

Научная статья  
УДК 539.163:635.5

## ПРОЯВЛЕНИЕ ВЗАИМОЗАМЕСТИМОСТИ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ В СВЕТОКУЛЬТУРЕ САЛАТА

<sup>1</sup>Елена Николаевна Ракутько, <sup>2</sup>Александр Николаевич Васькин

<sup>1</sup>Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

**Аннотация.** Разработка научных основ и практических методов управления светокulturой представляет собой перспективное направление исследований, нацеленное на оптимизацию энергоэффективности и экологических показателей аграрного производства. В основе данного исследования лежит комплексный анализ корреляционных связей между энергетическими характеристиками оптического излучения и фотосинтетической активностью растительных организмов. Следует подчеркнуть, что выявленные закономерности формируют теоретический базис для становления нового междисциплинарного научного направления - энергоэкологии светокультуры, интегрирующего подходы физической оптики, физиологии растений и агротехнологий. Полученные результаты открывают широкие перспективы для разработки инновационных методов оптимизации условий культивирования сельскохозяйственных культур. Эксперимент проводился в лабораторных условиях при отсутствии естественного освещения. В четырёх зонах помещения были установлены светодиодные облучатели, обеспечивающие заданную дозу облучения  $H = ET$  при постоянном спектральном составе. Уровни облученности ( $E$ ) составляли 12,5; 15; 20 и 30 Вт·м<sup>-2</sup>, а значения фотопериода ( $T$ ) - 24, 20, 15 и 10 часов. Спектральный состав излучения поддерживался в соотношении: синий  $k_B$  (400-500 нм) - 30%, зелёный  $k_G$  (500-600 нм) - 20%, красный  $k_R$  (600-700 нм) - 50%. У растений одного возраста регистрировали количество и геометрические размеры листьев, которые группировали по порядку их появления. Площадь листовой поверхности определяли по эмпирической формуле, полученной в предварительных опытах. Были предложены модели зависимости площади листьев от условий освещения. Установлено, что при одинаковой общей дозе облучения растения салата имеют статистически неразличимую продуктивность по сырой массе. Отклонения от закона взаимозаменяемости не превышали 6,1%, при среднем значении относительной ошибки 2,7%. Зависимость точности соблюдения закона от величины дозы или её компонентов (облученности или фотопериода) не выявлена.

**Ключевые слова:** светокultura, закон взаимозаменяемости, энергоэкология, облученность, фотопериод, доза, площадь листьев.

**Для цитирования:** Ракутько Е.Н., Васькин А.Н. Проявление взаимозаменяемости составляющих дозы облучения в светокультуре салата // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 6 (112). С. 54-60.

### Original article

## MANIFESTATION OF RECIPROCITY OF RADIATION DOSE COMPONENTS IN LIGHT CULTURE OF LETTUCE

<sup>1</sup>Yelena N. Rakut'ko, <sup>2</sup>Alexandr N. Vas'kin

<sup>1</sup> Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production (IAEP) - Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Center of VIM, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Bryansk State Agrarian University, Bryansk Region, Kokino, Russia

**Abstract:** A development of scientific foundations and practical methods for managing light culture is a promising area of research aimed at optimizing energy efficiency and environmental indicators of agricultural production. This research is based on a comprehensive analysis of correlations between the energy characteristics of optical radiation and the photosynthetic activity of plant organisms. It should be emphasized that the identified patterns form the theoretical basis for the development of a new interdisciplinary scientific field - energy ecology of light culture, integrating approaches from physical optics, plant physiology and agricultural technology. The obtained results open up broad prospects for the development of innovative methods for optimizing the conditions for cultivating crops. The experiment was conducted in the laboratory conditions in the absence of natural light. LED illuminators were installed in four zones of the room, providing a specified irradiation dose  $H = ET$  with a constant spectral composition. Irradiance levels ( $E$ ) were 12.5; 15; 20, and 30 W m<sup>-2</sup>, and photoperiods ( $T$ ) were 24, 20, 15, and 10 hours. The spectral composition of the radiation was maintained at the following ratio: blue  $k_B$  (400-500 nm) - 30%, green  $k_G$  (500-600 nm) - 20%, red  $k_R$  (600-700 nm) - 50%. The number and geometric dimensions of leaves were recorded for plants of the

same age, which were grouped according to the order of their appearance. The leaf surface area was determined using an empirical formula obtained in preliminary experiments. Models of the dependence of leaf area on lighting conditions were proposed. It was found that, with the same total radiation dose, lettuce plants exhibit statistically indistinguishable productivity in terms of fresh weight. Deviations from the reciprocity law did not exceed 6.1%, with an average relative error of 2.7%. The dependence of the accuracy of compliance with the law on the dose or its components (irradiation or photoperiod) was not detected.

**Keywords:** light culture, reciprocity law, energy ecology, irradiance, photoperiod, dose, leaf area.

**For citation:** Rakut'ko Ye.N., Vas'kin A.N. Manifestation of Reciprocity of Radiation Dose Components in Light Culture of Lettuce// Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2025. №6 (112): pp.54-60.

**Введение.** Оптическое излучение  $H(t)$  занимает ключевую долю в структуре затрат при выращивании культур. Между тем свет дает возможности оптимизации цикла фотосинтеза в растениях  $D(t)$ . Регулируют интенсивность, длительность и спектр, управляя морфогенезом и продуктивностью. Например, соотношение синего и красного перестраивает архитектуру листьев. Однако избыточная яркость повышает энергопотребление без эквивалентной прибавки биомассы.

В светокультуре возрастает значение изучения закономерностей проявления закона Бунзена-Роско. Впоследствии анализ механизмов взаимозаместимости факторов освещения позволяет выстраивать режимы с минимальным энергопотреблением. В целом упомянутая база поддерживает разработку энергоэффективных и экологических технологий промышленного растениеводства [1,2,3].

Закон взаимозаместимости, установленный при исследовании фотохимических процессов, описывает зависимость отклика объекта от произведения двух ключевых параметров — интенсивности излучения  $E$  и времени его действия  $T$  т.е. дозой  $H=ET$ . При обратно пропорциональном изменении указанных величин доза, характеризующая суммарный эффект облучения, остаётся постоянной. Например, уменьшение облучённости вдвое нейтрализуется двукратным увеличением продолжительности фотопериода, что приводит к тому же конечному результату [4,5].

Исследуемую закономерность обнаруживают при протекании первичной фотохимической реакции без вторичных процессов и ингибирования, включая влияние образующихся продуктов на общую скорость превращений. Математическое выражение закона для площади листьев растений в светокультуре будет иметь вид:

$$\begin{cases} S_1(H) = S_2(H) = const \\ H = E_1 T_2 = E_2 T_1 \end{cases} \quad (1)$$

Известно явление нарушения закона взаимозаместимости, при котором:

$$S_1(H) \neq S_2(H) \quad (2)$$

Проведённый анализ показал, что величина экспозиции не обеспечивает точного прогноза ответной реакции объекта. Ранее выполненные эксперименты были направлены на проверку соблюдения принципа взаимозаместимости, при которой ключевым критерием выступала сырая масса [6,7]. Однако фиксируемая зависимость оставалась неполной, что требовало осторожной интерпретации полученных откликов.

**Цель работы** - выявление степени соответствия площади листовой поверхности салата в светокультуре закону взаимозаместимости составляющих дозы облучения

**Материалы, методы и объекты исследования.** Указанный закон трактует равнозначность показателей площади листовой поверхности при одинаковых дозах облучения  $H$ , где  $H$  определяется произведением интенсивности светового потока  $E$  на длительность фотопериода  $T$ . При матричном анализе  $H(T,E)$  критерием строгого выполнения закона выступает симметрия значений относительно диагональной оси; при зеркальном отображении верхняя и нижняя части матрицы должны давать полностью совпадающие величины площади листьев.

Экспериментальная часть исследования была организована на материале салата Афицион (*Lactuca Sativa* L.). Исследователи выбрали культуру из за высокой потребительской востребованности в холодный сезон. На продуктивность в наибольшей мере влияет площадь листовой поверхности, что учитывали при планировании опытов.

Семена высевали в агроперлитный субстрат, после чего на фазе первого настоящего листа проводили пикировку. Пересаженные растения размещали в горшках PR-360, заполненных агроперлитом; в каждом находились по три экземпляра. Выращивание продолжали на поддонах под непрерывным освещением натриевыми лампами, где подавали питательный раствор ( $EC=1,6$  мСм·см<sup>-1</sup>). По достижении стадии третьего настоящего листа растения переносили в лабораторные гидропонные установки коробчатого типа. Затем культивирование продолжали уже в гидропонных системах указанной конструкции [8,9].

Субстрат формировали путем смешивания верхового торфа с перлитом в пропорции 2:1. Торф отличался низкой степенью разложения - около 10%, высоким содержанием органического вещества - до 95%, при зольности 10%. Исходный pH равнялся 3,8; для доведения до оптимального диапазона 6,0-6,2 применяли агромел.

Питательность обеспечивали комплексом минеральных удобрений, рассчитанным на массу торфа. На каждый килограмм вносили 0,5 г калийной селитры ( $\text{KNO}_3$ ), 0,3 г монокалийфосфата ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) и 0,5 г сульфата магния ( $\text{MgSO}_4$ ). В целом такая схема покрывает потребности по основным макроэлементам. Между тем дозировки заданы с учетом исходной зольности. Например, доля калия и фосфора согласована с кислотностью после известкования.

Для насыщения субстрата микроэлементами готовили концентрат. В одном литре воды растворяли борную кислоту  $\text{H}_3\text{BO}_3$  - 2,86 г, сульфат марганца  $\text{MnSO}_4$  - 1,8 г, сульфат меди  $\text{CuSO}_4$  - 0,08 г и молибденовокислый аммоний  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  - 0,1 г. Рабочую смесь получали разведением 1 мл указанного концентрата на литр воды. Впоследствии полученный раствор использовали для полива или увлажнения субстрата.



Рисунок 1 - Размещение растений салата на гидропонной установке

Формирование питательных растворов осуществлялось на основе комплексного сочетания макро- и микроэлементов, применяемых в промышленном тепличном производстве. При этом учитывались физиологические особенности и потребности культуры в минеральном питании. Мониторинг концентраций элементов питания и их своевременная корректировка проводились для каждого экспериментального варианта с использованием высокоточного аналитического оборудования — кондуктометра DISTWP4, pH-метра-иономера модели «Эксперт-001» и спектрофотокалориметра ПЭ5400В, что обеспечивало надежную воспроизводимость условий эксперимента.

В качестве субстрата для культивирования салата в условиях проточной гидропоники был выбран гранулированный агроперлит, характеризующийся практически нулевой ионообменной емкостью и низким объемным весом ( $94\text{--}117 \text{ кг/м}^3$ ). Данный материал отличается высокими показателями пористости (65-82%), при этом его электропроводность не превышает 0,2, а значения pH находятся в диапазоне 6,5-7,5.

Эксперимент проводили в изолированной лаборатории при контролируемых параметрах среды. Кондиционирование воздуха поддерживало устойчивый температурный режим  $+22 - +24^\circ\text{C}$ . Параметры микроклимата удерживали на оптимальном уровне: относительная влажность составляла 55 - 60%, скорость движения воздуха находилась в пределах  $0,05 - 0,25 \text{ м/с}$ .

Конструкцию установки разделили на четыре экспериментальные зоны, оснащенные светодиодными облучателями с индивидуально настроенными режимами излучения. В ходе опытов изменяли два ключевых параметра: облученность с уровнями  $E=12,5; 15; 20; 30 \text{ Вт/м}^2$  при значениях фотопериода  $T=24; 20; 15; 10 \text{ ч}$ .

В процессе экспериментального исследования осуществлялась корректировка уровня облученности посредством варьирования дистанции между источниками светового излучения и апикальными частями растений в различных зонах экспериментального помещения. В качестве осветительных приборов использовались специализированные модульные конструкции — светодиодные панели с интегрированной системой термического регулирования, выполненные на алюминиевой основе с радиаторной функцией (габаритные размеры  $1,0 \times 0,25 \text{ м}$ ). Оснастку формировали светодиоды ARPL-Star-3W, их численность выбрали по задачам исследования, а электропитание подавали через блоки HTS-200M-12 для стабильности режима работы системы.

Спектральные характеристики источников света обеспечивались комбинацией трех типов светодиодов. Применялись синие 460 нм (полуширина пика 25 нм), зеленые 516 нм (полуширина 45 нм) и красные 633 нм (полуширина 21 нм). Спектральный состав регулировали изменением тока для каждого типа.

Во всех осветительных приборах поддерживали энергетическое распределение потоков в пропорции 30/20/50. Доли приходились на синий, зеленый и красный участки спектра соответственно.

Точность распределения оценивали по среднеквадратическому отклонению, не превышавшему 2,3% от установленных величин. Полученное значение укладывалось в требуемые пределы. В целом полученная конфигурация позволяла стабильно воспроизводить требуемый спектр.

Растения для оценки биометрических параметров отбирали в центральной зоне посадок. Там поддерживалась равномерная освещённость, отклонение не выше 20%. Тем самым повышали корректность измерений.

В работе использовали интегральную модель, описывающую динамику вегетативного развития растений. Анализ прослеживал изменения массы и площади каждого листового органа на протяжении полного цикла культивации. Протокол исследования предусматривал объединение листьев одной возрастной когорты в последовательности их закладки на стебле, что обеспечивало сопоставимость наблюдений. В процессе проведения экспериментальных исследований осуществлялась детальная фиксация морфометрических показателей фотосинтетического аппарата растений. При этом особое внимание уделялось количественной оценке следующих параметров: общему числу листьев на исследуемом экземпляре, максимальной протяженности листовой пластины вдоль центральной жилки, а также наибольшему поперечному размеру каждого отдельного листа — что позволило получить комплексную характеристику листового аппарата изучаемых растений.

Суммарная площадь листовой поверхности растений салата определялась с высокой степенью достоверности посредством математической формулы, полученной в ходе предварительных экспериментальных исследований. Данный методологический подход — апробированный в серии предшествующих опытов — позволил обеспечить требуемую точность измерений при минимизации временных затрат на проведение анализа. Следует отметить, что использованный алгоритм расчета базируется на установленных корреляционных зависимостях между морфометрическими показателями листового аппарата исследуемой культуры.

$$S = \sum_{n=1}^N k_n A_n B_n, \quad (3)$$

где  $k_n$  - коэффициент формы  $n$ -го листа.

В рамках проведенной экспериментальной серии осуществлялась комплексная оценка суммарной площади листового аппарата при вариативных комбинациях параметров облученности и фотопериодического режима. Исследование охватывало четыре фундаментальных несовместимых состояния системы -  $S_{11}$  (соответствующее уровню облученности  $E_1$  и фотопериоду  $T_1$ ),  $S_{21}$  (при значениях  $E_2$  и  $T_1$ ),  $S_{12}$  (характеризующееся параметрами  $E_1$  и  $T_2$ ), а также  $S_{22}$  (при сочетании факторов  $E_2$  и  $T_2$ ). На основе результатов построили интерполяционные зависимости  $S=f(E)$  при фиксированном  $T=const$ , что позволило вычислить  $S_{e1}$  и  $S_{e2}$ . Затем при постоянной облученности  $E=const$  проанализировали связи  $S=f(T)$  и определили промежуточные показатели  $S_{1t}$ ,  $S_{et}$  и  $S_{2t}$ . Вычисленные величины сведены в таблицу 1, где отражены взаимозаменяемые компоненты дозы облучения.

Таблица 1. К методике вычисления площади листьев при взаимозаменяемых значениях составляющих дозы

Фотопериод $T$	Облученность $E$		
	$E_1$	$e$	$E_2$
$T_1$	$S_{11}$	$S_{e1}$	$S_{21}$
$t$	$S_{1t}$	$S_{et}$	$S_{2t}$
$T_2$	$S_{12}$	$S_{e2}$	$S_{22}$

В сравнительном эксперименте анализировали листовые пластины площадей  $S_1$  и  $S_2$ , получавшие одинаковую дозу облучения  $H$ . Эквивалентность доз обеспечивалась равенством произведений энергетической освещённости и времени экспозиции:  $E_1 T_2 = E_2 T_1$ . Пары параметров, удовлетворяющие приведённому соотношению, в матрице результатов располагались симметрично относительно главной диагонали.

**Результаты исследования.** На представленных рисунках 2 и 3 отражены корреляционные связи между площадью листовой поверхности и такими ключевыми факторами внешней среды, как интенсивность светового потока и продолжительность фотопериода. Данные графические зависимости — являющиеся результатом экспериментальных наблюдений — наглядно демонстрируют характер влияния указанных параметров на развитие ассимиляционного аппарата растений. При этом следует подчеркнуть, что полученные корреляции носят нелинейный характер, что свидетельствует о комплексном характере фотоморфогенетических реакций исследуемых образцов.

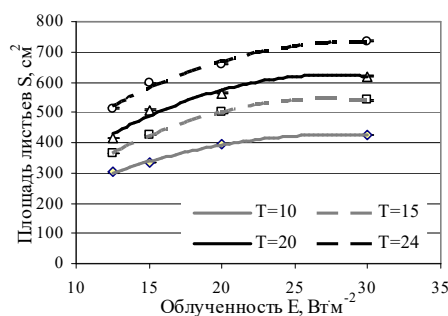


Рисунок 2 - Зависимости площади листьев от облученности

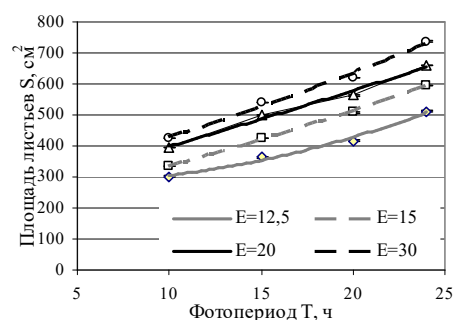


Рисунок 3 - Зависимости площади листьев от фотопериода

Расчеты по методу наименьших квадратов позволили определить коэффициенты полиномов второй степени. Выбор степени полинома обусловлен плавным профилем полученных кривых аппроксимации. При фиксированных значениях фотопериода  $T$  ч. удалось получить аппроксимационные выражения, описывающие зависимость площади листьев  $S$ , см<sup>2</sup> от уровня облученности  $E$ , Вт·м<sup>-2</sup>.

$$S = -0,516E^2 + 29,063E + 17,678 \text{ при } T=10 \text{ ч } (R^2 = 0,9980),$$

$$S = -0,813E^2 + 44,469E - 62,316 \text{ при } T=15 \text{ ч } (R^2 = 0,9984),$$

$$S = -0,862E^2 + 47,528E - 31,493 \text{ при } T=20 \text{ ч } (R^2 = 0,9706),$$

$$S = -0,728E^2 + 43,198E + 95,333 \text{ при } T=24 \text{ ч } (R^2 = 0,9857).$$

Аппроксимационные формулы для зависимости площади листьев  $S$ , см<sup>2</sup> от фотопериода  $T$ , ч. при фиксированных значениях облученности  $E$ , Вт·м<sup>-2</sup>

$$S = 0,544T^2 - 4,097T + 292,17 \text{ при } E=12,5 \text{ Вт·м}^{-2} (R^2 = 0,9877),$$

$$S = 0,144T^2 + 13,445T + 186,78 \text{ при } E=15 \text{ Вт·м}^{-2} (R^2 = 0,9983),$$

$$S = 0,067T^2 + 16,002T + 231,59 \text{ при } E=20 \text{ Вт·м}^{-2} (R^2 = 0,9887),$$

$$S = 0,231T^2 + 13,684T + 269,25 \text{ при } E=30 \text{ Вт·м}^{-2} (R^2 = 0,9909).$$

Данные зависимости построены непосредственно по полученным экспериментальным данным.

Аппроксимационные формулы для зависимости площади  $S$ , см<sup>2</sup> от облученности  $E$ , Вт·м<sup>-2</sup> при промежуточных значениях фотопериода  $T$ , ч.

$$S = -0,695T^2 + 38,027T - 39,174 \text{ при } T=12,5 \text{ ч } (R^2 = 0,9992),$$

$$S = -0,868T^2 + 47,405T - 62,183 \text{ при } T=17,5 \text{ ч } (R^2 = 0,9874),$$

$$S = -0,815T^2 + 46,371T + 23,322 \text{ при } T=22 \text{ ч } (R^2 = 0,9817).$$

Установленные функциональные зависимости были определены для значений фотопериодического режима, которые, хотя и не были непосредственно реализованы в экспериментальных условиях, тем не менее являются необходимыми компонентами при формировании взаимозаменяемых комбинаций параметров. Данный методологический подход — как показывает анализ полученных результатов — позволяет осуществить комплексную оценку исследуемых показателей с учетом их потенциальной вариативности.

Полученные значения площади листьев приведены в табл. 2.

Таблица 2. Интеполированные значения  $S$  листьев для взаимозаменяемых сочетаний  $T$  и  $E$ 

Фотопериод $T$ , ч	Облученность $E$ , Вт·м <sup>-2</sup>					
	12,5	15	17,5	20	22	24
12,5	326,09	377,47	413,45	442,08	461,04	473,15
15	364,00	426,00	466,79	499,56	522,32	536,42
17,5	387,34	466,42	501,49	532,14	560,47	575,40
20	416,19	508,00	536,26	564,00	596,92	612,67
22	465,75	552,66	585,16	616,06	648,93	666,67
24	512,49	595,07	628,16	660,00	693,05	712,41

Таблица 3 содержит анализ взаимосвязи дозовых нагрузок и морфометрических параметров листьев. Для сопоставления использовали пары значений с равными дозовыми характеристиками  $E_1T_2=E_2T_1$ . Пары расположены симметрично относительно главной диагонали таблицы 2. Тем самым соблюдается принцип зеркального сравнения.

Для каждой пары определяли площади листьев  $S1$  и  $S2$ . Далее вычисляли абсолютные значения разницы площади листьев  $\Delta=S1-S2$ , и ее относительные значения  $\delta=100|\Delta|/S1$ . При оценке относительных отклонений применяли модуль разности площадей, поскольку направление расхождения не

влияло на точность измерений. Выбор модульных величин исключал компенсацию разнонаправленных ошибок. Описанная процедура обеспечивала корректную проверку согласованности измерений.

Таблица 3. Численная оценка соблюдения закона взаимозаменяемости

Доза $H$ , Вт·ч·м <sup>-2</sup>	$S_1$	$S_2$	Абс. ошибка $\Delta$ , г	Отн. ошибка $\delta$ , %
187,50	364,00	377,47	13,47	4,0
262,50	466,42	466,79	0,37	5,3
350,00	536,26	532,14	-4,12	0,3
440,00	616,06	596,92	-19,15	0,1
528,00	693,05	666,67	-26,38	1,6
218,75	387,34	413,45	26,12	4,2
300,00	508,00	499,56	-8,44	5,9
385,00	585,16	560,47	-24,69	6,1
480,00	660,00	612,67	-47,33	1,9
250,00	416,19	442,08	25,89	0,5
330,00	552,66	522,32	-30,35	4,4
420,00	628,16	575,39	-52,77	3,4
275,00	465,75	461,04	-4,71	0,7
360,00	595,07	536,42	-58,65	2,5
300,00	512,49	473,15	-39,33	3,6

Представленная на рисунке 4 зависимость, отражающая корреляцию между площадью листовой поверхности и суточной дозой радиационного воздействия, базируется на анализе значений, расположенных по главной диагонали промежуточной таблицы измерений. Данная графическая интерпретация наглядно демонстрирует характер взаимосвязи исследуемых параметров, что позволяет сделать выводы об их функциональном соотношении. Зависимость имеет линейный характер при высоком значении коэффициента корреляции.

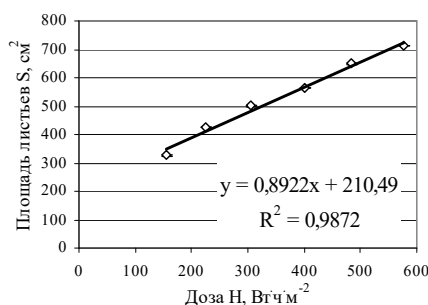


Рисунок 4 - Зависимость площади листьев от суточной дозы облучения

### Выводы.

В специально оснащённой лаборатории изучали реакцию растений салата при гидропонном выращивании под LED осветителями. Культивирование велось в строго регламентированных условиях: задан суточный фотопериод и тщательно подобран спектральный состав излучения. Критерием оценки эффективности режимов облучения принята интенсивность фотосинтеза, что напрямую определяет продуктивность культуры. Полученный массив наблюдений послужил основой для построения математической модели развития салата при искусственном освещении.

Опытно-экспериментальные исследования выявили математические зависимости, описывающие изменение площади листовой поверхности салата при изменении длительности светового дня и интенсивности облучения. Анализ позволил составить аппроксимирующие формулы. Параметры определяли на основе серии измерений и наблюдений.

Выявление количественных связей между экологическими факторами и ростом растений формирует базу для управляемости производственного процесса. Опираясь на проверенные математические зависимости, агроном регулирует вегетацию. Комбинировать внешние условия по расчётным схемам позволяет получать устойчивые максимумы урожайности. Исследования выявили устойчивую связь между энергетикой оптического потока и биосинтезом органических соединений при фотосинтезе растений. На материале салата исследовательская группа подтвердила действие закона взаимозаменяемости: суммарная доза светового воздействия определяет наращивание листового аппарата



В опытной серии при эквивалентных уровнях светового потока и длительности фотопериода разброс продуктивности растений оказался небольшим. Максимальная величина отклонений не превысила 6,1%. Среднее отклонение составило 2,7%, что подтверждает высокую точность измерений.

Проведённые расчёты уточнили степень проявления закона взаимозаместимости в рассматриваемых условиях. При сопоставлении доз облучения с величиной относительной погрешности связь не обнаружена. Однако трендов, указывающих на зависимость ошибки от параметров светового воздействия, не выявлено. Полученные сведения подтверждают независимый характер действия закона относительно интенсивности, длительности и их комбинаций. В целом совокупность наблюдений указывает на устойчивость эффекта к вариациям компонентов светового режима.

Использование экспериментальных данных позволяет совершенствовать агротехнические методики, регулируя освещение и климат при выращивании сельскохозяйственных культур. На их основе агроном задаёт оптимальные условия, соотнося параметры с фазой развития и видом растения. Повышает эффективность растениеводства и делает управление более предсказуемым.

#### Список источников

1. Васькин А.Н., Ракутько Е.Н. Новый подход к определению энергоэффективности светокультуры // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 6 (106). С. 71-77.
2. Ковальчук М.В., Гавриш С.Ф. Оценка сортов салата различных сортотипов на пригодность выращивания в проточной гидропонике // Материалы междунар. научн. конф., посвященной 135-летию со дня рождения А.Н. Костянова. М.: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. С. 297.
3. Иванова М.И. Сурихина Т.Н. Размер и тенденции роста рынка листовых овощей // Картофель и овощи. 2024. № 3. С. 17-22. DOI: 10.25630/PAV.2024.70.79.002.4.
4. Васькин А.Н., Ракутько С.А. Расчет параметров радиационной среды от светодиодного фито-облучателя // Вестник Брянской ГСХА. 2023 № 5 (99). С. 67-74.
5. Ракутько Е.Н., Васькин А.Н. Энергоэкологичность светокультуры салата при различных дозах излучения // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 1 (107). С. 75-79.
6. Васькин А.Н., Ракутько Е.Н. Новый подход к определению энергоэффективности светокультуры // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 6 (106). С. 71-77.
7. Волкова Е.Н. Влияние азотного стресса на аккумуляцию нитратов и урожайность сортов салата // Овощи России. 2023. № 1. С. 44-45.
8. Кулешова Т.Э., Удалова О.Р., Балашова И.Т. Влияние различных источников света на продукционный процесс томата в интенсивной светокультуре // Овощи России. 2021. № 4. С. 65-70.
9. Влияние дозы уф-с облучения на развитие ювенильных растений перца (*capsicum annuum* l.) / С.А. Ракутько, А.П. Мишанов, А.Е. Маркова и др. // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 1 (110). С. 3-19.

#### Информация об авторах:

**Е.Н. Ракутько** - научный сотрудник Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

**А.Н. Васькин** - старший преподаватель кафедры автоматики, физики и математики, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

#### Information about the authors:

**Ye.N. Rakut'ko** - Research Associate at the Institute of Agricultural Engineering and Environmental Problems of Agricultural Production (IEEP) - branch of FSBSI FSAC VIM.

**A.N. Vas'kin** - Senior Lecturer of the Department of Automation, Physics and Mathematics, Bryansk State Agrarian University.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025, одобрена после рецензирования 25.11.2025, принята к публикации 01.12.2025.

The article was submitted 22.10.2025, approved after reviewing 25.11.2025, accepted for publication 01.12.2025.

© Ракутько Е.Н., Васькин А.Н.