



## «Градиентный» эксперимент в светокультуре

Е. Н. Ракутько, С. А. Ракутько 

*Институт агроинженерных и экологических проблем*

*сельскохозяйственного производства –*

*филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ*

*(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)*

 [sergej1964@yandex.ru](mailto:sergej1964@yandex.ru)

### **Аннотация**

*Введение.* Характерной особенностью большинства экспериментальных научно-исследовательских работ по светокультуре является необходимость варьирования основных параметров светового режима при поддержании других факторов окружающей среды на одном уровне в течение всего эксперимента. Подход к созданию необходимого разнообразия вариантов параметров светового режима за один цикл выращивания растений, рассматриваемый в данной работе, может оказаться приемлемым для сокращения времени проведения экспериментов или для поисковых работ. Цель работы – показать возможность использования градиента освещенности как источника вариации ее величины в экспериментальных работах по светокультуре.

*Материалы и методы.* Использовался светодиодный светильник с косинусным светораспределением, размещенный над рабочей поверхностью, на которой располагались контейнеры с растениями сладкого перца. В качестве биометрического параметра, характеризующего отклик растения на уровень освещенности, применялась оптическая плотность листьев в различных спектральных диапазонах.

*Результаты исследования.* На рабочей поверхности наблюдался существенный градиент освещенности. При одинаковом диапазоне освещенностей количество контейнеров с растениями для данной зоны различно и достаточно для проверки статистических гипотез. Величины средних освещенностей по зонам обеспечивали диапазон изменения освещенности в 2,5 раза. Среднеквадратичные отклонения освещенности по зонам составляли 97–163 лк и были практически некоррелированы с величинами средних освещенностей.

*Обсуждение и заключение.* Разработанная математическая модель градиентного эксперимента в светокультуре позволяет по светотехническим и компоновочным параметрам осветительной установки определить возможное количество повторностей при проведении эксперимента, среднее значение освещенности, среднеквадратичное отклонение, коэффициенты вариации и равномерности в каждой зоне размещения растений. Экспериментально подтверждено, что применение светильника с косинусным светораспределением обеспечивает на горизонтальной поверхности градиент освещенности, средние значения которой в отдельных зонах образуют линейную шкалу. Коэффициенты вариации освещенности в отдельных зонах освещения при установленных в примере параметрах составляли 3,0–11,5 %. При этом коэффициенты вариации оптической плотности листьев растений перца, выращенного в условиях градиентного эксперимента по освещенности, составляли 6,0–11,6 %. Различия средних значений оптической плотности листьев растений в различных зонах градиентного освещения статистически значимы. Это позволяет рекомендовать использование предлагаемого метода для поисковых экспериментов по светокультуре.

© Ракутько Е. Н., Ракутько С. А., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Ключевые слова:** выращивание растений в теплице, светокультура, осветительная установка, равномерность освещения, градиент, биометрия, фенотипирование

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Ракутько Е. Н., Ракутько С. А. «Градиентный» эксперимент в светокультуре // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 295–312. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.295-312>

Original article

## “Gradient” Experiment in Horticulture Lighting

E. N. Rakutko, S. A. Rakutko ✉

*Institute for Engineering and Environmental Problems  
in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific  
Agroengineering Center VIM  
(Saint Petersburg, Russian Federation)*

✉ [sergej1964@yandex.ru](mailto:sergej1964@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** A characteristic feature of most experimental research works on horticulture lighting is the need to vary the main parameters of the light regime while maintaining other environmental factors at the same level throughout the experiment. The approach to creating the requisite variety of variations of light regime parameters in one cycle of plant cultivation, considered in this work, may be acceptable for reducing the time of experiments or for exploratory works. The aim of the work is to show the possibility of using the illuminance gradient as a source of variation in its value in experimental works on horticulture lighting.

**Materials and Methods.** We used an LED lamp with a cosine light spatial distribution, placed above the work surface, on which containers with sweet pepper plants were placed. The optical density of the leaves in various spectral ranges was used as a biometric parameter characterizing the response of a plant to the level of illumination.

**Results.** A significant gradient of illumination was observed on the working surface. With the same range of illumination, the number of containers with plants for a given zone is different and is sufficient to test statistical hypotheses. The values of the average illumination by zones provided the range of illumination change by 2.5 times. The standard deviations of illumination by zones were 97–163 lux and were practically no correlated with the values of the average illumination.

**Discussion and Conclusion.** The developed mathematical model of a gradient experiment in horticulture lighting makes it possible to determine the possible number of replicates during the experiment, the average illumination value, the standard deviation, the coefficients of variation and uniformity in each zone of plant placement, based on the lighting and layout parameters of the lighting installation. It has been experimentally found that the use of a luminaire with a cosine light distribution provides an illumination gradient on a horizontal surface, the average values of which in individual zones form a linear illumination scale. Coefficients of illumination variation in individual lighting zones with the parameters set in the example were 3.0–11.5%. The coefficients of variation of the optical density of the leaves of pepper plants grown under the conditions of the gradient experiment on illumination were 6.0–11.6%. The differences in the mean values of the optical density of plant leaves in different zones of gradient illumination are statistically significant. This allows us to recommend the use of the proposed method for searching experiments on horticulture lighting.

**Keywords:** greenhouse horticulture, horticulture lighting, lighting installation, illumination uniformity, gradient, biometry, phenotyping

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Rakutko E.N., Rakutko S.A. “Gradient” Experiment in Horticulture Lighting. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):295–312. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.295-312>

## Введение

Светокультурой называют научные основы и практические приемы выращивания растений в условиях искусственно созданной среды. В результате множества исследований выявлено, что свет является важнейшим экологическим фактором среды обитания растений. Характерной особенностью большинства экспериментальных научно-исследовательских работ по светокультуре является необходимость варьирования при их проведении основных параметров светового режима (интенсивности излучения, его спектрального состава, фотопериода) при поддержании других факторов окружающей среды (полив, температура, влажность и т. д.) на одном уровне в течение всего эксперимента. Такие эксперименты позволяют найти оптимальные условия выращивания растений, что представляет собой не только научный, но и хозяйственный интерес.

Применение искусственного освещения при выращивании растений имеет богатую историю. Началом светокультуры как научной дисциплины, пожалуй, можно считать работу Л. Х. Бейли 1891 г., в которой излагались результаты исследований влияния освещения от дуговых электрических ламп на растения, выращиваемые в теплице [1]. Последующие исследования показали, что растения воспринимают сигналы о световой среде через фоторецепторы и контролирует множество происходящих в них процессов, таких как прорастание, рост под конкурирующими пологам, развитие корней, цветение, адаптируя свою морфологию

и физиологию к меняющимся внешним условиям [2]. Существует взаимодействие между сигнальной функцией света, которая эффективна даже при очень низкой освещенности, и его энергетической функцией в фотосинтезе, поскольку некоторые из реакций, запускаемых фоторецепторами, оказывают непосредственное влияние на эффективность фотосинтеза, углеродный метаболизм, производство биомассы и стрессовые реакции [3]. В контролируемых производственных условиях (теплицы, сити-фермы) свет является ограничивающим фактором для урожайности сельскохозяйственных культур. В условиях постоянного роста населения планеты искусственное освещение становится все более необходимым в структуре сельского хозяйства для обеспечения постоянно растущего спроса на продукты питания [4].

Физиологические, морфологические и анатомические показатели растений зависят от основных параметров светового режима. Листья растений сильно поглощают свет в синем и красном диапазонах, поскольку здесь расположены пики поглощения хлорофиллов (660 и 460 нм). В зеленом диапазоне в основном происходит отражение света<sup>1</sup>. Например, для растений перца имеется корреляция между светло-зеленой окраской листьев (в фазе рассады) и светлой окраской плодов в технической спелости [5]. Известно, что высокая интенсивность освещения препятствует удлинению стебля [6]. Для взрослых растений перца уровень освещенности влияет на параметры роста и интенсивность фотосинтеза [7]. В растениях

<sup>1</sup> Taiz L., Zeiger E. *Plant Physiology*. 5<sup>th</sup> ed. Sunderland : Sinauer Associates, 2010. 781 p.

перца при низком уровне освещенности происходят морфологические изменения для того, чтобы максимизировать использование света. Увеличивается площадь поверхности листьев, межузличные расстояния, листья становятся тоньше, удлиняется стебель. Увеличивается размер хлоропластов и количество хлорофилла в них [8].

Количественное описание компонентов экосистемы и их взаимодействия возможно лишь в строго контролируемых условиях на натурной модели. В естественных условиях из-за меняющихся факторов внешней среды это крайне затруднено. В связи с этим важное значение приобретают вопросы методики проведения экспериментов в светокультуре.

Цель работы – показать возможность использования градиента освещенности как источника вариации ее величины в экспериментальных работах по светокультуре.

### Обзор литературы

Понятие градиента физической величины означает, что она принимает различное значение в различных точках пространства (поверхности). Средствами обеспечения такого эффекта для светотехнических величин являются специальные оптические и светотехнические элементы и устройства: градиентные светофильтры, линзы, источники света, светильники<sup>2</sup>. Так, известен градиентный светофильтр, выполненный в виде прозрачной плоской параллельной пластины. В качестве материала светофильтра используется оптическое стекло или пластмасса с радиальным градиентным профилем показателя преломления, который определенным образом зависит от полярного радиуса [9]. Известен градиентный объектив, в котором

выпукло-плоская линза выполнена из материала с определенным распределением показателя преломления [10].

Сравнительный эксперимент в светокультуре – это процедура систематического сбора научных данных в целях проверки правильности гипотезы исследования. Для полного раскрытия потенциала исследования эксперименты по светокультуре должны быть правильно спланированы и организованы [11]. Правильно спроектированный эксперимент прежде всего должен быть рандомизированным с достаточным количеством истинных повторений. Адекватное количество повторений необходимо для оценки ошибки эксперимента, значимости и силы воздействующих факторов. Правильная рандомизация обеспечивает несмещенную оценку наблюдаемых эффектов.

В светокультуре можно выделить отдельные типы исследований: в ростовых камерах, в теплицах, в полевых условиях [12]. Ростовая камера обеспечивает специальные контролируемые условия, в которых исследователь может изучить влияние фактора света на рост растений, выдерживая значения других факторов на заданном уровне в течение всего эксперимента. Основной проблемой в исследованиях в ростовой камере является недостаточное количество повторов или их отсутствие вообще. Поскольку величина исследуемого фактора задается для камеры в целом (а не к отдельному растению), экспериментальной единицей является сама камера. Растения в камере считаются подвыборками и не должны рассматриваться как истинные реплики. Для обеспечения достоверных повторов эксперименты повторяют, используя одну и ту же ростовую камеру несколько раз, назначая случайным

<sup>2</sup> Солимено С., Крозиньяни Б., Ди Порто П. Дифракция и волноводное распространение оптического излучения : Пер. с англ. М. : Мир, 1989. 664 с.

образом уровни исследуемого фактора, что увеличивает сроки и стоимость исследования. Эксперименты в теплице проводятся в контролируемой и управляемой среде, сводя к минимуму почвенные и климатические различия. Здесь экспериментальными единицами являются отдельные растения или их группы, выращиваемые в отдельных горшках или лотках. Несмотря на возможность контроля и управления внутренней средой, ее параметры могут варьироваться внутри всего помещения, создавая градиент параметра, что является нежелательным. Полевые исследования применительно к светокультуре подразумевают наблюдения за рассадой, высаженной в грунт после определенного воздействия в рассадный период. Отдельные однородные полевые участки с более чем с одним растением обычно используются в качестве экспериментальных единиц в исследованиях однолетних и многолетних культур. Для уменьшения экспериментальных ошибок при планировании сравнительных экспериментов настоятельно рекомендуется исключение градиента факторов на опытном поле [13].

При использовании активного эксперимента, как правило, производится его так называемое планирование, то есть выбор сочетания факторов, влияющих на процесс. Эта процедура сокращает необходимое количество опытов и позволяет оценить силу взаимодействия факторов.

Помимо активного, исследователю часто приходится применять пассивный эксперимент, когда уровни факторов в каждом опыте регистрируются, но не задаются. Такая ситуация часто возникает в экологии, поскольку установить уровни факторов окружающей среды затруднено, если не невозможно. Для таких случаев разработан способ анализа растительных сообществ, рассматривающий распределение популяции

по градиенту экологических условий – градиентный анализ.

Рассматривая вопросы влияния основных экологических факторов на растения и растительные сообщества, необходимо затронуть понятие экологического градиента, под которым понимается изменение абиотических факторов от минимального значения к максимальному, что сопряжено с изменением условий существования вида в ареале обитания (климатическая изменчивость).

Градиентный пассивный эксперимент широко применяется в исследованиях по экологии, ботанике, популяционной биологии, при нахождении отклика свойств живых организмов на градиенты как отдельных факторов окружающей среды, так и их совокупности [14]. В частности, он широко и эффективно используется при изучении лесных фитоценозов [15]. Так, исследовали образцы молодых буков европейских (*Fagus sylvatica L.*) и клена платана (*Acer pseudoplatanus L.*) вдоль градиентов доступности света и проанализировали диски стволов для количественной оценки первичного и вторичного роста. Скорость роста бука хорошо объяснялась наличием рассеянного света и онтогенезом. По сравнению с буком доступность света сильнее влияла на вторичный рост стволов платана, и прирост высоты уменьшался с возрастом дерева [16]. Л. Лифлэнг с коллегами обнаружил, что длина черешка и биомасса растений будры плющевидной (*Glechoma hederacea L.*) была больше в условиях светового градиента, нежели чем при равномерном освещении [17]. В аналогичном эксперименте было найдено, что растения *Abutilon theophrasti* при градиентном освещении показали различие признаков на различных уровнях [18]. Это указывает на то, что растения могут по-разному реагировать на разные условия освещения и что

эти разные условия могут по-разному влиять на производительность и качество растений. Другой пример применения градиентного анализа: исследовались закономерности распределения таксономического состава цианобактериально-водорослевых ценозов в шахте пещеры в зависимости от уровня освещенности. В зависимости от глубины погружения в шахту средняя освещенность принимает значения от 33 (и менее) до 85 (и более) люкс. Прямой градиентный анализ выявил снижение биоразнообразия цианобактерий и водорослей по мере продвижения вглубь шахты и уменьшения уровня освещенности [19].

Итак, неравномерность распределения освещенности по плоскости верхушек растений (и внутреннему объему ценоза) в промышленной светокультуре и научных исследованиях является нежелательным обстоятельством, поскольку приводит к неравномерной скорости деления клеток (пролиферации). При выращивании растений в одной группе предполагается, что они должны иметь одинаковые физиологические и морфологические показатели. В результате они вырастут различными, что скажется на качестве самих растений и продукции. Различие отдельных экземпляров растений, выросших в среде с неодинаковыми показателями, приведет к невозможности управлять ими по единому алгоритму. Поэтому в установках для выращивания растений необходимо обеспечивать достаточную равномерность освещения [20].

Для проведения оптимизационных и других экспериментов по светокультуре используют фитотроны (устройства для управляемого выращивания растений в искусственных условиях). Это довольно громоздкие сооружения, имеющие, как правило, значительную стоимость. Они позволяют обеспечить поддержание требуемого параметра

светового режима на протяжении всего эксперимента с большой точностью [21].

Для сокращения времени проведения экспериментов или для поисковых работ может оказаться приемлемым другой подход к созданию необходимого для научно-исследовательской работы разнообразия вариантов параметров светового режима за один цикл выращивания растений. Суть его в использовании различий требуемого параметра в различных областях пространства (поверхности), образуемых за счет компоновочных либо других технических решений.

Такой подход реализован в ряде технических решений. Так, известен многоярусный стеллаж для научно-исследовательских работ с растениями, состоящий из каркаса в виде вертикальных стоек и рам, на которых закреплены полки с размещенными на них под различным углом к горизонту технологическими поверхностями [22]. Применение наклонных поверхностей обеспечивает достаточно плавное изменение уровня освещенности растений. Известен градиентный фитотрон, обеспечивающий освещение всей горизонтальной рабочей поверхности одним источником света [23]. В силу законов фотометрии непосредственно под источником света наблюдается максимальная освещенность, спадающая по мере удаления от проекции источника света на поверхность.

Разработан модуль светового градиента для наблюдения за ростом проростков арабидопсиса (*Arabidopsis thaliana*). Модуль располагается над прямоугольной матрицей, в ячейках которой высажены семена растений. Различные условия освещения (величина освещенности) в группе поперечных ячеек матрицы достигалась применением пленки, прозрачность которой изменялась в продольном направлении

(коэффициент пропускания от 20 до 80 %) [24].

Рассмотрена возможность использования градиентов спектрального состава в сочетании с полуавтоматическим фенотипированием для быстрого определения фенотипических реакций растений на вариации спектра излучения [25]. Плавный спектральный градиент обеспечивался следующим образом. Над рабочей поверхностью, на которой осуществлялось выращивание растений, в линию размещали светильники с различным спектральным составом (соотношением синего и красного излучения в спектре). На одной стороне рабочей поверхности светильники состояли только из синих светодиодов, на противоположной – только из красных. Промежуточные светильники имели соответствующий смешанный спектральный состав. В результате за счет использования такой схемы эксперимента были получены растения, одновременно выращенные под различным спектральным составом.

К градиентному методу по фотопериоду можно отнести биологический метод Горбачева – Дакфельда, базирующийся на накоплении суммарной дозы излучения, падающего на определенные участки поверхности<sup>3</sup>. Используют шторку, экранирующую поток излучения, которую сдвигают с определенным интервалом по времени. При одинаковой облученности доза пропорциональна времени воздействия. Тогда на различные участки рабочей поверхности передаются различные дозы. Обычно этот метод используют при дозировании УФ-излучения.

Было показано, что равномерность создаваемой освещенности непосредственно связана с энергоэкологичностью процесса облучения растений. Увеличение градиента (неравномерности) освещенности снижает энергоэффективность и экологичность светокультуры [26].

Анализ литературных источников позволяет дать следующее определение. Градиентный эксперимент в светокультуре – вид активного эксперимента, в котором для получения различных уровней исследуемого фактора световой среды используют градиент этого фактора, естественным образом формирующийся в области выращивания растений за счет обеспечения необходимых светотехнических и компоновочных параметров осветительной установки.

#### Материалы и методы

Эксперимент проводили в октябре – ноябре 2021 г. В качестве объекта исследования использовали растения сладкого перца (*Capsicum Annuum L.*) среднеспелого сорта Калифорнийское чудо. Перец является широко распространенной овощной культурой, содержит большое количество витамина С, Р-активных веществ, каротин, тиамин, никотиновую и фолиевую кислоты, белки и минеральные соли. Поэтому эксперименты по оптимизации технологии его выращивания являются актуальными и востребованными<sup>4</sup>.

Субстрат готовили из одной части грунта для рассады и двух частей универсального питательного грунта. Вносили элементы питания до необходимых количеств. Семена перца высадили 18.10.2021 г. в кассету на глубину около одного сантиметра и поместили

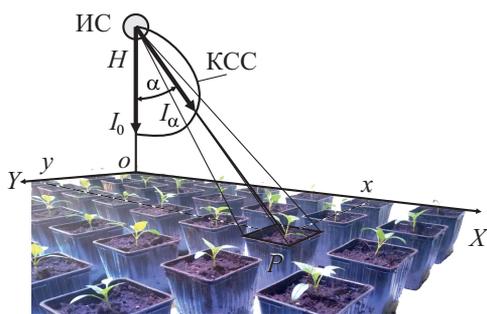
<sup>3</sup> Инструкция по применению облучателя ультрафиолетового ОУФд-01 «Солнышко» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.med-magazin.ru/upload/iblock/9bd/9bd9df91de30674a3da692e87b8c77f4.pdf> (дата обращения: 29.12.2021).

<sup>4</sup> Пышная О. Н., Мамедов М. И., Пивоваров В. Ф. Селекция перца. М., 2012. 247 с.

в пропатор при температуре 27–28 °С. Затем кассету с сеянцами поместили на свет. Массовые всходы наблюдались 25.10.2021 г. Сеянцы пикировали в пластиковые контейнеры с субстратом объемом один литр и выставили под светильник. Всего было выставлено 66 растений. Контейнеры с ними располагались в 6 рядов, по 11 растений в ряду. Известно, что для растений перца уровень освещенности имеет большое значение [27]. Уровень освещенности у каждого контейнера контролировали люксметром «ТКА» с пределом допускаемой основной относительной погрешности измерения  $\pm 6\%$ . Выращивание завершили 09.11.2021 г., на 15-й день после появления всходов.

Оптические свойства листьев считаются индикаторами комплексной физиологии растений в широком диапазоне условий окружающей среды [28]. В наших предыдущих исследованиях было выявлено, что основное поглощение света листьями перца наблюдается в синем спектральном диапазоне. Также была обнаружена зависимость оптической плотности листьев от уровня освещенности [29]. Поэтому при фенотипировании в качестве одного из биометрических параметров, характеризующих отклик растения на условия выращивания (в данной работе – на уровень освещенности), использовали оптическую плотность листа в  $j$ -м спектральном диапазоне  $D_j$  ( $j = r, g, b$ ), которую измеряли прибором ДП-1М. Диапазоны при определении оптических плотностей в синем  $D_b$ , зеленом  $D_g$  и красном  $D_r$  диапазонах выставляли светофильтрами с максимумами пропускания 421–467, 511–562 и 607–676 нм соответственно.

Использовали математический аппарат теоретической фотометрии, который применительно к данной задаче изложен в нашей предыдущей работе [30]. Расчетная схема показана на рисунке 1.



Р и с. 1. Расчетная схема для натурной модели градиентного освещения

F i g. 1. Calculation scheme for the full-scale model of gradient lighting

Градиент освещенности создавался на горизонтальной поверхности источником света (ИС), расположенным на высоте  $H$  и имеющим кривую силы света (КСС), заданную выражением  $I_\alpha = f(\alpha)$ .

Растения располагали в узлах прямоугольной координатной сетки, шаг по оси  $X$  составлял  $\Delta x$ , шаг по оси  $Y$  составлял  $\Delta y$ . В качестве участков поверхности, между которыми определяли градиент освещенности, принят квадрат со стороной  $b$ . Положение квадрата в координатной сетке характеризовали его центром – точкой  $P$  с координатами  $x$  и  $y$  соответственно.

Создаваемая освещенность  $E(x, y)$  пропорциональна силе света в данном направлении  $I_\alpha$  и косинусу угла  $\alpha$  между вертикалью и нормалью к поверхности и обратно пропорциональна квадрату высоты светильника  $H$  над плоскостью:

$$E(x, y) = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{H^2}. \quad (1)$$

Пусть освещаемая поверхность представляет собой прямоугольник размерами  $A \times B$ , система координат  $XOY$  совпадает с одним из углов прямоугольника.

Для произвольной расчетной точки на поверхности с координатами  $x$

и  $y$  расстояние от нее до проекции светильника на плоскость

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (2)$$

Расстояние от светового центра светильника до расчетной точки

$$L = \sqrt{R^2 + H^2}. \quad (3)$$

Косинус угла между вертикалью и направлением на расчетную точку

$$\cos \alpha = \frac{H}{L} = \frac{H}{\sqrt{H^2 + x^2 + y^2}}. \quad (4)$$

При косинусном светораспределении (излучатель Ламберта, диффузно излучающая плоскость) зависимость силы излучения  $I_\alpha$  в произвольном направлении  $\alpha$  связана с осевой силой света  $I_0$  выражением

$$I_\alpha = I_0 \cos \alpha. \quad (5)$$

При этом

$$I_0 = \frac{\Phi_{\text{ис}}}{\pi}. \quad (6)$$

Окончательно получаем

$$E(x, y) = \frac{I_0 H^2}{(H^2 + x^2 + y^2)^2}. \quad (7)$$

Коэффициенты равномерности, на всей поверхности и в отдельных зонах освещения, определяются по формуле

$$z = \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{мин}}}, \quad (8)$$

где  $E_{\text{ср}}$  – среднее значение освещенности;  $E_{\text{мин}}$  – минимальное значение освещенности.

$$E_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i. \quad (9)$$

В эксперименте высота подвеса светильника составляла  $H = 2,40$  м, размер рабочей поверхности  $A = 2,0$  м,  $B = 1,5$  м,  $\Delta x = 0,2$  м,  $\Delta y = 0,3$  м. Размер стороны квадратного контейнера  $b = 0,1$  м. В качестве источника света использовали регулируемый светодиодный светильник теплого белого излучения. Излучаемый им световой поток составлял  $\Phi_{\text{ис}} = 60$  кЛм, светораспределение косинусное. Находили освещенность расчетным методом и сопоставляли со значениями натуральных измерений. Обработку данных вели в электронных таблицах Excel и пакете Statistica.

### Результаты исследования

Расчетные значения освещенности соответствовали данным натуральных измерений в пределах точности люксметра. На рабочей поверхности с размещенными на ней контейнерами с растениями наблюдался существенный градиент освещенности. Численно значения освещенности в местах размещения контейнеров показаны в таблице 1. Максимальное для всей поверхности значение освещенности  $E_{\text{max}} = 3\,316$  лк наблюдалось непосредственно под светильником, минимальное  $E_{\text{min}} = 763$  лк – в точке, максимально удаленной от проекции светильника на рабочую поверхность. Значение коэффициента равномерности для всей рабочей поверхности составляет  $z = 2,51$ .

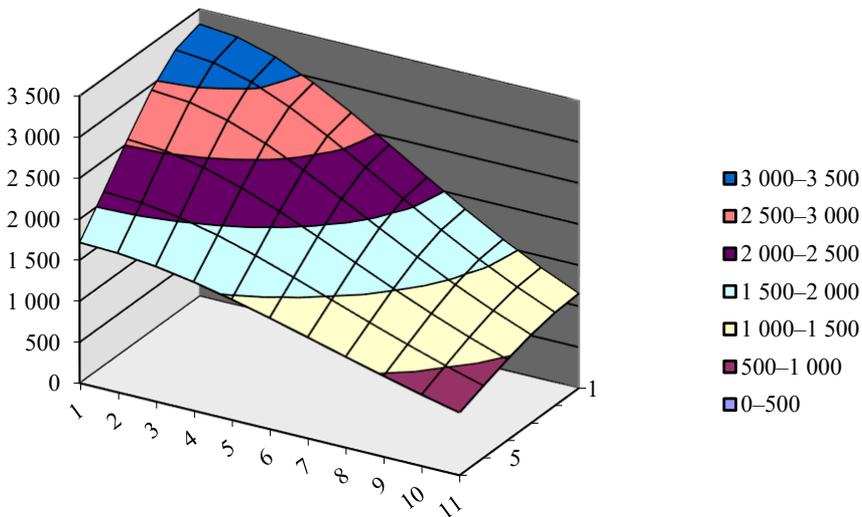
На рисунке 2 показано тело освещенности, создаваемое на рабочей поверхности. Показаны области, образуемые сечением тела освещенности горизонтальными плоскостями (изолуксы). Рисунок дает наглядное представление о плавности изменения величины освещенности по поверхности.

Однако для анализа создаваемого градиента необходима картина освещенности в дискретных точках поверхности (местах размещения контейнеров с растениями, характеризующих их

Таблица 1  
 Table 1

 Значения освещенности  $E_p$ , лк, в узлах координатной сетки  
 Illuminance values  $E_p$ , lux, in the nodes of the coordinate grid

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	3 316	3 270	3 139	2 937	2 686	2 407	2 122	1 846	1 589	1 358	1 155
2	3 215	3 171	3 046	2 853	2 612	2 345	2 070	1 804	1 555	1 331	1 134
3	2 937	2 899	2 789	2 620	2 407	2 170	1 925	1 685	1 460	1 256	1 074
4	2 549	2 518	2 429	2 291	2 116	1 920	1 715	1 512	1 320	1 143	9 85
5	2 122	2 099	2 031	1 925	1 790	1 636	1 474	1 311	1 155	1 009	877
6	1 715	1 698	1 648	1 570	1 470	1 355	1 232	1 107	985	869	763


 Р и с. 2. Тело освещенности  
 F i g. 2. Illumination body

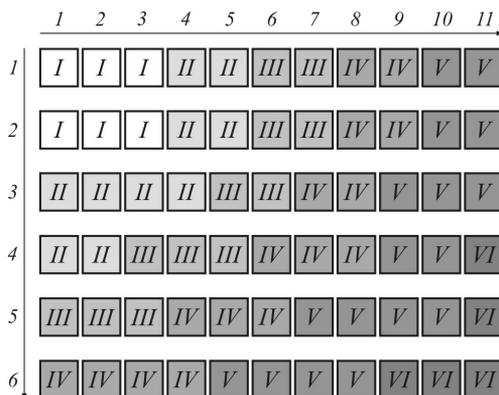
центрами). Группировка контейнеров с растениями по принадлежности к зонам освещенности показана на рисунке 3. Диапазон различий в освещенности, как и на рисунке 2, принят  $\Delta E = 500$  лк.

В таблице 2 приведены статистические показатели для освещенности контейнеров по зонам. Первый столбец таблицы – номер зоны. Далее приведены границы диапазона освещенности в зоне, количество контейнеров с растениями  $n$ , средние значения освещенности  $\bar{E}$  по контейнерам в зоне, среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ ,

коэффициент вариации освещенности  $K_v$ , коэффициент равномерности  $z$  для каждой зоны.

Из дальнейшего анализа исключена шестая зона, поскольку создаваемая в ней освещенность оказалась недостаточной для развития растений.

Как видно из таблицы 2, при одинаковом диапазоне изменения освещенности  $\Delta E$  количество контейнеров с растениями для каждой зоны различно. Но даже для первой зоны ( $n = 6$ ) это количество достаточно для проверки статистических гипотез.



Р и с. 3. Группировка контейнеров по зонам освещения

F i g. 3. Grouping of containers by lighting zones

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Статистические параметры освещенности контейнеров по зонам  
Statistical parameters of container illumination by zone

№	Диапазон, лк / Range, lux	$n$ , шт. / $n$ , pcs.	$\bar{E}$ , лк / $\bar{E}$ , lux	$\sigma$ , лк / $\sigma$ , lux	$K_v$ , % / $K_v$ , %	$z$ , отн. ед. / $z$ , relative units
I	3 000–3 500	6	3 193	97	3,0	1,05
II	2 500–3 000	10	2 740	163	5,9	1,09
III	2 000–2 500	12	2 217	148	6,7	1,09
IV	1 500–2 000	16	1 721	136	7,9	1,14
V	1 000–1 500	17	1 256	144	11,5	1,24
VI	500–1 000	5	896	93	10,4	1,17

Величины средних освещенностей  $\bar{E}$  по зонам изменяются от 3 193 лк для первой до 1 256 лк для пятой зоны, обеспечивая диапазон изменения освещенности в 2,5 раза.

Среднеквадратичные отклонения освещенности  $\sigma$  по зонам лежат в пределах 97–163 лк и некоррелированы ( $R^2 = 0,0179$ ) с величинами средних освещенностей  $\bar{E}$ .

Более наглядной характеристикой разброса освещенности внутри одной зоны является величина коэффициента вариации  $K_v$ . Для различных зон эти величины сильно коррелированы ( $R^2 = 0,9101$ ) с величинами средних освещенностей  $\bar{E}$ , причем для зон *Electrical technologies and equipment*

с меньшей средней освещенностью  $K_v$  принимает большие значения, при этом не превышая значения 11,5 %. Это является вполне допустимым для экспериментов по светокультуре.

Значения коэффициента равномерности  $z$  внутри зон варьируются в диапазоне 1,05–1,24 отн. ед. и сильно коррелированы ( $R^2 = 0,852$ ) с величинами средних освещенностей  $\bar{E}$  (большие значения  $z$  наблюдаются в зонах с меньшей средней освещенностью).

На рисунке 4 показаны средние значения освещенности  $\bar{E}$  по зонам и ее разброс  $\pm\sigma$ . Таким образом, использование градиентного подхода к организации эксперимента предоставляет

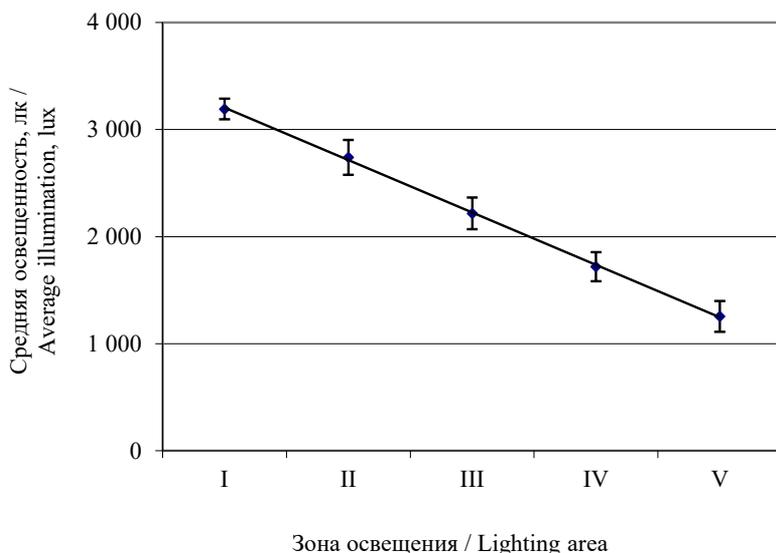
возможность создания равномерной шкалы освещенности.

На рисунке 5 показан вид типичного растения перца, сформировавшегося на момент окончания эксперимента. Размеры первой пары настоящих листьев позволяют произвести измерения их оптической плотности.

На момент окончания эксперимента растения перца имели пару вполне развитых листьев. Результаты измерения оптической плотности в  $j$ -х спектральных диапазонах листьев

растений, выращенных в различных зонах освещения (с I по V), показаны на рисунке 6.

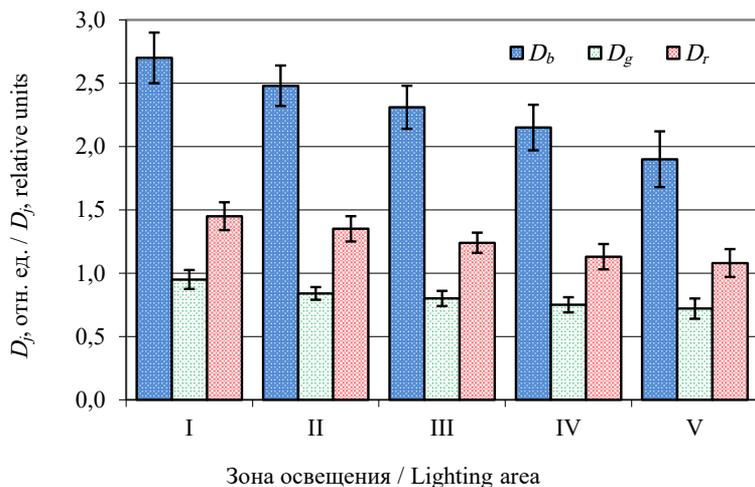
Как и ожидалось, основное поглощение света листьями наблюдается в синем спектральном диапазоне, наименьшее – в зеленом. Оптическая плотность листьев во всех диапазонах падает с уменьшением величины освещенности. Дисперсионный анализ показал статистически значимые различия средних значений освещенности в отдельных зонах ( $p < 0,05$ ).



Р и с. 4. Среднее значение освещенности по зонам  
F i g. 4. Average value of illumination by zones



Р и с. 5. Растение перца на момент окончания эксперимента  
F i g. 5. Pepper plant at the end of the experiment



Р и с. 6. Оптическая плотность листьев растений, выращенных в различных зонах освещения  
 Fig. 6. Optical density of leaves of plants grown in different light zones

### Обсуждение и заключение

Анализ научной и технической литературы выявил, что наличие градиента экологического фактора в естественных условиях позволяет организовать пассивный эксперимент по влиянию этого фактора на живые организмы (градиентный анализ). В условиях искусственной среды обитания живых организмов наличие градиента исследуемого фактора обычно является отрицательным явлением, поскольку вносит неопределенность в значение фактора в конкретной точке пространства (поверхности). В светокультуре наличие градиента исследуемого фактора световой среды, естественным образом формирующейся в области выращивания растений за счет обеспечения необходимых светотехнических и компоновочных параметров осветительной установки, позволяет организовать особый вид активного эксперимента – градиентный эксперимент.

Разработанная математическая модель градиентного эксперимента в светокультуре позволяет по светотехническим и компоновочным параметрам осветительной установки определить

возможное количество повторностей (реплик) при проведении эксперимента, среднее значение освещенности, среднее квадратичное отклонение, коэффициенты вариации и равномерности в каждой зоне размещения растений. Экспериментально найдено, что применение светильника с косинусным светораспределением обеспечивает на горизонтальной поверхности градиент освещенности, средние значения которой в отдельных зонах образуют линейную шкалу освещенности. Коэффициенты вариации освещенности в отдельных зонах освещения при установленных в примере параметрах составляли 3,0–11,5 %. При этом коэффициенты вариации оптической плотности листьев растений перца, выращенного в условиях градиентного эксперимента по освещенности, составляли 6,0–11,6 %. Различия средних значений оптической плотности листьев растений в различных зонах градиентного освещения статистически значимы. Это позволяет рекомендовать использование предлагаемого метода для поисковых экспериментов по светокультуре.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Janick J. The Origins of Horticultural Technology and Science // ISHS Acta Horticulturae 759: XXVII International Horticultural Congress – IHC2006: Global Horticulture: Diversity and Harmony, an Introduction to IHC2006. 2007. Vol. 759. P. 41–60. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.759.3>
2. Paik I., Huq E. Plant Photoreceptors: Multi-Functional Sensory Proteins and Their Signaling Networks // Seminars in Cell & Developmental Biology. 2019. Vol. 92. P. 114–121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2019.03.007>
3. Photoreceptor Effects on Plant Biomass, Resource Allocation, and Metabolic State / D. Yang [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2016. Vol. 113, Issue 27. P. 7667–7672. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1601309113>
4. Controlled Environment Food Production for Urban Agriculture / C. Gómez [et al.] // Journal of the American Society for Horticultural Science. 2019. Vol. 54, Issue 9. P. 1448–1458. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14073-19>
5. Leaf-Color Mutation Induced by Ethyl Methane Sulfonate and Genetic and Physio-Biochemical Characterization of Leaf-Color Mutants in Pepper (*Capsicum Annuum* L.) [Электронный ресурс] / G.-X. Cheng [et al.] // Scientia Horticulturae. 2019. Vol. 257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108709>
6. Rajapakse N. C., Li S. Exclusion of Far Red Light by Photosensitive Greenhouse Films Reduces Height of Vegetable Seedlings // ISHS Acta Horticulturae 631: XXVI International Horticultural Congress: Issues and Advances in Transplant Production and Stand Establishment Research. 2004. Vol. 631. P. 193–199. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.631.25>
7. Effect of Shade on Yield, Quality and Photosynthesis-Related Parameters of Sweet Pepper Plants / J. López-Marin [et al.] // ISHS Acta Horticulturae 956: VII International Symposium on Light in Horticultural Systems. 2012. Vol. 956. P. 545–552. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.65>
8. Diaz-Perez J. C. Bell Pepper (*Capsicum annuum* L.) Crop as Affected by Shade Level: Micro-environment, Plant Growth, Leaf Gas Exchange, and Leaf Mineral Nutrient Concentration // Journal of the American Society for Horticultural Science. 2013. Vol. 48, Issue 2. P. 175–182. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.2.175>
9. Градиентный компенсационный светофильтр : заявка на патент № 2002125847 Российская Федерация / Верхотуров О. П., Сысоев Е. В., Хахалин А. А. Заявл. 27.09.2002 ; опубл. 27.03.2004. 1 с. URL: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2002125847&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2002125847&TypeFile=html) (дата обращения: 29.12.2021).
10. Градиентный однолинзовый микрообъектив : патент 1758622 СССР / Казаков В. И., Ровенская Т. С., Точкина Г. А. № 4840867 ; заявл. 29.05.1990 ; опубл. 30.08.1992. 6 с. URL: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=1758622&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=1758622&TypeFile=html) (дата обращения: 10.07.2021).
11. Piepho H. P., Buchse A., Emrich K. A Hitchhiker’s Guide to Mixed Models for Randomized Experiments // Journal of Agronomy and Crop Science. 2003. Vol. 189, Issue 5. P. 310–322. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00049.x>
12. Fernandez G. C. J. Design and Analysis of Commonly Used Comparative Horticultural Experiments // Journal of the American Society for Horticultural Science. 2007. Vol. 42, Issue 5. P. 1052–1069. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.5.1052>
13. Chi Y., Wang E., Wang J. Identifying the Anthropogenic Influence on the Spatial Distribution of Plant Diversity in an Estuarine Island through Multiple Gradients [Электронный ресурс] // Global Ecology and Conservation. 2020. Vol. 21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00833>
14. Garnier E., Navas M.-L. A Trait-Based Approach to Comparative Functional Plant Ecology: Concepts, Methods and Applications for Agroecology. A Review // Agronomy for Sustainable Development. 2012. Vol. 32. P. 365–399. doi: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0036-y>
15. Скляр В. Г. Использование градиентного анализа при изучении естественного возобновления лесов // Вісник Запорізького національного університету. Біологічні науки. 2015. № 2. С. 196–207. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25038598> (дата обращения: 10.02.2022).

16. Growth and Resource Allocation of Juvenile European Beech and Sycamore Maple Along Light Availability Gradients in Uneven-Aged Forests [Электронный ресурс] / M. Brüllhardt [et al.] // Forest Ecology and Management. 2020. Vol. 474. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118314>
17. Leeftang L., During H. J., Werger M. J. A. The Role of Petioles in Light Acquisition by Hydrocotyle Vulgaris L. in a Vertical Light Gradient // Oecologia. 1998. Vol. 117. P. 235–238. doi: <https://doi.org/10.1007/s004420050653>
18. Wang S., Zhou D.-W. Architectural Plasticity in Response to Population Density in Abutilon Theophrasti (Malvaceae) // Ecological Research. 2022. Vol. 37, Issue 2. P. 228–239. doi: <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12284>
19. Гайнутдинов И. А., Абдуллин Ш. Р. Градиентный анализ влияния освещенности на состав цианобактериально-водорослевых ценозов в привходовой шахте пещеры Кутук-Сумган (Республика Башкортостан) // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2016. Т. 21, № 2. С. 11–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26082250> (дата обращения: 10.02.2022).
20. Xu Y. Seven Dimensions of Light in Regulating Plant Growth // ISHS Acta Horticulturae 1134: VIII International Symposium on Light in Horticulture. 2016. Vol. 1134. P. 445–452. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.56>
21. Семенова Н. А., Гришин А. А., Дорохов А. А. Аналитический обзор климатических камер для выращивания овощных культур // Вестник НГИЭИ. 2020. № 1. С. 5–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41863682> (дата обращения: 10.02.2022).
22. Многоярусный стеллаж для научно-исследовательских работ : патент 2537923 Российская Федерация / Петренко Э. Э. [и др.]. № 2013122320/13 ; заявл. 14.05.2013 ; опубл. 10.01.2015. 5 с. URL: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2537923&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2537923&TypeFile=html) (дата обращения: 20.12.2021).
23. Градиентный фитотрон : патент 207773 Российская Федерация / Мартиросян Ю. Ц. [и др.]. № 2020137207 ; заявл. 12.11.2020 ; опубл. 16.11.2021. 2 с. URL: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPM&DocNumber=207773&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=207773&TypeFile=html) (дата обращения: 20.12.2021).
24. Park Y. H., Park J. K. Light Gradient-Based Screening of Arabidopsis Thaliana on a 384-Well Type Plant Array Chip [Электронный ресурс] // Micromachines. 2020. Vol. 11, Issue 2. doi: <https://doi.org/10.3390/mi11020191>
25. LED Light Gradient as a Screening Tool for Light Quality Responses in Model Plant Species [Электронный ресурс] / P. Lejeune [et al.] // BioRxiv. 2020. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.10.08.320002>
26. Ракутько Е. Н., Ракутько С. А., Васкин А. В. Влияние компоновочных параметров облучательной установки на энергоэкологичность светокультуры // Агроэкоинженерия. 2021. № 3. С. 33–51. doi: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-33-50>
27. Regulation of Nitric Oxide to Capsicum under Lower Light Intensities / L. Li [et al.] // South African Journal of Botany. 2020. Vol. 132. P. 268–276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.05.020>
28. Jacquemoud S., Ustin S. Leaf Optical Properties. Cambridge : Cambridge University Press, 2019. 556 p. doi: <https://doi.org/10.1017/9781108686457>
29. Цифровой двойник растения в светокультуре на примере перца (Capsicum Annuum L.) в рассадный период / Е. Н. Ракутько [и др.] // Агроэкоинженерия. 2021. № 3. С. 13–33. doi: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-13-33>
30. Ракутько С. А., Ракутько Е. Н. Оценка равномерности поверхностного распределения потока излучения как фактора энергоэффективности светокультуры // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 3. С. 470–486. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.470-486>

Поступила 14.03.2022; одобрена после рецензирования 20.04.2022; принята к публикации 06.05.2022

Об авторах:

**Ракутько Елена Николаевна**, научный сотрудник Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала Федерального

научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, Researcher ID: AAW-6856-2021, elena.rakutko@mail.ru

**Ракутько Сергей Анатольевич**, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией энергоэкологии светокультуры Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, Researcher ID: B-2745-2014, Scopus ID: 26040971100, sergej1964@yandex.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Е. Н. Ракутько – анализ научных источников, математическое моделирование, написание статьи.

С. А. Ракутько – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи, написание статьи.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Janick J. The Origins of Horticultural Technology and Science. In: ISHS Acta Horticulturae 759: XXVII International Horticultural Congress – IHC2006: Global Horticulture: Diversity and Harmony, an Introduction to IHC2006. 2007. Vol. 759. p. 41–60. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.759.3>

2. Paik I., Huq E. Plant Photoreceptors: Multi-Functional Sensory Proteins and Their Signaling Networks. *Seminars in Cell & Developmental Biology*. 2019;92:114–121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2019.03.007>

3. Yang D., Seaton D.D., Kraemer J., Halliday K.J. Photoreceptor Effects on Plant Biomass, Resource Allocation, and Metabolic State. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016;113(27):7667–7672. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1601309113>

4. Gómez C., Currey C.J., Dickson R.W., et al. Controlled Environment Food Production for Urban Agriculture. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2019;54(9):1448–1458. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14073-19>

5. Cheng G.-X., Zhang R.-X., Liu Sh., et al. Leaf-Color Mutation Induced by Ethyl Methane Sulfonate and Genetic and Physio-Biochemical Characterization of Leaf-Color Mutants in Pepper (*Capsicum Annuum* L.). *Scientia Horticulturae*. 2019;257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2019.108709>

6. Rajapakse N.C., Li S. Exclusion of Far Red Light by Photosensitive Greenhouse Films Reduces Height of Vegetable Seedlings. In: ISHS Acta Horticulturae 631: XXVI International Horticultural Congress: Issues and Advances in Transplant Production and Stand Establishment Research. 2004. Vol. 631. p. 193–199. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.631.25>

7. López-Marin J., Gálvez A., González A., et al. Effect of Shade on Yield, Quality and Photosynthesis-Related Parameters of Sweet Pepper Plants. In: ISHS Acta Horticulturae 956: VII International Symposium on Light in Horticultural Systems. 2012. Vol. 956. p. 545–552. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.65>

8. Diaz-Perez J.C. Bell Pepper (*Capsicum annuum* L.) Crop as Affected by Shade Level: Microenvironment, Plant Growth, Leaf Gas Exchange, and Leaf Mineral Nutrient Concentration. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2013;48(2):175–182. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.2.175>

9. Verkhoturov O.P., Sysoev Ye.V., Khakhalin A.A. [Gradient Compensating Filter]. Patent Application no. 2,002,125,847 Russian Federation. 2004 March 27. 1 p. Available at: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2002125847&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2002125847&TypeFile=html) (accessed 29.12.2021). (In Russ.)

10. Kazakov V.I., Rovenskaya T.S., Tochkina G.A. [Gradient Single Lens Micro Lens]. Patent 1,758,622 USSR. 1992 August 30. 6 p. Available at: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=1758622&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=1758622&TypeFile=html) (accessed 10.07.2021). (In Russ.)
11. Piepho H.P., Buchse A., Emrich K. A Hitchhiker's Guide to Mixed Models for Randomized Experiments. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2003;189(5):310–322. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00049.x>
12. Fernandez G.C.J. Design and Analysis of Commonly Used Comparative Horticultural Experiments. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2007;42(5):1052–1069. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.5.1052>
13. Chi Y., Wang E., Wang J. Identifying the Anthropogenic Influence on the Spatial Distribution of Plant Diversity in an Estuarine Island through Multiple Gradients. *Global Ecology and Conservation*. 2020;21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00833>
14. Garnier E., Navas M.-L. A Trait-Based Approach to Comparative Functional Plant Ecology: Concepts, Methods and Applications for Agroecology. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2012;32:365–399. doi: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0036-y>
15. Skliar V.G. Using Gradient Analysis in the Study Natural Forest Regrowth. *Visnik Zaporizkogo natsionalnogo universitetu. Biologichni nauki*. 2015;(2):196–207. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25038598> (accessed 10.02.2022). (In Ukr., abstract in Eng.)
16. Brüllhardt M., Rotach P., Bigler C., et al. Growth and Resource Allocation of Juvenile European Beech and Sycamore Maple Along Light Availability Gradients in Uneven-Aged Forests. *Forest Ecology and Management*. 2020;474. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118314>
17. Leeftang L., During H.J., Werger M.J.A. The Role of Petioles in Light Acquisition by *Hydrocotyle Vulgaris* L. in a Vertical Light Gradient. *Oecologia*. 1998;117:235–238. doi: <https://doi.org/10.1007/s004420050653>
18. Wang S., Zhou D.-W. Architectural Plasticity in Response to Population Density in *Abutilon Theophrasti* (Malvaceae). *Ecological Research*. 2022;37(2):228–239. doi: <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12284>
19. Gaynutdinov I.A., Abdullin Sh.R. Gradient Analysis of the Light Influence on the Composition of Cyanobacteria and Algae Coenoses at the Entrance Shaft of the Kutuk-Sumgan Cave (Republic of Bashkortostan). *Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2016;21(2):11–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26082250> (accessed 10.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Xu Y. Seven Dimensions of Light in Regulating Plant Growth. In: ISHS Acta Horticulturae 1134: VIII International Symposium on Light in Horticulture. 2016. Vol. 1134. p. 445–452. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.56>
21. Semenova N.A., Grishin A.A., Dorokhov A.A. Analytical Review of Climatic Chambers for Vegetable Crops Growing. *Bulletin NGII*. 2020;(1):5–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41863682> (accessed 10.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
22. Petrenko E.E., Stepanchuk G.V., Klyuchka Ye.P., Ponomareva N.Ye. [Multi-Level Shelving for Research Work]. Patent 2,537,923 Russian Federation. 2015 January 10. 5 p. Available at: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2537923&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2537923&TypeFile=html) (accessed 20.12.2021). (In Russ.)
23. Martirosyan Yu.T., Martirosyan L.Yu., Martirosyan D.Yu., Akopyan V.B. [Gradient Phytotron]. Patent 207,773 Russian Federation. 2021 November 16. 2 p. Available at: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPM&DocNumber=207773&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=207773&TypeFile=html) (accessed 20.12.2021). (In Russ.)
24. Park Y.H., Park J.K. Light Gradient-Based Screening of *Arabidopsis Thaliana* on a 384-Well Type Plant Array Chip. *Micromachines*. 2020;11(2). doi: <https://doi.org/10.3390/mi11020191>
25. Lejeune P., Fratamico A., Bouché F., et al. LED Light Gradient as a Screening Tool for Light Quality Responses in Model Plant Species. *BioRxiv*. 2020. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.10.08.320002>
26. Rakutko Ye.N., Rakutko S.A., Vaskin A.V. Effect of Lighting Fixtures Spatial Arrangement on Energy and Ecological Performance of Greenhouse Horticulture. *Agroekoinzheneriya*. 2021;(3):33–51. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-33-50>

27. Li L., Tian S.L., Jiang J., Wang Y. Regulation of Nitric Oxide to Capsicum under Lower Light Intensities. *South African Journal of Botany*. 2020;132:268–276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.05.020>
28. Jacquemoud S., Ustin S. Leaf Optical Properties. Cambridge: Cambridge University Press; 2019. 556 p. doi: <https://doi.org/10.1017/9781108686457>
29. Rakutko Ye.N., Rakutko S.A., Mishanov A.P., Markova A.Ye. Digital Twin of a Plant in Greenhouse Horticulture: Case Study of Pepper (*Capsicum Annuum* L.) in Transplant Period. *Agroekoinzheneriya*. 2021;(3):13–33. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-13-33>
30. Rakutko S.A., Rakutko E.N. Assessment of Lighting Uniformity as a Factor of Energy Efficiency in Greenhouse Horticulture. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(3):470–486. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.470-486>

*Submitted 14.03.2022; approved after reviewing 20.04.2022; accepted for publication 06.05.2022*

*About the authors:*

**Elena N. Rakutko**, Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, Researcher ID: [AAW-6856-2021](https://orcid.org/AAW-6856-2021), [elena.rakutko@mail.ru](mailto:elena.rakutko@mail.ru)

**Sergey A. Rakutko**, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Energy Ecology of Light Culture, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, Researcher ID: [B-2745-2014](https://orcid.org/B-2745-2014), Scopus ID: [26040971100](https://orcid.org/26040971100), [sergej1964@yandex.ru](mailto:sergej1964@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

E. N. Rakutko – analysis of scientific sources, mathematical modeling, writing the article.

S. A. Rakutko – scientific guidance, formulation of the basic research concept and structure of the article, writing the article.

*All authors have read and approved the final manuscript.*