

Р.А. Загуменный, А.В. Николаева, И.И. Стрельников

## ДИНАМИКА ПРИРОСТА БИОМАССЫ *LACTUCA SATIVA* L. В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСВЕЩЕНИЯ

Государственное учреждение «Донецкий ботанический сад»

Изучена зависимость длины листьев разной генерации салата листового (*Lactuca sativa* L.) от уровня дополнительного освещения натриевыми лампами. Возрастное изменение скорости прироста длины у всех исследуемых генераций листьев в вариантах с затенением 0 % и 50 % происходило на протяжении первых 4-х недель с момента появления всходов. В варианте с затенением 75 % наблюдается проявление специфики в динамике прироста у каждой генерации листьев. С момента появления всходов до 21-х суток роста, растения в варианте с затенением 0 % имеют наибольшие значения относительной скорости роста (ОСР), чем растения в других вариантах. Снижение уровня освещенности вызывает значительное снижение накопления общей, надземной и подземной биомасс сухого вещества у экспериментальных растений, а также вызывает сдвиг соотношения надземной и подземной биомассы в сторону накопления надземной. Предложено обеспечение максимального уровня интенсивности освещения для оптимизации тепличной культуры салата на ранних этапах развития (до 28 дня с начала роста).

**Ключевые слова:** интенсивность освещения, прирост биомассы, относительная скорость роста, натриевые лампы

### Введение

Ростовые процессы и фотосинтез тесно связаны друг с другом, и от их сбалансированности зависит продуктивность культивирования растений. Посредством дополнительного освещения, можно воздействовать на направление потоков ассимилятов и, тем самым, регулировать процессы накопления биомассы [1]. Недостаточная интенсивность естественного света приводит к значительному снижению скорости развития корневой системы у молодых растений. При этом избыточное освещение может вызывать перегрев листовых пластин и истощение фотосинтетических систем. В таких условиях интенсивность фотосинтеза снижается, а интенсивность дыхания, наоборот, возрастает, что негативно сказывается на динамике накопления биомассы [2].

Одной из главных проблем культивирования растений в условиях защищенного грунта является то, что световые характеристики смоделированной среды значительно отклоняются от желаемого оптимума и почти полностью зависят от

климатической ситуации данной местности. Решением данной проблемы является применение искусственного освещения либо в качестве дополнительного к солнечному для удлинения короткого дня и увеличения интенсивности в осенне-зимний период, либо постоянного. Несмотря на значительный опыт выращивания растений с применением искусственных источников света [3–6], в настоящее время нет единого взгляда на оптимальные уровни и спектральный состав излучения в ростовой зоне, применительно к определенным видам растений. Практически в каждом случае при разработке технологий круглогодичного культивирования того или иного вида, требуется создание оригинальной системы освещения, в наибольшей степени отвечающей физиологическим потребностям выращиваемых растений.

Изучение и описание динамики роста растений в условиях закрытого грунта при разных уровнях освещенности является весьма востребовано, так как без ее знания невозможно получение эффективной оценки культивирования растений.

**Цели и задачи**

Целью исследования является изучение зависимости динамики накопления биомассы салата листового (*Lactuca sativa* L.) от уровня дополнительного освещения натриевыми лампами. В связи с этим поставлены следующие задачи:

- 1) изучить динамику ростовых характеристик растений салата, сформированных в различных световых условиях;
- 2) оценить влияние интенсивности освещения на изменение относительной скорости роста у модельных растений;
- 3) выявить различия в накоплении биомассы целого растения и его частей при различных световых режимах.

**Объекты и методики исследований**

Объектом изучения являлся салат листовой *Lactuca sativa* L., сорт «Гранд Рапидс». Данный вид является однолетней, быстрорастущей культурой, очень чувствительной к недостаточному освещению [3], что обеспечивает получение в быстрые сроки необходимого количества биоматериала со значительной степенью варьирования в различных световых режимах.

Материал исследования – надземная и подземная части растений салата листового *Lactuca sativa*, сформированных в условиях с различной интенсивностью освещения.

Выращивание растений салата проводилось в фондовых оранжереях Донецкого ботанического сада в период с октября по декабрь. При проведении исследования дневная температура воздуха была в пределах от +13 до +23 °С в среднем составил 17 °С, а относительная влажность воздуха – 88–96 %.

Для получения однородных всходов перед посевом семена салата были замочены в чашках Петри для проращивания. Пророщенные семена бы-

ли высажены по одному в пластиковые контейнеры. Глубина посева семян составляла 0,5 см. Всходы появились на вторые сутки после посева.

Посевным субстратом являлась почвосмесь, состоящая из торфа, дерновой земли и песка в соотношении 6:2:2 с добавлением 1,5 г аммиачной селитры, 2 г суперфосфата и 1,5 г сульфата калия на 10 л почвосмеси.

После посева пророщенных семян пластиковые контейнеры были помещены в установку с участками с различной степенью притенения с горизонтальным расположением натриевых ламп. Размер выборки в каждой градации фактора – 60 растений, общий размер опыта – 180 растений.

Для обеспечения необходимого фотопериода и уровня освещения в дополнение к естественному свету использовали досветку натриевыми лампами PHILIPS MASTER Green Power 600W/400V. Данный тип ламп обладает улучшенными характеристиками ассимиляционного освещения, так как спектральный состав излучаемого ими света обладает высокой интенсивностью в области фотосинтетически активной радиации, что обеспечивает стимулирование процесса усвоения CO<sub>2</sub>, ускоряет фотосинтез и рост растений [7]. Досвечивание натриевыми лампами осуществляли с момента появления первых всходов и до конца эксперимента. Обеспечиваемый фотопериод составлял 10 ч.

Исследуемый фактор – интенсивность освещения в трех градациях: без притенения (полный уровень нормальной освещенности, лк); при среднем притенении (приблизительно 50 % от полного уровня нормальной освещенности, лк); с сильным притенением (приблизительно 25 % от полного уровня нормальной освещенности, лк) (табл.1).

Таблица 1. Показатели режима освещенности растений салата листового *Lactuca sativa* L. в период проведения исследования

Режим освещенности	Среднее значение интенсивности освещения, лк	Среднее значение доступного освещения, %
	M ± m	
Без притенения	7778.76 ± 345.95	100 ± 0
Легкое притенение	4134.9 ± 98.16	55.28 ± 1.42
Сильное притенение	2273.05 ± 83,62	29.64 ± 0,66

Примечание: M ± m – среднее арифметическое ± ошибка среднего

Для исследования биометрических показателей исследовали по 10 растений из каждого варианта с временным интервалом в одну неделю. Первый отбор растений производился с момента формирования у них трех настоящих листьев. Всего было произведено шесть отборов – на 14-е, 21-е, 28-е, 35-е, 42-е и 49-е сутки с момента появления всходов. У растений измерялась длина первых трех настоящих листьев, после чего их высушивали при + 63 °С в течение 72 ч. Высушенные растения разделялись на надземную и подземную части и взвешивались на аналитических весах.

На основе полученных результатов относительная скорость роста растений (ОСР, г/сут) рассчитана по формуле:

$$\text{ОСР} = (\ln M_2 - \ln M_1) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  – сухая масса надземной части растений в период времени  $t_1$  и  $t_2$  [7].

Для расчета ОСР была применена методология бутстрэп анализа. ОСР в дату наблюдения  $t$  рассчитывалась относительно даты наблюдения  $t-1$  по формуле (1). При этом средние значения ОСР и 95 % доверительные интервалы для каждой даты наблюдения рассчитывались на основе распределения значений ОСР, полученных на Монте-Карло выборках [8, 9].

Различия в длине исследуемых генераций листьев были установлены с применением обобщенных аддитивных моделей, в реализации библиотеки *mgcv* [10] языка программирования R v.3.4 [11]. Модель строили по схеме ковариационного анализа. В качестве зависимой переменной выступал показатель «длина листа», предикторами являлись: непрерывная величина «время» и категории «% затенения». В качестве сглаживающей функции выбран тензорный сплайн с числом степеней свободы, равным 4.

#### Результаты исследований и их обсуждение

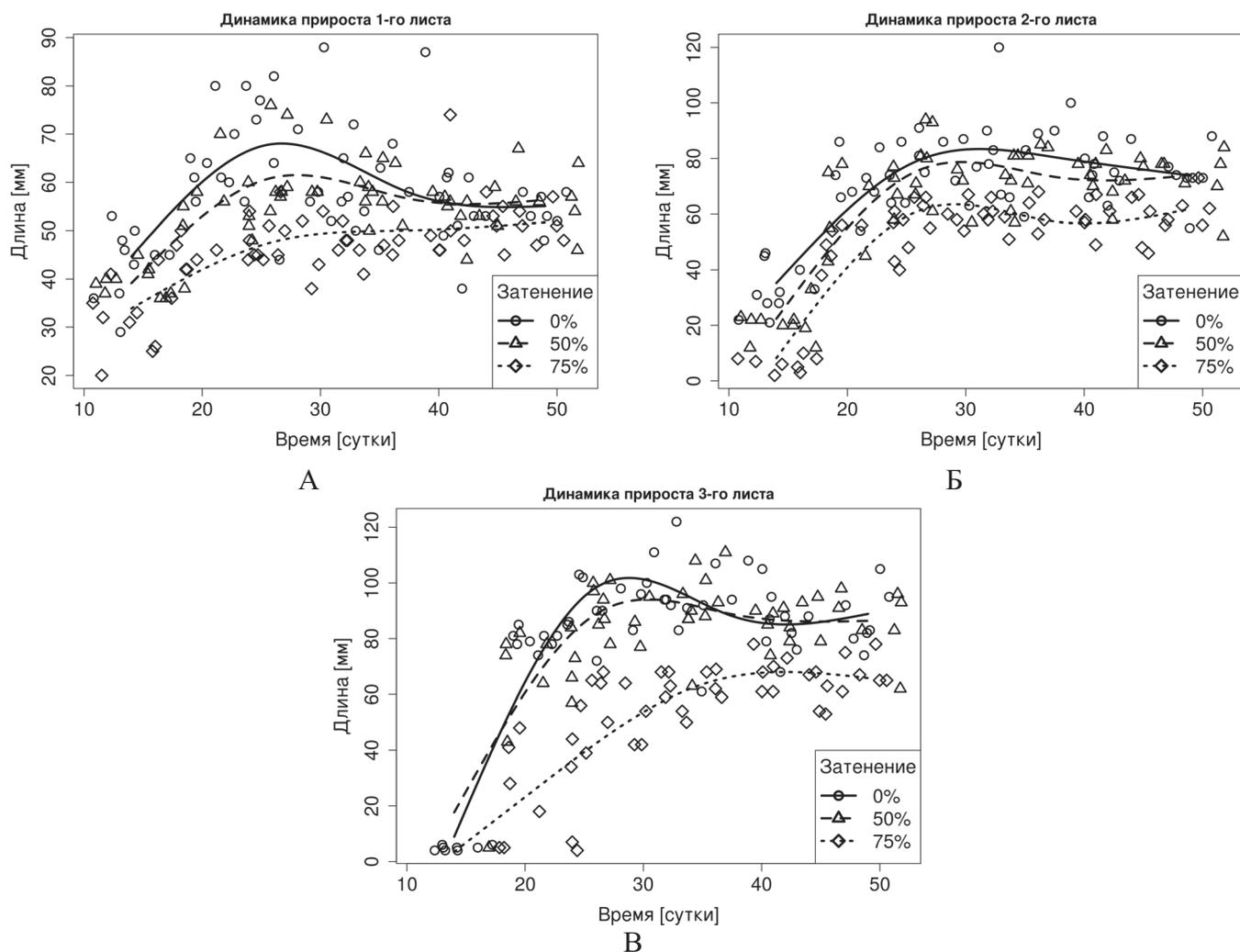
Согласно литературным данным, спектральный состав света для растений салата листового (*Lactuca sativa* L.) принят с соотношением энергии в диапазонах спектра: 30 % – в синей области; 20 % – в зеленой и 50 % – в красной [5]. Процентное соотношение в основных областях спектра излучения натриевых ламп –  $K_{\text{син}} : K_{\text{зел}} : K_{\text{кр}} = 9 \% : 54 \% : 37 \%$  [12]. На основе полученных результатов был проведен анализ зависимости длины листьев разной генерации от уровня освещенности с использованием общих аддитивных регрессионных моделей.

По результатам статистической обработки опытных данных, влияние фактора освещенности на длину листа достоверно для первого и второго листьев при уровне значимости 5 %. В случае третьего листа, статистических различий между длиной листа, сформированного при затенении 0 % и 50 %, не обнаружено, но длина листа, сформированного при затенении 75 %, статистически значимо отличается от длины листа, сформированного при затенении 0 % при заданном уровне значимости.

Проведенный статистический анализ влияния притенения на динамику прироста листьев с первой по третью генерацию показывает прямо пропорциональный тип связи между длиной листа и уровнем освещенности, то есть, чем выше уровень освещения, тем длиннее лист.

Возрастание скорости прироста длины у всех исследуемых генераций листьев в вариантах без притенения и 50 % уровнем происходило на протяжении первых 4-х недель с момента появления всходов. У листьев с данными вариантами затенения максимальный прирост листа был достигнут на 28-е сутки роста. При этом минимальная скорость прироста наблюдалось у листьев всех исследуемых генераций в варианте с затенением 75 % (рис. 1 А, Б, В). Также при уровне затенения 75 % произошло смещение сроков достижения максимального прироста – на 21-е сутки у первой генерации листьев (рис. 1 А), на 14-е сутки – у листьев третьей генерации относительно остальных вариантов (рис. 1 В). Но у листьев второй генерации при затенении 75 % максимальный прирост длины был достигнут одновременно с остальными вариантами (рис. 1 Б).

После достижения максимальных значений в вариантах без притенения и 50 % уровнем отмечено снижение скорости прироста длины у листьев всех исследуемых генераций и близкое к полному совпадение его показателей (рис. 1 А, Б, В). При этом совпадение данных показателей у листьев третьей генерации произошло в наименее короткий срок (рис. 1 В). Наиболее позднее совпадение отмечено у листьев второй генерации (рис. 1 Б), промежуточное значение срока совпадения показателей прироста длины зафиксировано у первой генерации листьев (рис. 1 А). В варианте с затенением 75 % наблюдается проявление специфики в динамике прироста у каждой генерации листьев.



**Рис.1.** Зависимость длины листьев от уровня освещения (А – первого листа, Б – второго листа, В – третьего листа)  
**Fig.1.** Dependence of the length of the leaves on the illumination level (А – the first leaf, Б – the second leaf, В – third leaf)

Так, у первой генерации листьев снижения скорости прироста не отмечено, вместо этого отмечается ее незначительное возрастание во временных интервалах (рис.1 А), у листьев второй генерации происходило незначительное снижение скорости прироста после достижения ими своих максимальных показателей, затем плавный возврат к ним (рис.1 Б), листья третьей генерации показали незначительное снижение скорости прироста длины после достижения ею своего максимума (рис.1 В).

Полученные в ходе эксперимента различия в динамике прироста листьев может быть объяснено различиями в суммарном количестве ассимилятов в исследуемых растениях, обусловленных различными уровнями освещенности, так как из-

менение интенсивности света воздействует на фотохимические реакции хлоропластов, что существенно влияет на функционирование листа. При низкой интенсивности света суммарное количество ассимилятов невелико, поэтому оно не может обеспечить интенсивный рост всего растения [2].

Наиболее существенным показателем для производства является биологическая продуктивность растений, выражаемая через показатель сухой массы растений [5]. Под продуктивностью в данном исследовании подразумевается относительная скорость роста, представляющая собой возрастание растительной массы в любой момент времени и используемая для оценки воздействия в строго определенных условиях.

Относительная скорость роста является основной мерой продукции сухого вещества. Проведенный анализ относительной скорости роста (ОСР) растений салата листового, сформированных в различных условиях затенения, показывает неоднородность воздействия различных уровней освещенности на ее динамику (рис. 1 Б). Показатели относительной скорости роста салата листового в разных условиях затенения в зависимости от времени представлены в таблице 2.

Согласно полученным результатам, до 21-х суток роста с момента появления всходов, растения в варианте без затенения имеют статистически более низкие значения ОСР, чем растения в других вариантах. После первых трех недель роста, ОСР растений при затенении 50 % становится статистически неотличимым от ОСР растений в варианте без затенения, что наглядно показывает пересечение границ их доверительных интервалов (рис. 2).

Таблица 2. Показатели относительной скорости роста салата листового *Lactuca sativa* L. в разных условиях затенения в зависимости от времени

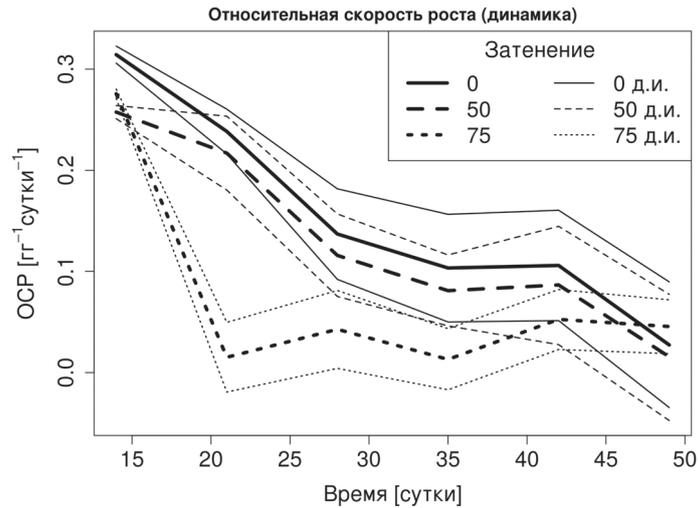
День	Относительная скорость роста, г г <sup>-1</sup> день <sup>-1</sup>	Нижняя граница 95% доверительного интервала	Верхняя граница 95% доверительного интервала
без затенения			
14	0.314	0.306	0.323
21	0.238	0.216	0.260
28	0.137	0.092	0.182
35	0.103	0.050	0.156
42	0.106	0.051	0.160
49	0.027	-0.035	0.090
50 % степень затенения			
14	0.258	0.251	0.264
21	0.217	0.180	0.253
28	0.116	0.075	0.157
35	0.081	0.046	0.116
42	0.087	0.028	0.145
49	0.016	-0.047	0.077
75% затенения			
14	0.276	0.271	0.280
21	0.015	-0.019	0.050
28	0.043	0.004	0.081
35	0.013	-0.017	0.043
42	0.053	0.023	0.082
49	0.046	0.019	0.072

При этом значение ОСР растений в варианте с затенением 75 % остается существенно более низким относительно других вариантов затенения до 35-х суток роста, после которых данный показатель становится статистически неотличим от остальных.

Несмотря на практически неотличимые показатели скорости роста между без затенения и его 50 % степенью после 21-х суток роста с момента появления всходов, растения в варианте без затенения значительно опережают растения из вари-

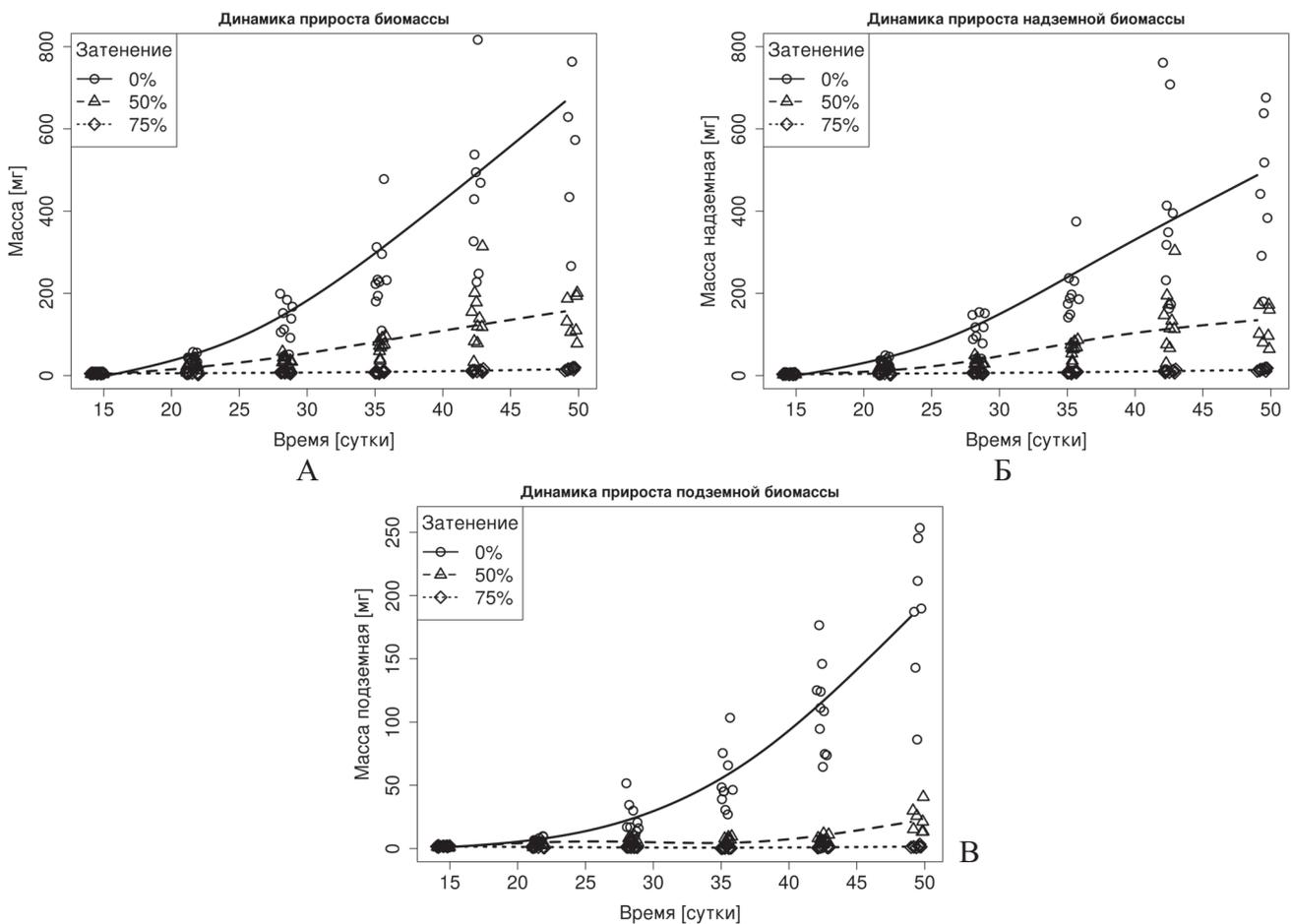
антов с различной степенью затенения по абсолютным показателям общей, а также надземной и подземной сухой биомассы (рис. 3 А, Б, В). Основная причина – это результат более быстрого накопления биомассы в начальные периоды роста растениями в варианте без затенения, в результате чего они значительно опережают в своем развитии растения из других вариантов опыта, хотя и имеют схожие показатели ОСР.

Наблюдаемые различия в накоплении сухой массы при различной освещенности согласуются



**Рис.2.** Динамика относительной скорости роста в разных условиях затенения в зависимости от времени

**Fig.2.** Dynamics of the relative growth rate under different shading conditions as a function of time



**Рис.3.** Зависимость увеличения общей (А), надземной (Б) и подземной (В) биомассы от уровня освещения

**Fig.3.** Dependence of the increase in total (A), aboveground (Б), underground (В) biomass from the level of illumination

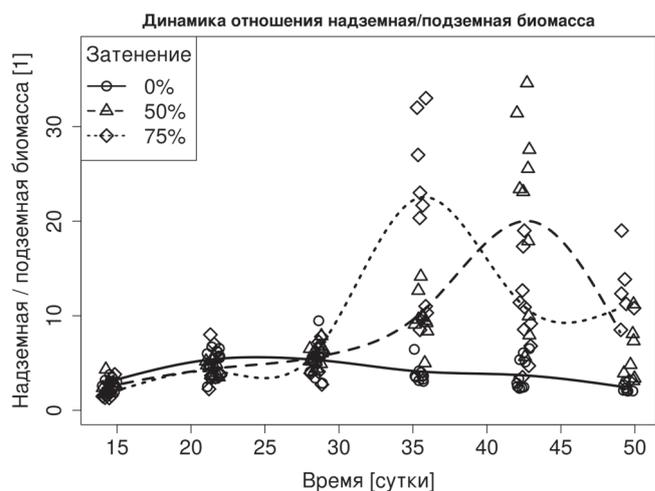
с установленной закономерностью, согласно которой увеличение освещенности приводит к формированию листьев с более высоким содержанием сухого вещества. Данные различия могут быть объяснены различиями в эффективности работы фотосинтетического аппарата, а также различиями в скорости использования ассимилятов на ростовые процессы [3].

Анализ соотношения надземной и подземной биомасс показал статистически значимое различие у экспериментальных растений в вариантах с притенением по сравнению с растениями из варианта без затенения (рис. 4), скачкообразное увеличение которых могло быть вызвано низким уровнем освещенности, так как снижение интенсивности света вызывает образование листьев, способных быстро накапливать сухое вещество, что обеспечивает сохранение относительной стабильности и функциональное равновесие фотосинтетического аппарата в условиях изменяющегося светового режима [3].

Возникший при этом сдвиг данного соотношения во временном интервале в 7 дней у варианта с 50%-ным затенением относительно варианта с 75%-ным, предположительно, могут быть связаны с различиями в скорости использования ассимилятов на ростовые процессы. Указанное изменение соотношения надземной и подземной биомасс в вариантах с различной степенью притенения может являться результатом коррекции динамики роста путем ее сдвига в сторону накопления надземной биомассы относительно подземной и согласуется с результатами, полученными при проведении исследования по изучению влияния периода искусственного освещения на формирование рассады салата [6]. Возможно, данная коррекция является адаптацией исследуемых растений к пониженному уровню освещенности. Очевидно, что данное предположение нуждается в проверке при проведении дополнительных исследований.

#### Выводы

Растения салата листового (*Lactuca sativa* L.) проявляют положительную динамику прироста длины листьев при различных уровнях освещенности натриевыми лампами от момента появления всходов до 28-х суток роста. Уровень освещенности лимитирует скорость прироста длины листьев. При этом максимальный уровень интенсивности освещения способствует наибольшим значениям относительной скорости роста (ОСР)



**Рис.4.** Зависимость соотношения надземной/подземной биомассы от уровня освещения  
**Fig.4.** Dependence of the aboveground / underground biomass ratio on the level of illumination

у растений салата листового в начальный период развития — до 21-х суток роста с момента появления всходов.

Снижение уровня освещенности вызывает значительное уменьшение накопления общей, надземной и подземной биомасс сухого вещества у экспериментальных растений, а также вызывает изменение соотношения надземной и подземной биомассы в сторону накопления надземной.

Наибольшее влияние на значения биомассы растений имеет доступность световых ресурсов в первые четыре недели роста. Поэтому, может быть предложено обеспечение максимального уровня интенсивности освещения для оптимизации тепличной культуры салата на ранних этапах развития (до 28 дня с начала роста).

1. Протасова Н.Н. Свет как фактор регуляции фотосинтеза и роста растений // Рост растений и дифференцировка. М.: Наука, 1981. С.245–253.  
Protasova N.N. Svet kak faktor regulyatsii fotosinteza i rosta rasteniy [Light as a factor in the regulation of photosynthesis and plant growth] // Plant growth and differentiation. Moscow: Nauka, 1981. P. 245–253.
2. Маркаев О.А. Экологическая физиология растений: фотосинтез и свет. Ярославль: ЯрГУ, 2005. 95 с.

- Marakayev O.A.* Ekologicheskaya fiziologiya rasteniy: fotosintez i svet [Ecological physiology of plants: photosynthesis and light]. Yaroslavl: YarSU, 2005. 95 p.
3. *Абиян М.В.*, Гиш Р.А., Подушин Ю.В. Влияние периода искусственного освещения на формирование рассады салата // Научный журнал КубГАУ, 2014. N 101(07). P. 1–2.  
*Abiyana M.V.*, Guish R.A., Podushin Yu.V. Vliyaniye perioda iskusstvennogo osveshcheniya na formirovaniye rassady salata [Influence of the period of artificial lighting on salad seedling formation] // Scientific journal of KubSAU, 2014. N 101(07). P. 1–2.
  4. *Далькэ И.В.*, Буткин А.В., Табаленкова Г.Н., Малышев Р.В., Григорай Е.Е., Головки Т.К. Эффективность использования световой энергии тепличной культурой листового салата // Известия ТСХА. 2013. Вып.5. С. 60–68.  
*Dalke I.V.*, Butkin A.V., Tabalenkova G.N., Malyshev R.V., Grigoray E.E., Golovko T.K. Effektivnost ispolzovaniya svetovoy energii teplichnoy kulturoy listovogo salata [Efficiency of the use of light energy by the greenhouse culture of leaf lettuce] // Izvestiya TSKhA. 2013. Issue 5. P. 60–68.
  5. *Ракутько С.А.*, Ракутько Е.Н. Метод оценки энергоэффективности фотосинтеза в светокультуре с позиций прикладной теории энергосбережения // Сборник научных трудов ИАЭП. 2015. Вып. 86. С. 169–182.  
*Rakutko S.A.*, Rakutko E.N. Metod otsenki energoeffektivnosti fotosinteza v svetokulture s pozitsiy prikladnoy teorii energosberezheniya [A method for estimating the energy efficiency of photosynthesis in light culture in terms of the applied theory of energy saving] // Collected scientific works of the IAEP. 2015. Vol. 86. P. 169–182.
  6. *Курьянова И.В.*, Олонина С.И. Оценка влияния различных спектров светодиодного светильника на рост и развитие овощных культур // Вестник НГИЭИ. 2017. № 7(74). С. 35–44.  
*Kuryanova I.V.*, Olonina S.I. Otsenka vliyaniya razlichnykh spektrov svetodiodnogo svetilnika na rost i razvitie ovoshchnykh kultur [Evaluation of the influence of various spectra of an LED lamp on the growth and development of vegetable crops] // Vestnik NGIER. 2017. No. 7 (74). P. 35–44.
  7. *Маркова А.Е.*, Мишанов А.П., Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Энергоэффективность светокультуры салата при различной фотонной облученности // Сборник научных трудов ИАЭП. 2016. Вып. 90. С. 33–39.  
*Markova A.E.*, Mishanov A.P., Rakutko S.A., Rakutko E.N. Energoeffektivnost svetokultury salata pri razlichnoy fotonnoy obluchennosti [Energy efficiency of salad light cultivation under different photon irradiation] // Collection of Scientific Works of the IAEP. 2016. Vol. 90. P. 33–39.
  8. *Шитиков В.К.*, Розенберг Г.С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. Тольятти: Кассандра, 2013. 314 с.  
*Shitikov V.K.*, Rosenberg G.S. Randomizatsiya i butstrep: statisticheskiy analiz v biologii i ekologii s ispolzovaniem R. [Randomization and bootstrap: statistical analysis in biology and ecology using R]. Togliatti: Cassandra, 2013. 314 p.
  9. *Davidson A.C.*, Kuonen D. An introduction to the bootstrap with application in R // Stat. Comput. Stat. Graph. Newsl. 2003. Vol. 13, № 1. P. 6–11.
  10. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2017. URL: <https://www.R-project.org/>.
  11. *Wood S.N.* Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. Journal of the Royal Statistical Society. 2011. Vol. 73(1). P. 3–36.
  12. *Ракутько С.А.*, Ракутько Е.Н., Маркова А.Е., Мишанов А.П., Курбанов С. Флуктуирующая асимметрия билатеральных признаков как критерий оценки качества облучения в светокультуре // Вестник Мич ГАУ. 2012. N 2. С. 45–54.  
*Rakutko S.A.*, Rakutko E.N., Markova A.E., Mishanov A.P., Kurbanov S. Fluktuiruyushchaya asimmetriya bilateralnykh priznakov kak kriteriy otsenki kachestva oblucheniya v svetokulture [Fluctuating asymmetry of bilateral traits as a criterion for assessing the quality of irradiation in light culture] // Bulletin of Mich AU. 2012. N 2. P. 45–54.

Поступила в редакцию: 27.04.2018

UDC 581.14:58.035:635.52

**GROWTH BIOMASS DYNAMICS OF *LACTUCA SATIVA* L.  
IN DEPENDENCE WITH LIGHT INTENSITY**

**R.A. Zagumenny, A.V. Nikolaeva, I.I. Strelnikov**

*Public Institution «Donetsk Botanical Garden»*

The study focused on the light dependence of leaf length of the different generation in leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) with the use of additional illumination (sodium lamps). The increase in length increment rates was observed in all investigated leaf generations in variants with 0% and 50% shading during the first four weeks after emergence. In the case of 75% shading, there is a manifestation of specificity in the growth dynamics in each generation of leaves. From the moment of emergence until the 21st day of growth, plants in the variant with 0% shading have the highest relative growth rate (RGR) values than plants in other variants. The decrease in the illumination level causes significant drop in the production of total, aboveground and underground biomass of dry matter in trial plants. Lowered illuminance also causes a shift in the ratio between aboveground and underground biomass toward overground accumulation. It is necessary to provide the maximum level of illumination intensity for optimizing the greenhouse lettuce cultivation at the early stages of development (up to 28 days from the growth beginning).

**Key words:** light intensity, biomass increment, relative growth rate, sodium lamps