \pm 54$ > 0,99	$200 \pm 45$ > 0,95
		7–12	$M \pm t$ $p$	$467 \pm 88$ –	$517 \pm 17$ 0,41**	$367 \pm 42$ 0,57
		13–18	$M \pm t$ $p$	$365 \pm 48$ 0,66	$200 \pm 52$ > 0,99	$383 \pm 48$ 0,19**
		19–24	$M \pm t$ $p$	$357 \pm 72$ 0,65	$186 \pm 46$ > 0,999	$314 \pm 26$ 0,76
	Вечірня, 19-та година	1–6	$M \pm t$ $p$	$462 \pm 81$ –	$550 \pm 88$ 0,52**	$517 \pm 98$ 0,32**
		7–12	$M \pm t$ $p$	$333 \pm 76$ 0,72	$317 \pm 40$ > 0,95	$383 \pm 60$ 0,73
		13–18	$M \pm t$ $p$	$350 \pm 95$ 0,61	$383 \pm 87$ 0,79	$416 \pm 83$ 0,55
		19–24	$M \pm t$ $p$	$236 \pm 39$ > 0,95	$249 \pm 50$ > 0,99	$324 \pm 48$ 0,89

Примітка.  $p$  – достовірність різниці між заданою і максимальною швидкістю росту за тих же умов досліджу.

\*\* – достовірність різниці порівняно з контролем.

Виявлені достовірні зміни середньої швидкості росту в різних часових інтервалах першої доби вегетації (порівняно велика й високодостовірна частка впливу фактора тривалості росту), очевидно, можна вважати пов'язаними з циркадною ритмікою ростових процесів [8]. Водночас, переважаючий вплив не врахованих у цьому дослідженні факторів, які зумовлюють значні флуктуації щогодинного приросту корінців, може свідчити про наявність ще й інфрадіанної (кількагодинної) ритміки, що потребує спеціальних досліджень.

1. *Бахтиаров Р.С., Радун Ф.Л., Барбаянов Т.А.* и др. Влияние фотоактивирования семян на устойчивость ячменя к гельминтоспориозным заболеваниям // Методы предпосевной обработки семян с/х культур электромагнитными полями. М.: ВСХИЗ, 1990. С.90-91
2. *Володин Н.И., Ерышева Д.А., Лисовская З.И.* и др. Влияние лазерного света на мутационную изменчивость ячменя. // Тез. докл. Всесоюз. конф. по фото-энергетике. Вильнюс: Вильн.ГУ, 1980. С.68-69.
3. *Инюшин В.М., Ильясов Г.И., Федорова Н.Н.* Лазер – стимулятор развития с/х культур. Алма-Ата: Кайнар, 1973. 112 с.
4. *Капелев О.И.* Повышение продуктивности котовника лимонного лазерным облучением // Проблемы фотоэнергетики растений и урожайности. Львов, 1984. С.161-162.
5. Компьютерная биометрика/Под ред. В.Н.Носова. М.:Изд-во МГУ, 1990. 232с.
6. *Любищев А.А.* Дисперсионный анализ в биологии. М.: Изд-во МГУ, 1986. 200 с.
7. *Скварко К.О.* Лазерна фотоактивація насіння: Перспективи, рекомендації. Львів: Вид. Львів. ун-ту, 1994. 52 с.
8. *Слинявчук Г.Д., Гродзінський Д.М.* Вплив іонізуючого випромінювання на ритмічний ріст колеоптелів вівса // Всеукр. наук. конф. "Екологічний стрес і адаптація в біосистемах". Тернопіль, 1998. С.21-22.

## MATHEMATICAL ANALYSIS OF *Lepidium sativum* L. GROWTH DYNAMICS TO DEPEND ON TIME CONDITIONS OF LASER STIMULATION

R. Humetskyi, K. Skvarko

*Ivan Franko National University of L'viv,  
Hrushevskoho st., 4, L'viv 79005, Ukraine,  
e-mail: biolog@franko.lviv.ua*

The biometric methods such as ANOVA and comparative analysis were applied to investigation of growth dynamics for *Lepidium sativum* L. under control conditions after the morning and the evening laser photo-activation of its seeds. It is established that laser irradiation at the evening period reduces the time of seeds germination for 10–12 hours in comparison with the morning one.

Out of the investigated factors effecting growth parameters, namely regime of laser irradiation (uninterrupted or scanned), period of irradiating and duration of growth, the variation of growth speed on the sequential time intervals is dominating. The effect of scanned irradiation is more strong than uninterrupted one. The influence of time period of seed photo-activation and sowing is statistically significant only in interaction with other investigated factors.

*Keywords:* *Lepidium sativum*, plant growth, laser stimulation, biometrical analysis.

Стаття надійшла до редколегії 23.06.2001

Прийнята до друку 16.07.2001