

Научная статья
УДК 631.544.4
DOI: 10.31857/S0869769825020101
EDN: GEGBFE

Влияние спектрального состава искусственного освещения на биохимический состав плодов томатов *Solanum lycopersicum* L.

И.В. Князева, А.А. Смирнов✉

Инна Валерьевна Князева
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия
knyazewa.inna@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1065-1814>

Александр Анатольевич Смирнов
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия
alexander8484@inbox.ru
<http://orcid.org/0000-0002-9236-2281>

Аннотация. Свет является важным фактором окружающей среды, который регулирует накопление микро- и макроэлементов и органических кислот в плодах томата. Применение светодиодов для освещения в процессе роста и развития томатов является эффективным методом улучшения качества плодов томатов. В этом исследовании использовались светодиодные источники света с комбинированным спектральным составом и газоразрядные лампы высокого давления при выращивании томатов в климатической камере. Методом капиллярного электрофореза определены массовые доли катионов (ионов аммония, калия, натрия, магния и кальция), анионов (хлорид-, нитрат-, сульфат- и фосфат-ионов) и органических кислот. Установлено, что тип источников света и спектральный состав оптического излучения освещения являются одними из ключевых факторов повышения качества томатов. При выращивании под светодиодами в плодах томата увеличивалась концентрация яблочной кислоты на 60%, янтарной кислоты – в 2 раза, магния – на 14% и кальция – на 57% по сравнению с плодами растений томата, выращенных под газоразрядными лампами. Таким образом, подбирая спектральный состав оптического излучения, потенциально можно увеличить содержание целевых компонентов и улучшить вкусовые качества томатов.

Ключевые слова: томат, светодиод, биохимический состав, светокультура

Для цитирования: Князева И.В., Смирнов А.А. Влияние спектрального состава искусственного освещения на биохимический состав плодов томатов *Solanum lycopersicum* L. // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 138–144. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020101>

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (рег. № НИОКТР 122022100140-3, шифр научной темы FGUN-2025-0008).

The influence of the spectral composition of artificial lighting on the biochemical composition of tomato fruits *Solanum lycopersicum* L.

I.V. Knyazeva, A.A. Smirnov

Inna V. Knyazeva

Candidate of Sciences in Biology, Senior Researcher
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
knyazewa.inna@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1065-1814>

Alexander A. Smirnov

Candidate of Sciences in Technique, Senior Researcher
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
alexander8484@inbox.ru
<http://orcid.org/0000-0002-9236-2281>

Abstract. Light is an important environmental factor that regulates the accumulation of micro- and macroelements and organic acids in tomato fruits. The use of LEDs for lighting during the growth and development of tomatoes is an effective method for improving the quality of tomato fruits. In this study, LED light sources with a combined spectral composition and high-pressure discharge lamps were used to grow tomatoes in a climate chamber. Using capillary electrophoresis, the mass fractions of cations (ammonium, potassium, sodium, magnesium and calcium ions), anions (chloride, nitrate, sulfate and phosphate ions) and organic acids were determined. It has been established that the type of light sources and the spectral composition of optical radiation are one of the key factors in improving the quality of tomatoes. When grown under LEDs, the concentration of malic acid in tomato fruits increased by 60%, succinic acid by 2 times, and magnesium by 14% and calcium by 57% compared to the fruits of tomato plants grown under gas-discharge lamps. Thus, by selecting the spectral composition of optical radiation, it is potentially possible to increase the content of target components and improve the taste of tomatoes.

Keywords: tomato, LED, biochemical composition, light culture

For citation: Knyazeva I.V., Smirnov A.A. The influence of the spectral composition of artificial lighting on the biochemical composition of tomato fruits *Solanum lycopersicum* L. *Vestnik of the FEB RAS.* 2025;(2): 138–144. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020101>

Funding. The work was carried out within the framework of the state task of the FSBSI FSAC VIM (Reg. No NIOKTR 122022100140-3, Scientific theme code FGUN-2025-0008).

Введение

Томат (*Solanum lycopersicum* L.) относится к семейству пасленовых и является одной из наиболее широко потребляемых фруктовых культур в мире. В 2022 г. в России производство помидоров защищенного грунта составило 1069,0 тыс. т [1].

К качествам томатов относятся, их внешний вид, вкус, пищевая ценность [2]. Сладкий вкус помидоров в основном обусловлен фруктозой и глюкозой, а кислый вкус – лимонной и яблочной кислотами [3]. Было установлено, что наиболее важными факторами, определяющими высокие вкусовые качества томатов, являются более высокое содержание лимонной

кислоты и более низкое содержание воды [4]. Поэтому содержание сахаров и кислот часто используется в качестве важных показателей для оценки вкуса томата. Высокое содержание щавелевой кислоты является неблагоприятным фактором для томатов с точки зрения здоровья человека, так как снижается скорость использования кальция, и может увеличиться риск образования камней в почках [5].

Для усовершенствования технологии культивирования овощной продукции в защищенном грунте важны исследования накопления микро- и макроэлементов в зависимости от вида растений и условий их выращивания. Внешняя среда (например, свет, вода и удобрения) также играет важную роль в регуляции синтеза витаминов и органических кислот [6]. В последнее время в защищенном грунте постепенно внедряются светодиодные источники света для облучения растений [7]. Благодаря возможности подбора спектрального состава излучения светодиодные источники света позволяют оптимизировать условия выращивания под конкретную овощную культуру. Ранее нами были проведены исследования влияния спектра излучения натриевых ламп и светодиодов с преобладанием красного и синего излучения на экстракцию микро- и макроэлементов в листьях огурца, томата и салата [8]. Было установлено, что с увеличением доли зеленого света в варианте с натриевыми лампами в листьях огурца и томата коэффициент накопления магния (а в листьях томата еще и железа и марганца) был выше, чем при облучении светодиодами. Другое исследование по выращиванию томатов в теплице с дополнительной светодиодной досветкой показало, что облучение монохроматическим светом красных светодиодов привело к большему накоплению солей фосфора ($P-PO_4$) и калия (K^+) и меньшему накоплению азота ($N-NO_3$) по сравнению с контрольной группой, которая не подвергалась дополнительному светодиодному освещению [9]. Красные светодиоды также увеличивают содержание магния и кальция в плодах томатов – на 74 и 40% по сравнению с натриевыми лампами, а добавление дальнего красного диапазона излучения еще больше увеличивает содержание и концентрацию натрия [10]. К тому же спектр света влияет на сенсорные характеристики томатов и морфологию листьев [11]. Снижение качества плодов происходит при использовании верхних натриевых ламп в качестве дополнительного источника света при выращивании томатов в теплицах.

Таким образом, различные участки спектра по-разному влияют на накопление микро- и макроэлементов и органических кислот в плодах томатов. Комбинируя светодиоды с разными диапазонами излучения, можно улучшить питательную ценность и вкусовые качества томатов. Целью этого исследования было оценить влияние светодиодных источников света с комбинированным спектральным составом на биохимический состав плодов томатов *Solanum lycopersicum* L., выращенных в климатической камере.

Материалы и методы

Объектом исследований был выбран сорт Благодатный селекции ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства». Сорт отличается среднеранним развитием от массовых всходов до созревания 98–107 суток, детерминантным типом. Растения томатов выращивались в двух климатических камерах (по 30 в каждой камере) под разным освещением на минераловатном субстрате с капельным поливом. Для полива использовался стандартный раствор Кнопа. Микроклиматические параметры в камере поддерживались с помощью климатического компьютера. Относительная влажность воздуха выдерживалась на уровне $60 \pm 10\%$, температура воздуха день/ночь – $25/18 \pm 5$ °С.

Для проведения экспериментальных исследований использовали светодиодное освещение (СИД) с суммарной облученностью ФАР 278 ± 10 ммоль/м²с. Распределение облученности по спектральным диапазонам: синий (47,9 ммоль/м²с), зеленый (62,7 ммоль/м²с), красный (119,6 ммоль/м²с) и дальний красный (48,3 ммоль/м²с). Спектральный состав излучения опытного варианта представлен на рис. 1.

В качестве контрольного источника освещения использовали комбинацию из двух натриевых трубчатых ламп высокого давления ДНАТ-600 и одной металлогалогенной лампы ДРИ-600 с цветовой температурой 4000 К. Облученность ФАР составляла 270 ± 10 ммоль/м²с. Спектральный состав излучения контрольного варианта представлен на рис. 2.

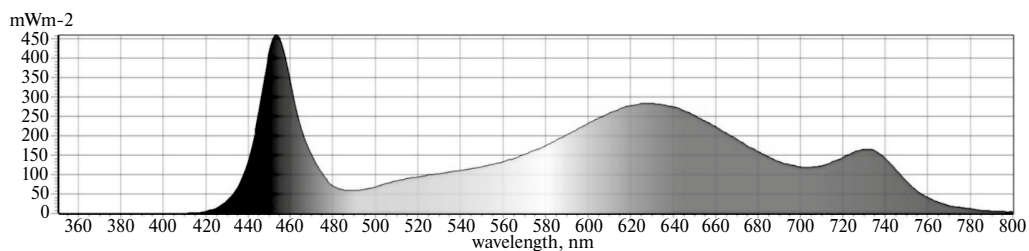


Рис. 1. Спектральный состав опытного светодиодного освещения (СИД) в климатической камере при выращивании растений томатов

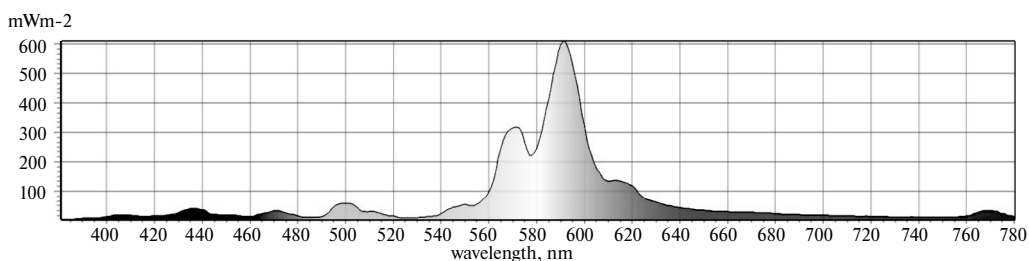


Рис. 2. Спектральный состав контрольного варианта освещения в климатической камере при выращивании растений томатов

Измерения плотности потока фотонов и спектрального состава излучения проводили с помощью прибора МК350D Compact Spectrometer (UPRtek Corp. Miaoli County, Taiwan).

Определение массовой доли катионов (ионов аммония, калия, натрия, магния и кальция), анионов (хлорид-, нитрат-, сульфат- и фосфат-ионов) и органических кислот проводилось методом капиллярного электрофореза с использованием аналитического комплекса на основе системы капиллярного электрофореза «Капель-205» (Россия).

Для исследования отбирались плоды томата с 5 растений, выбранных случайным образом. Анализ данных оценивали методами дисперсионного анализа с использованием программного обеспечения STADIA 8.0 (Россия). Для проверки достоверности полученных данных использовали тест Дункана при уровне вероятности $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного биохимического анализа методом капиллярного электрофореза был определен состав органических кислот в плодах томата (рис. 3). по соотношению концентраций всех проанализированных органических кислот в плодах преобладает лимонная кислота, далее по содержанию – яблочная кислота. Тип освещения не повлиял на накопление щавелевой кислоты, ее значение варьировало в пределах 1,84–2,08 мг/100 г. Плоды томатов с незначительным содержанием щавелевой кислоты рекомендуются для употребления при диетическом питании [12].

Светодиодное освещение оказывало лучшее воздействие на синтез указанных выше органических кислот. Содержание яблочной кислоты в плодах томатов при светодиодном освещении составило 34,43 мг/100 г сырой массы по сравнению с натриевым освещением (контроль) – 21,28 мг/100 г сырой массы плодов томатов. Яблочная кислота отвечает за метаболизм обмена веществ в живых организмах, поэтому увеличение концентрации кислоты положительно влияет на обменные процессы.

Минеральные вещества являются незаменимыми микронутриентами питания человека, которые должны ежедневно потребляться с пищей. К важным макроэлементам относят

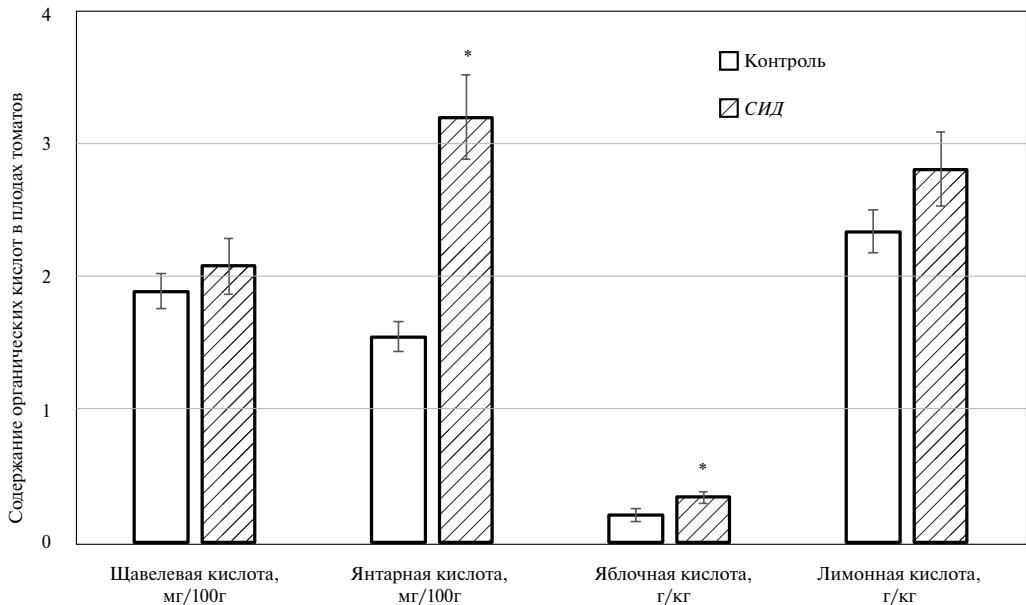


Рис. 3. Содержание органических кислот в плодах томата сорта Благодатный. Наличие символа астериска указывает на значительные различия между экспериментальными и контрольными образцами ($p < 0,05$)

калий, кальций, магний, фосфор и серу. Нами был изучен катионно-анионный состав плодов томатов, выращенных под разным освещением (рис. 4).

Освещение в большей степени повлияло на содержание магния, кальция и серы в плодах томатов. Повышенное содержание макроэлементов наблюдалось в плодах при светодиодном освещении. Выявлено, что при светодиодном освещении концентрация магния составила 11,2 мг/100 г, что по отношению к контролю 9,8 мг/100 г больше на 14,3%. Светодиоды могли привести к временному повышению содержания магния в листьях в качестве защитного механизма растений от чрезмерного поглощения излучения ФАР, так как спектр излучения светодиодов хорошо согласуется со спектром поглощения основных фотосинтетических пигментов растений. Это впоследствии привело к увеличению концентрации магния в плодах.

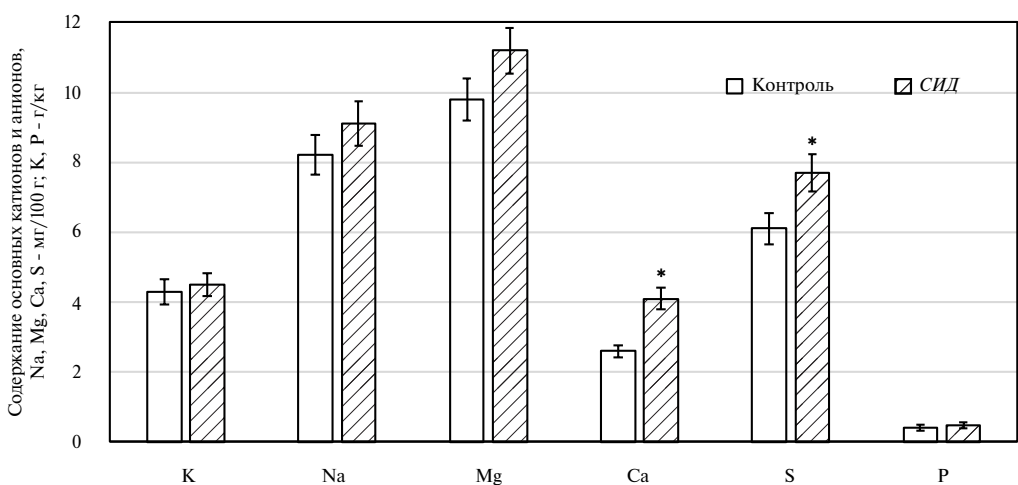


Рис. 4. Содержание основных катионов и анионов в сырой массе плодов томатов сорта Благодатный. Наличие символа астериска указывает на значительные различия между экспериментальными и контрольными образцами ($p < 0,05$)

Как видно из рис. 4, светодиодное освещение также значительно повлияло на накопление кальция в плодах томатов с прибавкой в 57,7% и серы, что также наблюдалось и в другом исследовании [10]. по содержанию калия, натрия и фосфора различий между изучаемыми вариантами освещения не наблюдалось.

Следует отметить, что наблюдаемые различия в биохимическом составе могут быть вызваны множеством факторов, таких как равномерность распределения света, спектр излучения, а также изменения микроклимата, создаваемого этими источниками света. Например, газоразрядные лампы содержат в спектре излучения много инфракрасной составляющей, что повышает температуру листьев, особенно верхней части растений [7]. Увеличение температуры листьев влияет на транспирацию и, следовательно, может повлиять на потребление и накопление микро- и макроэлементов, это требует дальнейшего изучения.

Выводы

Наши исследования показали, что тип источников света и спектральный состав оптического излучения освещения являются одними из ключевых факторов повышения качества томатов. Светодиоды позволяют снизить потребление энергии и улучшить качественные характеристики томатов. Установлено, что под светодиодами в плодах томата больше накапливались яблочная и янтарные кислоты, магний, кальций и сера. Подбирая спектральный состав оптического излучения светодиодов, потенциально можно увеличить содержание целевых компонентов и улучшить вкусовые качества томатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бутов И.С. Объем рынка и потребление томатов в России // Картофель и овощи. 2024. № 1. С. 12–16.
2. Pahy R., Tlili I., Siddiqui M.W., Hdider C., Lenucci M.S. Inside and beyond color: Comparative overview of functional quality of tomato and watermelon fruits // *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. 769.
3. Zhang J., Liu S., Zhu X., Chang Y., Wang C., Ma N., Wang J., Zhang X., Lyu J., Xie J. A Comprehensive Evaluation of Tomato Fruit Quality and Identification of Volatile Compounds // *Plants*. 2023. Vol. 12. 2947.
4. Knyazeva I.V., Dorokhov A.S., Verzhinina O.V., Myachikova N.I., Grishin A.A., Gudimo V.B., Georgescu C. The effect of amber acid on the productivity and chemical composition of tomatoes grown in a climatic chamber // *Scientific Study, Research Chemistry, Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*. 2021. Vol. 22 (3). P. 311–319.
5. Palmieri F., Estoppey A., House G.L., Lohberger A., Bindschedler S., Chain P.S., Junier P. Oxalic acid, a molecule at the crossroads of bacterial-fungal interactions // *Advances in Applied Microbiology*. 2019. Vol. 106. P. 49–77.
6. Agbede T., Adekiya A., Ale M., Eifediyi E.K., Olatuni C.A. Soil properties, growth, fruit yield, mineral, lycopene and vitamin C contents of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) grown with green manures and NPK fertilizer // *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 2018. Vol. 83. P. 291–297.
7. Бурьнин Д.А., Смирнов А.А. Обзор источников освещения для тепличных хозяйств и фабрик растений // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68, № 1 (42). С. 105–113.
8. Холманский А.С., Смирнов А.А., Зайцева Н.В. Зависимость экстракции микро- и макроэлементов культурными растениями от спектра излучения фитооблучателя // *Агрофизика*. 2019. № 1. С. 52–59.
9. Neață D.S., Popescu G., Popa P., Drăghici E.E., Dobrinou M., Nicolae R., Vișan I. Biochemical changes, induced by led light, in tomato plants, grown in the integrated management system (SMI) of agroecosystem resistance // *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. Vol. 64, No. 1. 2021.
10. Kim H., Yang T., Choi S., Wang Y., Lin M., Liceaga A.M. Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes // *Scientia Horticulturae*. 2019. Vol. 261. 108985.

11. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Медведев Г.В. Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 2. С. 40–48. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48>.
12. Ших Е.В., Елизарова Е.В., Махова А.А., Брагина Т.В. Роль томатов и продуктов из них в здоровом питании человека // Вопросы питания. 2021. Т. 90, № 4. С. 129–137.

REFERENCES

1. Butov I.S. Ob'yem rynka i potrebleniye tomatov v Rossii = [Market volume and consumption of tomatoes in Russia]. *Potatoes and Vegetables (Russia)*. 2024;(1):12–16. (In Russ.).
2. Ilahy R., Tlili I., Siddiqui M.W., Hdidier C., Lenucci M.S. Inside and beyond color: Comparative overview of functional quality of tomato and watermelon fruits. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10. 769.
3. Zhang J., Liu S., Zhu X., Chang Y., Wang C., Ma N., Wang J., Zhang X., Lyu J., Xie J. A Comprehensive Evaluation of Tomato Fruit Quality and Identification of Volatile Compounds. *Plants*. 2023;12. 2947.
4. Knyazeva I.V., Dorokhov A.S., Vershinina O.V., Myachikova N.I., Grishin A.A., Gudimo V.B., Georgescu C. The effect of amber acid on the productivity and chemical composition of tomatoes grown in a climatic chamber. *Scientific Study & Research Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*. 2021;22(3):311–319.
5. Palmieri F., Estoppey A., House G.L., Lohberger A., Bindschedler S., Chain P.S., Junier P. Oxalic acid, a molecule at the crossroads of bacterial-fungal interactions. *Advances in Applied Microbiology*. 2019;106:49–77.
6. Agbede T., Adekiya A., Ale M., Eifediyi E.K., Olatuni C.A. Soil properties, growth, fruit yield, mineral, lycopene and vitamin C contents of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) grown with green manures and NPK fertilizer. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 2018;83:291–297.
7. Burynin D.A., Smirnov A.A. Obzor istochnikov osveshcheniya dlya teplichnykh khozyaystv i fabric rasteniy = [Overview of the grow lights used in greenhouses and plant factories]. *Elektrotehnologii i Elektrooborudovanie v APK (Russia)*. 2021;68(1):105–113. (In Russ.).
8. Kholmansky A.S., Smirnov A.A., Zaitseva N.V. Zavisimost' ekstraktsii mikro- i makroelementov kul'turnymi rasteniyami ot spectra izlucheniya fitoobluchatelya = [Dependence of the extraction of micro- and macroelements by cultivated plants on the radiation spectrum of the phyto-irradiator]. *Agrophysics (Russia)*. 2019;1:52–59. (In Russ.).
9. Neață D.S., Popescu G., Popa P., Drăghici E.E., Dobrinou M., Nicolae R., Vișan I. Biochemical changes, induced by led light, in tomato plants, grown in the integrated management system (SMI) of agroecosystem resistance. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2021;64(1).
10. Kim H., Yang T., Choi S., Wang Y., Lin M., Liceaga A.M. Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*. 2019;261. 108985.
11. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V. Development of an Experimental Phytotron and its Application in the Research on the Energy-ecological Efficiency of Indoor Plant Lighting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(2):40–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48>.
12. Shikh E.V., Elizarova E.V., Makhova A.A., Bragina T.V. Rol' tomatov i produktov iz nikh v zdorovom pitanii cheloveka = [The role of tomatoes and products made from them in healthy human nutrition]. *Voprosy Pitaniya (Russia)*. 2021;90(4):129–137. (In Russ.).