

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY

DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-2-828

УДК 58.084.1



Научная статья

РЕАЛЬНАЯ
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОСИСТЕМЫ
PSII ERUCA SATIVA ПОД РАЗЛИЧНЫМ
МОНОХРОМНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

*Ю.Н. Кульчин, А.С. Холин, С.О. Кожанов, Е.П. Субботин,
К.В. Ковалевский, Н.И. Субботина, А.С. Гомольский*

Обоснование. В настоящее время для управления развитием растений и наилучшего понимания отклика растений на различные источники света, особенно в связи с развитием индустрии и применением светодиодных источников света, необходимо понимание фотохимических процессов, происходящих при воздействии различных факторов. В ряде работ установлено значительное воздействие различных интенсивностей и спектра света на рост, морфометрические характеристики растений, которые, в том числе, зависят от фотохимической активности. Проведен ряд работ по оценке влияния интенсивности и спектра света на фотохимические характеристики различных культур, в том числе руколы. Тем не менее, недостаточное количество таких работ и отсутствие оценки реальной эффективности фотосистемы при выращивании промышленно значимых культур при высоких интенсивностях стало обоснованием для настоящей работы.

Цель. На примере промышленно значимой культуры подтвердить факт значительного воздействия различных световых режимов на фотохимическую активность растений и определить оптимальные световые режимы для реальной эффективности фотосистемы PSII.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи были проведены измерения ключевых параметров флуоресценции хлорофилла и оценка фотосинтетической активности руколы. Образцы растений культивировались в фитобоксах со светильниками трех монохромных спектров света (красный (R), зеленый (G), синий (B)). В каждом определенном спектре света

было шесть постоянных уровней облучения (100, 300, 500, 700, 1000, 1400 мкмоль/с*м²). В качестве контрольного варианта использовался теплый белый свет с интенсивностью 200 мкмоль/с*м².

Измерение параметров флуоресценции хлорофилла в листьях руколы на 28 день после высаживания проводили на импульсном флуориметре Hansatech FMS 1+ в течение одного дня в фитобоксах. Были проведены измерения флуоресценции адаптированных к актиничному свету листьев (*F_s*) и максимальной флуоресценции адаптированных к актиничному свету листьев (*F_m'*). Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью пакета Microsoft Office Excel (USA).

Результаты. Измерения показали, что фотохимический аппарат руколы по-разному реагирует на стрессовое состояние, вызванное высоким уровнем облученности определенным цветом. Реальная эффективность PSII для каждого монохромного светового режима и определенной интенсивности различается, что указывает на различный отклик растений на стресс, вызываемый определенным сочетанием условий роста. Уровень переноса электронов обладает прямой линейной зависимостью от увеличения PPFD.

Заключение. Таким образом, интенсивность облучения в пределах от 100 до 500 мкмоль/с*м² является наиболее оптимальной для реальной эффективности фотосистемы PSII для всех световых спектров. Использование монохроматического синего света для руколы, нежелательно, поскольку, вероятно, может вызывать нарушение защитных механизмов тушения флуоресценции.

Ключевые слова: рукола; флуоресценция хлорофилла; фотосинтез; фотозффективность PSII; LED-освещение

Для цитирования. Кульчин Ю.Н., Холин А.С., Кожанов С.О., Субботин Е.П., Ковалевский К.В., Субботина Н.И., Гомольский А. С. Реальная эффективность фотосистемы PSII *ErUCA sativa* под различным монохромным освещением // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Т. 16, №2. С. 50-69. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-2-828

Original article

THE ERUCA SATIVA PSII OPERATING EFFICIENCY UNDER DIFFERENT MONOCHROMATIC LIGHT

**Y.N. Kulchin, A.S. Kholin, S.O. Kozhanov, E.P. Subbotin,
K.V. Kovalevsky, N.I. Subbotina, A.S. Gomolsky**

Background. Recently, to control plants development and to better understanding the plants response to various light sources, largely due to advances in industry

light-emitting diodes (LEDs), it is necessary to understand the photochemical processes carrying out under impact of different factors. At the number of works authors have established a significant impact of different intensities and light spectrum on the growth and morphometric characteristics of plants. Plants growth and development depends on photochemical activity among many other factors. The range of works were carried out to assess the influence of light intensity and spectrum on the photochemical characteristics of various crops, including rocket. However, the insufficient number of works and the lack of assessment of the photosystem operating efficiency of industrially important crops grown under high light intensities became the rationale for our work.

Purpose. The main purposes of our work was to confirm the significant impact of various light treatments on the photochemical activity of plants and determine the optimal light treatments for the operating efficiency of the PSII photosystem using an industrially important crop.

Materials and methods. To reach work purposes, we measured key parameters of chlorophyll fluorescence and assessed the rocket photosynthetic activity. Plants were cultivated in phytoboxes under LEDs with three monochromatic light spectra (red (R), green (G), blue (B)). Each light spectrum treatment includes six intensities (100, 300, 500, 700, 1000, and 1400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$). Warm white light with an intensity of 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ was used as the control.

The chlorophyll fluorescence measurements in rocket leaves were conducted on the 28th day after sowing with Hansatech FMS 1+ pulsed fluorimeter in one day at phytoboxes. Fluorescence of actinic light-adapted leaves (F_s) and maximum fluorescence of actinic light-adapted leaves (F_m') were measured. Statistical analysis was performed using the Microsoft Office Excel (USA).

Results. The results obtained established that the rocket photochemical apparatus responses differently to a stressful state caused by a high irradiation level under the certain spectrum. The operating efficiency of PSII for each monochromatic light treatment and specific intensity varies. Thus, it suggests different plants responses to stress caused by the particular combination of growth conditions. The level of electron transfer has the direct linear correlation with the PPFD increase.

Conclusion. Thus, irradiation intensity in the range from 100 to 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ is the most optimal for the operating efficiency of the PSII photosystem under any light spectra used in our work. The use of monochromatic blue light for rocket is probably undesirable, as it is likely caused protective mechanisms disruption of fluorescence quenching.

Keywords: *Eruca sativa*, chlorophyll fluorescence, photosynthesis, PSII, LED-sources

For citation. Kulchin Y.N., Kholin A.S., Kozhanov S.O., Subbotin E.P., Kovalevsky K.V., Subbotina N.I., Gomolsky A.S. *The *Eruca sativa* PSII Operating Efficiency under Different Monochromatic Light. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2024, vol. 16, no. 2, pp. 50-69. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-2-828*

Введение

Для возможности управления и наилучшего понимания отклика растений на различные источники света, особенно в связи с развитием индустрии и применения светодиодных источников света, прилагаются значимые усилия. Соответственно, целью настоящей работы была оценка значимости воздействия определенных световых режимов и определенных интенсивностей излучения на фотосинтетический аппарат и происходящие в нем процессы растений на примере руколы (*Eruca sativa* Mill.). Для решения поставленной задачи были проведены измерения ключевых параметров флуоресценции хлорофилла и оценка фотосинтетической активности.

Рукола является произрастающим повсеместно растением, имеющим большую потребительскую ценность, листья которого употребляются в необработанном виде [8]. В руколе содержится большое количество микро- и макроэлементов, она обладает быстрым ростом, коротким жизненным циклом и компактностью [19]. Рукола обладает рядом полезных для здоровья человека свойств: вяжущим, мочегонным, пищеварительным, антигенотоксическим и смягчающим действием [1, 10]. Эти свойства связаны с характерным наличием биоактивных фитохимических веществ, таких как глюкозинолаты и флавоноиды. Учитывая вышесказанное, а также тот факт, что воздействие различных условий на характеристики руколы установлены в ряде работ [1, 8, 10, 15, 19], рукола была использована для данного исследования.

Ключевые параметры флуоресценции хлорофилла могут использоваться при оценке фотосинтетической активности растений *in vivo* и для оценки возможных причин изменений в фотосинтезе и развитии растений [6]. При нарушении состояния клеток под воздействием неблагоприятных условий происходят изменения флуоресценции хлорофилла, которые служат источником информации [5].

Измерение флуоресценции хлорофилла является чувствительным и относительно простым неинвазивным методом, применяемым в ряде установленных и полевых условий для мониторинга фотосинтетической активности растений [11]. Реальная квантовая эффективность фотосистемы PSII в листьях обладает линейным отношением к поглощению CO₂.

Это позволяет использовать оценку флуоресценции хлорофилла для более широкого применения при мониторинге растений.

Уровень фотосинтеза является продуктом поглощенного излучения и квантового выхода, квантовый выход, в свою очередь, зависит от поглощенного излучения и способности к фотосинтезу.

Квантовый выход (квантовая эффективность) процесса: отношение количества молекул, задействованных в процессе, к количеству фотонов, поглощённых фотосистемой. Иначе – количество молекул CO_2 , ассимилированных на 1 моль поглощенных фотонов [2]. При более высоком уровне освещенности возрастает количество закрытых фотосинтетических реакционных центров, т.е. в условиях яркого освещения скорость поглощения фотонов листьями превышает скорость ее утилизации в фотосинтетическом канале.

Актиничный свет – солнечный свет, либо свет искусственного происхождения, поглощаемый фотосинтетическим аппаратом, вызывающий движение электрона.

Лист под постоянным актиничным светом обладает уровнем флуоресценции, обозначенным F_s , который увеличивается до максимального уровня флуоресценции F_m' , когда лист подвергается краткому насыщению световой вспышкой, предельно сокращающей Q_A .

Q_A – основной пластохинон-акцептор электронов фотосистемы PSII [6].

F_s – Выход флуоресценции в адаптированных к свету листьях, на которые оказывают влияние многие факторы.

F_q'/F_m' – реальная эффективность фотосистемы PSII, где F_m' – интенсивность флуоресценции хлорофилла во время насыщающей вспышки, созданной на фоне постоянно действующего света; F_q' – разница во флуоресценции между F_m' и F_s (фотохимическое тушение флуоресценции открытыми центрами системы PSII). Позволяет оценить эффективность, с которой свет, поглощенный фотосистемой PSII, используется для редукции Q_A . При заданной PPFD (фотосинтетически активной плотности потока фотонов) этот параметр позволяет оценить квантовый выход линейного потока электронов через PSII.

Существующая модель для фотохимии фотосистемы II (PSII), в которой сопоставлены фотохимическая активность и процессы флуоресценции и расход тепла на энергию возбуждения в пигментной антенне системы PSII, основана на предположении, что перенос электрона из центра реакции хлорофилла P_{680} к основному пластохинон-акцептору системы PSII (Q_A) вызывает тушение флуоресценции [6, 17]. Этот процесс именуется фотохимическим тушением. Увеличение уровня расхода тепла приводит к нефотохимическому тушению флуоресценции [17, 22].

Растения используют свет в качестве источника для фотосинтетической деятельности посредством отклика на его интенсивность, продолжительность и характеристики [14]. Свет воспринимается фотосенсорами – криптохромами, фитохромами и фототропином, которые обеспечивают специфические физиологические отклики растения [13]. Как было установлено ранее, различный световой спектр и интенсивность света значительно влияют на развитие и физиологию растений [3, 4, 15, 19]. Тем не менее, работ, оценивающих воздействие спектра и интенсивности света на фотохимическую активность промышленно значимых культур, которой является рукола [7], недостаточно. В ряде работ [9, 18, 20, 21, 23, 24] для различных культур установлено, что спектральный состав и интенсивность света оказывают значительное влияние на фотохимическую активность растений. В настоящей работе использованы интенсивности света от 100 до 1400 мкмоль/с*м² и монохромные световые режимы. В настоящее время светодиодные источники света используются в качестве надежного источника в управляемом сельскохозяйственном производстве, поскольку обладают требуемыми характеристиками: небольшим весом, безопасностью и долгим сроком службы [12, 16, 25].

В работе [8] проведена оценка фотосинтетической активности руколы, культивируемой под разными режимами световой интенсивности, спектра и фотопериода. Авторы использовали интенсивности 160, 190 и 220 мкмоль/с*м² и комбинированные световые режимы. В работе [19] проведена оценка воздействия различных сочетаний красного, синего и зеленого света на развитие руколы по морфометрическим характеристикам, содержанию аскорбиновой кислоты, Р, К и Са. В работе [15] установлен факт повышения продуктивности руколы при определенных интенсивностях (100, 1000 и 1400 мкмоль/с*м²) монохроматического света. Тем не менее, оценка сочетания воздействия монохроматических световых режимов широкого ряда интенсивностей на реальную квантовую эффективность фотосистемы PSII в упомянутых работах не проводилась. Выбор монохроматических режимов света обусловлен меньшей сложностью в изготовлении источников света при промышленном применении и сопутствующей экономической выгодой при установленном повышении продуктивности.

Цель исследования

На примере промышленно значимой культуры подтвердить факт значительного воздействия различных световых режимов на фотохимическую активность растений и определить оптимальные световые режимы для реальной эффективности фотосистемы PSII.

Материалы и методы исследования

Растительный материал: рукола сорта «Индау Покер» (ООО «Группа компаний «Гавриш»», Москва). Эксперимент проводился в лабораторном помещении ИАПУ ДВО РАН. В исследовании применялись технические решения (световые боксы и светильники), разработанные в ИАПУ ДВО РАН, защищенные патентами. Семена руколы замачивались в дистиллированной воде в течение трех дней до появления равномерных ростков. Далее ростки высаживались в пластиковые горшки (В ´ Ш ´ Г, см: 9,5 ´ 8 ´ 8), с универсальным почвенным грунтом (готовый почвогрунт «Универсальный» с содержанием: N1:P1:K1, мг/л: 160-240:145-215:180-290, органическое вещество, мг/л: 35, рН 5.5–7, ООО Терра Мастер, Новосибирск, Российская Федерация), смешанным с нижним слоем дренажа (агротехнический керамзит средний, ООО «Терра Мастер», Новосибирск). Образцы растений культивировались в световых боксах со светильниками трех монохромных спектров света (красный (R), зеленый (G), синий (B)). В каждом определенном спектре света было шесть постоянных уровней облучения (100, 300, 500, 700, 1000, 1400 мкмоль/с*м²). В качестве контрольного варианта использовался теплый белый свет с интенсивностью 200 мкмоль/с*м². Температурный режим на протяжении всего эксперимента был на постоянном уровне в 21° С. Режим светового периода был следующим: день/ночь: 16/8 ч.

Измерение параметров флуоресценции хлорофилла в листьях руколы на 28 день после высаживания проводили на импульсном флуориметре Hansatech FMS 1+ в течение одного дня в световых боксах. Были проведены измерения флуоресценции адаптированных к актиничному свету листьев (Fs) и максимальной флуоресценции адаптированных к актиничному свету листьев (Fm'). Источником для модулированного света являлся свет с длиной волны 594 нм, источником для актиничного света и насыщающих вспышек являлся свет с максимальной интенсивностью фотосинтетически активной радиации для актиничного света – 4,000 мкмоль/с*м², для насыщающих вспышек – 13,000 мкмоль/с*м².

Реальная эффективность фотосистемы PSII в листе определялась согласно уравнению (1):

$$\frac{Fq'}{Fm'} = 1 - \frac{Fs'}{Fm'} \quad (1)$$

Уровень переноса электронов (ETR) вычислялся согласно формуле (2):

$$I. \text{Leaf fraction PSII. } (Fq'/Fm') \quad (2)$$

Где:

I – PPFD (плотность потока фотонов), поступающая на лист;

A_{leaf} – поглощенная листом пропорция поступающего PPFD, принимаемая за 0,84 (84%);

$fraction_{PSII}$ – фракция поглощенного PPFD, получаемого фотосистемой PSII, принимаемая за 0,5;

Fq'/Fm' – реальная эффективность фотосистемы PSII

Результаты исследования и обсуждение

Были проведены измерения флуоресценции хлорофилла в адаптированных к актиничному свету листьях руколы (Fs) и измерения максимальной флуоресценции (Fm') при постоянных условиях уровня освещенности и температуры. Реальная эффективность фотосистемы PSII рассчитана согласно приведенной ранее формуле. Результаты представлены в виде сравнительных графиков (рисунок 1-4).

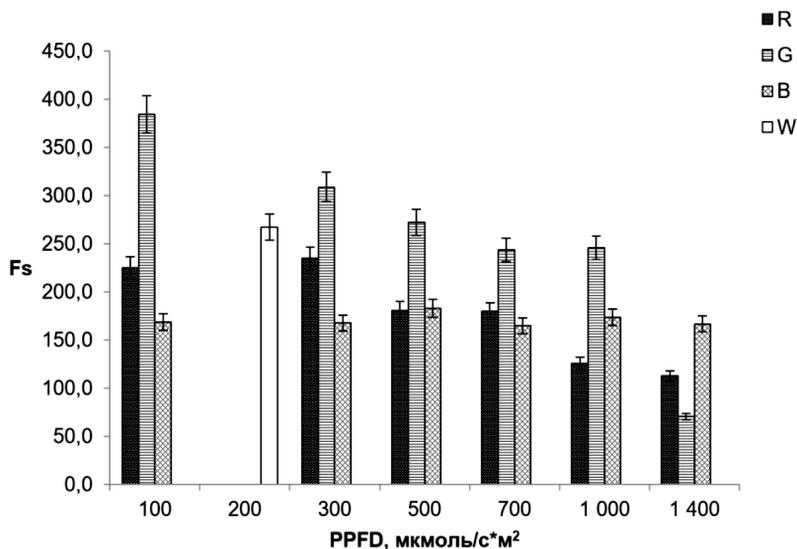


Рис. 1. Флуоресценция хлорофилла, измеренная в листьях, адаптированных к актиничному монохромному свету

Измерения показали, что фотохимический аппарат руколы по-разному реагирует на стрессовое состояние, вызванное высоким уровнем облученности определенным цветом. При оценке флуоресценции хлорофилла (Fs)

и максимальной флуоресценции хлорофилла (F_m') наблюдается последовательное снижение флуоресценции в зависимости от PPFD в красном и зеленом спектрах облучения. Это связано с фотохимическим и нефотохимическим тушением флуоресценции, возникающим, как защитный механизм от разрушения фотосистемы.

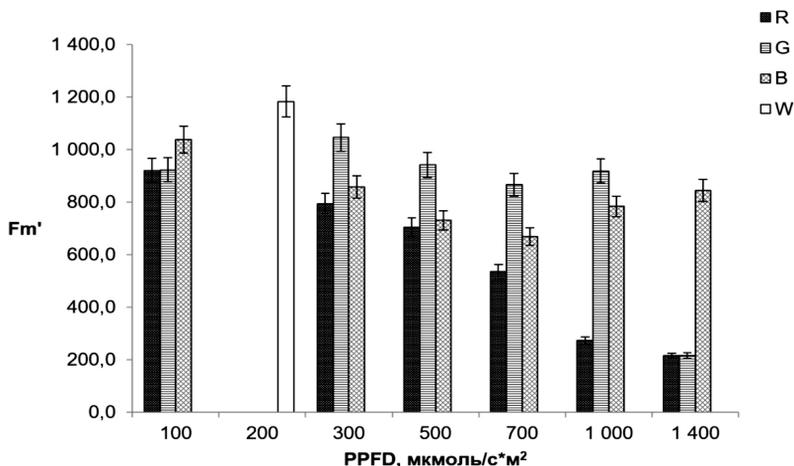


Рис. 2. Максимальная флуоресценция хлорофилла, измеренная в листьях, адаптированных к актиничному монохромному свету

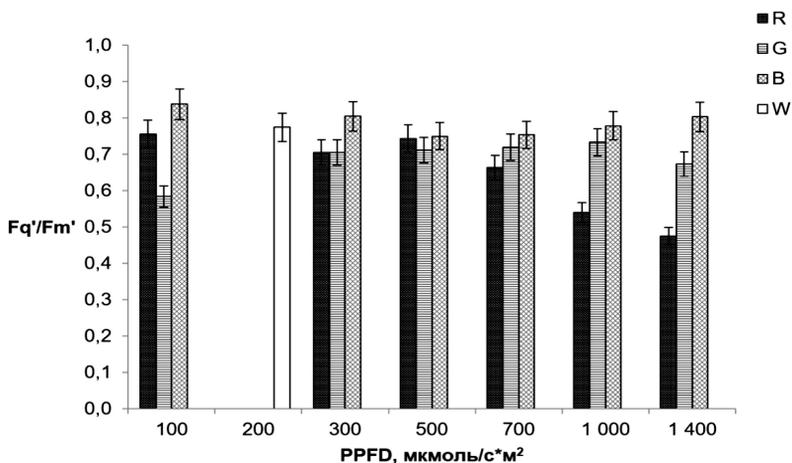


Рис. 3. Реальная эффективность фотосистемы PSII в листьях, адаптированных к актиничному монохромному свету

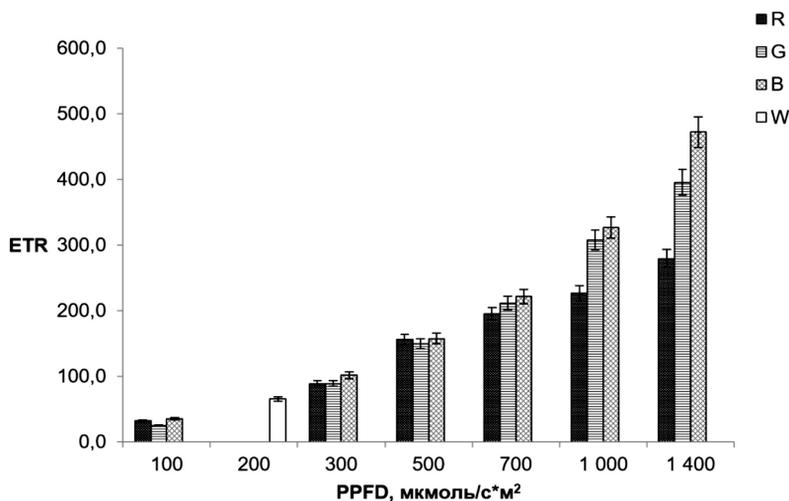


Рис. 4. Уровень переноса электронов в листьях, адаптированных к актиничному монохромному свету

В сравнении с контрольным вариантом наибольшая флуоресценция хлорофилла при всех интенсивностях облучения наблюдается в растениях под зеленым светом. Уровень флуоресценции хлорофилла растений в красном и синем спектрах ниже, чем в контрольном варианте. При оценке максимальной флуоресценции наблюдаются схожие результаты с учетом того, что уровень максимальной флуоресценции в контрольном варианте наивысший. Для растений в зеленом свете уровень F_m' при всех интенсивностях облучения (за исключением 100 и 1400 $\mu\text{м/с}\cdot\text{м}^2$) больший после контрольного варианта, для растений красного и синего света – уровень ниже (за исключением синего света при 100 и 1400 $\mu\text{м/с}\cdot\text{м}^2$).

При нефотохимическом тушении флуоресценции центры PSII закрываются, и способность насыщать кислородом основные пластохинон-акцепторы электронов фотосистемы PSII уменьшается, что определяет изменения реальной эффективности PSII при высоких интенсивностях облучения [6]. Нефотохимическое тушение флуоресценции, как явно установлено большинством исследований *in vivo*, играет главенствующую роль в защите от фотоингибирования, приводя к раннему старению и ограничению роста и развития растения [22]. В синем спектре облучения максимальный уровень флуоресценции хлорофилла начинает увеличиваться после пика падения на уровне PPFD 700 $\mu\text{м/с}\cdot\text{м}^2$, что, возможно, свидетельствует о нарушении

функционирования механизмов тушения флуоресценции, так как механизм защиты от разрушения фотосистемы не срабатывает.

Реальная эффективность PSII для каждого монохромного светового режима различается. Наиболее стандартная линейная зависимость наблюдается для красного света – реальная эффективность PSII снижается с увеличением PPFD. Для зеленого света наибольшие уровни эффективности наблюдаются в пределах PPFD от 300 до 1000 мкмоль/с*м², наименьшие – для значений PPFD 100 и 1400 мкмоль/с*м². Для синего света справедливо обратное соотношение – наивысшие показатели эффективности фотосистемы PSII зафиксированы при значениях PPFD 100, 300 и 1400 мкмоль/с*м², наименьшие – в пределах от 500 до 1000 мкмоль/с*м². Предположительно, такая разница обусловлена сочетанием воздействия определенного монохромного спектрального излучения и определенной интенсивности. При сравнении реальной эффективности PSII растений в различных световых спектрах с контрольным вариантом наблюдается следующее: уровень реальной эффективности PSII для растений в синем свете при высоких интенсивностях облучения превышает уровень контроля, что также может указывать на нарушение функционирования защитного механизма от фотоингибирования. Уровни реальной эффективности PSII растений красного и зеленого света при каждой интенсивности не превышают таковой уровень контроля.

Уровень поглощения ATP и NADPH также определяет увеличение уровня нефотохимического тушения и, соответственно, снижение уровня реальной эффективности PSII [6]. Уровень поглощения ATP и NADPH, в свою очередь, зависит от многих физиологических и метаболических факторов.

Уровень переноса электронов согласно графику, в каждом использованном световом спектре обладает прямой линейной зависимостью от увеличения PPFD. Уровень переноса электронов контрольного варианта показывает, что соответствует прямой линейной зависимости. Наибольшим показателем обладает синий свет, наименьшим – красный. По совокупности наблюдений данных графиков флуоресценции, максимальной флуоресценции и реальной эффективности флуоресценции, предположительно, при использовании синего света в растениях руколы обнаруживается нарушение защитных механизмов тушения флуоресценции.

Заключение

Установлено, что различный световой спектр и его интенсивность оказывают определенное воздействие на механизмы фотосинтетического аппарата и защиты от фотоингибирования.

Интенсивность облучения в пределах от 100 до 500 мкмоль/с*м² является наиболее оптимальной для реальной эффективности фотосистемы PSII для всех световых спектров. Использование монохроматического синего света для руколы, нежелательно, поскольку, вероятно, может вызывать нарушение защитных механизмов тушения флуоресценции.

Разница в реальной эффективности фотосистемы PSII при различных световых спектрах может быть обусловлена физиологическими и метаболическими факторами, на которые оказывают влияние определенные световые спектры и интенсивности облучения. Для выявления причин необходимо сопоставление с данными исследований вышеупомянутых факторов.

Уровень переноса электронов в каждом световом спектре линейно зависит от увеличения интенсивности облучения.

Проведенное исследование подтверждает значимость воздействия определенного светового спектра и определенной интенсивности излучения на фотосинтетический аппарат и происходящие в нем процессы. Это позволяет разработать применение определенных световых источников для улучшения функциональности фотосинтетического аппарата.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2022-1143 от 07.07.2022 г.).

Список литературы

1. Abdul, W. M., Razvi, S. S. *Eruca sativa* L.–A promising source of drug lead for antimicrobial, neuroprotective and anticancer treatment regimens: Pharmacological properties of medicinal plant “*Eruca sativa*” // European Journal of Cell Science, 2019, vol. 1, pp. 17-21. <https://doi.org/10.34154/2019-EJCS-0101-17-21/eurass>
2. Моргун В.В., Прядкина Г.А. Эффективность фотосинтеза и перспективы повышения продуктивности озимой пшеницы // Физиология растений и генетика. 2014. Т. 46, № 4. С. 279-301. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/FBKR_2014_45_4_3
3. Наконечная О.В., Холин А.С., Субботин Е.П., Бурковская Е.В., Хроленко Ю.А., Гафицкая И.В., Орловская И.Ю., Бурдуковский М.Л., Михеева А.В., Кульчин Ю.Н. Влияние светодиодного освещения разного спектра на раз-

- витие салата листового (*Lactuca sativa*) // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2023. № 3. С. 278-286. <https://doi.org/10.31857/S1026347022600406>
4. Наконечная О.В., Холин А.С., Субботин Е.П., Грищенко О.В., Бурковская Е.В., Хроленко Ю.А., Бурдуковский М.Л., Кульчин Ю.Н., Журавлев Ю.Н. Развитие растений томатов под светом различного спектрального состава // Физиология растений. 2022. Т. 69, № 5. С. 472-479. <https://doi.org/10.31857/S0015330322050165>
 5. Осипов В.А., Абдурахманов Г.М., Гаджиев А.А., Братковская Л.Б., Заядан Б.К. Использование флуоресценции хлорофилла «а» для биотестирования водной среды // Юг России: экология, развитие. 2012. Т. 7, № 2. С. 93-100. URL: <https://ecodag.elpub.ru/ugro/article/viewFile/234/228>
 6. Baker N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo // Annual review of plant biology, 2008, vol. 59, pp. 89-113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
 7. Bell L., Methven L., Signore A., Oruna-Concha M. J., Wagstaff C. Analysis of seven salad rocket (*Eruca sativa*) accessions: The relationships between sensory attributes and volatile and non-volatile compounds // Food chemistry, 2017, vol. 218, pp. 181-91. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.076>
 8. Elmardy N. A., Yousef A. F., Lin K., Zhang X., Ali M. M., Lamlo S. F., Kalaji H. M., Kowalczyk K., Xu Y. Photosynthetic performance of rocket (*Eruca sativa*. Mill.) grown under different regimes of light intensity, quality, and photoperiod // PLoS One, 2021, vol. 16, no. 9, pp. e0257745. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257745>
 9. Fu Y., Li H., Yu J., Liu H., Cao Z., Manukovsky N., Liu H. Interaction effects of light intensity and nitrogen concentration on growth, photosynthetic characteristics and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. youmaicai) // Scientia Horticulturae, 2017, vol. 214, pp. 51-7. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.020>
 10. Garg, G., Sharma, V. *Eruca sativa* (L.): Botanical Description, Crop Improvement, and Medicinal Properties // Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 171-182. <https://doi.org/10.1080/10496475.2013.848254>
 11. Janka E., Körner O., Rosenqvist E. Ottosen C.-O. Simulation of PSII-operating efficiency from chlorophyll fluorescence in response to light and temperature in chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora*) using a multilayer leaf model // Photosynthetica, 2018, vol. 56, pp. 633-640. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0701-8>
 12. Kim K., Kook H.-S., Jang Y.-J., Lee W.-H., Kamala-Kannan S., Chae J.-C., Lee K.-J. The effect of blue-light-emitting diodes on antioxidant properties and resis-

- tance to *Botrytis cinerea* in tomato // Journal of Plant Pathology & Microbiology, 2013, vol. 4, no. 203, pp. 10.4172. <https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000203>
13. Kong S.-G., Okajima K. Diverse photoreceptors and light responses in plants // Journal of plant research, 2016, vol. 129 no. 2, pp. 111-114. <https://doi.org/10.1007/s10265-016-0792-5>
 14. Kramer M., Rodriguez-Heredia M., Saccon F., Mosebach L., Twachtmann M., Krieger-Liszka A., Duffy C., Knell R. J., Finazzi G., Hanke G. T. Regulation of photosynthetic electron flow on dark to light transition by ferredoxin: NADP (H) oxidoreductase interactions // eLife, 2021, no. 10, pp. e56088. <https://doi.org/10.7554/eLife.56088>
 15. Kulchin Y. N., Bulgakov V. P., Subbotin E. P., Kholin A. S., Subbotina N. I. Monochromatic LEDs Effect on Rocket (*Eruca sativa* Mill.) Morphogenesis and Productivity // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2022, vol. 86, no. 1, pp. 114-118. <https://doi.org/10.3103/S1062873822700502>
 16. Loconsole D., Cocetta G., Santoro P., Ferrante A. Optimization of LED lighting and quality evaluation of romaine lettuce grown in an innovative indoor cultivation system // Sustainability, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 841. <https://doi.org/10.3390/su11030841>
 17. Maxwell K., Johnson G. N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide // Journal of Experimental Botany, 2000, vol. 51, no. 345, pp. 659-668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
 18. Muneer S., Kim E. J., Park J. S., Lee J. H. Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.) // International journal of molecular sciences, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 4657-4670. <https://doi.org/10.3390/ijms15034657>
 19. Nakonechnaya O. V., Grishchenko O. V., Khrolenko Y. A., Bulgakov V. P., Burkovskaya E. V., Grigorichuk V. P., Prokuda N. A., Kholin A. S., Gafitskaya I. V., Mikheeva A. V., Orlovskaya I. Y., Burdukovskii M. L., Subbotin E. P., Kul'chin Y. N. Effect of LED Lighting on Morphogenesis and Content of Ascorbic Acid, P, K, and Ca in *Eruca sativa* Plants // Russian Journal of Plant Physiology, 2021, vol. 68, pp. 356-366. <https://doi.org/10.1134/S1021443721020138>
 20. Nguyen T. H., Tran T. T., Nguyen Q. T. Effects of light intensity on the growth, photosynthesis and leaf microstructure of hydroponic cultivated spinach (*Spinacia oleracea* L.) under a combination of red and blue LEDs in house // International Journal of Agricultural Technology, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 75–90. URL: [http://www.ijat-aatsea.com/pdf/v15_n1_2019_January/6_IJAT_15\(1\)_2019_Nguyen,%20T.%20P.%20D..pdf](http://www.ijat-aatsea.com/pdf/v15_n1_2019_January/6_IJAT_15(1)_2019_Nguyen,%20T.%20P.%20D..pdf)

21. Ouzounis T., Fretté X., Ottosen C. O., Rosenqvist, E. Spectral effects of LEDs on chlorophyll fluorescence and pigmentation in *Phalaenopsis* ‘Vivien’ and ‘Purple Star’ // *Physiologia plantarum*, 2015, vol. 154, no. 2, pp. 314-327. <https://doi.org/10.1111/pp1.12300>
22. Ruban A. V., Nonphotochemical Chlorophyll Fluorescence Quenching: Mechanism and Effectiveness in Protecting Plants from Photodamage // *Plant Physiology*, 2016, vol. 170, no. 4, pp. 1903-1916. <https://doi.org/10.1104/pp.15.01935>
23. Su P., Ding S., Wang D. Kan W., Yuan M., Chen X., Tang C., Hou J. Wu L. Plant morphology, secondary metabolites and chlorophyll fluorescence of *Artemisia argyi* under different LED environments // *Photosynthesis Research*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11120-023-01026-w>
24. Xu Y., Yang M., Cheng F., Liang Y. Effects of LED photoperiods and light qualities on in vitro growth and chlorophyll fluorescence of *Cunninghamia lanceolata* // *BMC Plant Biology*, 2020, vol. 20, pp. 269. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02480-7>
25. Yorio N. C., Goins G. D., Kagie H. R., Wheeler R. M., Sager J. C. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation // *HortScience*, 2001, vol. 36, no. 2, pp. 380-383.

References

1. Abdul, W. M., Razvi, S. S. *Eruca sativa* L.—A promising source of drug lead for antimicrobial, neuroprotective and anticancer treatment regimens: Pharmacological properties of medicinal plant “*Eruca sativa*”. *European Journal of Cell Science*, 2019, vol. 1, pp. 17-21. <https://doi.org/10.34154/2019-EJCS-0101-17-21/eurass>
2. Morgun V.V., Pryadkina G.A. Effektivnost' fotosinteza i perspektivy povysheniya produktivnosti ozimoy pshenitsy [Photosynthetic efficiency and perspectives of winter wheat productivity increasing]. *Fiziologiya rasteniy i genetika* [Plants physiology and genetics], 2014, vol. 46, no 4. pp. 279-301. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/FBKR_2014_45_4_3
3. Nakonechnaya O.V., Kholin A.S., Subbotin E.P., Burkovskaya E.V., Khrolenko Yu.A., Gafitskaya I.V., Orlovskaya I.Yu., Burdukovskiy M.L., Mikheeva A.V., Kul'chin Yu.N. Vliyaniye svetodiodnogo osveshcheniya raznogo spektra na razvitiye salata listovogo (*Lactuca sativa*) [Effect of different spectra LED lightning on *Lactuca sativa* development]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya* [Bulletin of the Russian academy of sciences: Biology], 2023, no. 3, pp. 278-286. <https://doi.org/10.31857/S1026347022600406>
4. Nakonechnaya O.V., Kholin A.S., Subbotin E.P., Grishchenko O.V., Burkovskaya E.V., Khrolenko Yu.A., Burdukovskiy M.L., Kul'chin Yu.N., Zhuravlev Yu.N.

- Razvitiye rasteniy tomatov pod svetom razlichnogo spektral'nogo sostava [Tomato plants development under light of different spectral composition]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian journal of plant physiology], 2022, vol. 69, no. 5, pp. 472-479. <https://doi.org/10.31857/S0015330322050165>
5. Osipov V.A., Abdurakhmanov G.M., Gadzhiev A.A., Bratkovskaya L.B., Zayadan B.K. Ispol'zovanie fluorestsentsii khlorofilla «a» dlya biotestirovaniya vodnoy sredy [The use of chlorophyll “a” fluorescence for aquatic environment bio test]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye* [The South of Russia: ecology, development], 2012, vol. 7, no. 2, pp. 93-100. URL: <https://ecodag.elpub.ru/ugro/article/viewFile/234/228>
 6. Baker N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual review of plant biology*, 2008, vol. 59, pp. 89-113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
 7. Bell L., Methven L., Signore A., Oruna-Concha M. J., Wagstaff C. Analysis of seven salad rocket (*Eruca sativa*) accessions: The relationships between sensory attributes and volatile and non-volatile compounds. *Food chemistry*, 2017, vol. 218, pp. 181-91. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.076>
 8. Elmardy N. A., Yousef A. F., Lin K., Zhang X., Ali M. M., Lamlom S. F., Kalaji H. M., Kowalczyk K., Xu Y. Photosynthetic performance of rocket (*Eruca sativa*. Mill.) grown under different regimes of light intensity, quality, and photoperiod. *PLoS One*, 2021, vol. 16, no. 9, pp. e0257745. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257745>
 9. Fu Y., Li H., Yu J., Liu H., Cao Z., Manukovsky N., Liu H. Interaction effects of light intensity and nitrogen concentration on growth, photosynthetic characteristics and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. youmaicai). *Scientia Horticulturae*, 2017, vol. 214, pp. 51-7. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.020>
 10. Garg, G., Sharma, V. *Eruca sativa* (L.): Botanical Description, Crop Improvement, and Medicinal Properties. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 171-182. <https://doi.org/10.1080/10496475.2013.848254>
 11. Janka E., Körner O., Rosenqvist E. Ottosen C.-O. Simulation of PSII-operating efficiency from chlorophyll fluorescence in response to light and temperature in chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora*) using a multilayer leaf model. *Photosynthetica*, 2018, vol. 56, pp. 633-640. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0701-8>
 12. Kim K., Kook H.-S., Jang Y.-J., Lee W.-H., Kamala-Kannan S., Chae J.-C., Lee K.-J. The effect of blue-light-emitting diodes on antioxidant properties and resistance to *Botrytis cinerea* in tomato. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 2013, vol. 4, no. 203, pp. 10.4172. <https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000203>

13. Kong S.-G., Okajima K. Diverse photoreceptors and light responses in plants. *Journal of plant research*, 2016, vol. 129 no. 2 pp. 111-114. <https://doi.org/10.1007/s10265-016-0792-5>
14. Kramer M., Rodriguez-Heredia M., Saccon F., Mosebach L., Twachtmann M., Krieger-Liszak A., Duffy C., Knell R. J., Finazzi G., Hanke G. T. Regulation of photosynthetic electron flow on dark to light transition by ferredoxin: NADP (H) oxidoreductase interactions. *eLife*, 2021, no. 10, pp. e56088. <https://doi.org/10.7554/eLife.56088>
15. Kulchin Y. N., Bulgakov V. P., Subbotin E. P., Kholin A. S., Subbotina N. I. Monochromatic LEDs Effect on Rocket (*Eruca sativa* Mill.) Morphogenesis and Productivity. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022, vol. 86, no. 1, pp. 114-118. <https://doi.org/10.3103/S1062873822700502>
16. Loconsole D., Cocetta G., Santoro P., Ferrante A. Optimization of LED lighting and quality evaluation of romaine lettuce grown in an innovative indoor cultivation system. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 3 pp. 841. <https://doi.org/10.3390/su11030841>
17. Maxwell K., Johnson G. N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 2000, vol. 51, no. 345, pp. 659-668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
18. Muneer S., Kim E. J., Park J. S., Lee J. H. Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.). *International journal of molecular sciences*, 2014, vol. 15, no. 3 pp. 4657-4670. <https://doi.org/10.3390/ijms15034657>
19. Nakonechnaya O. V., Grishchenko O. V., Khrolenko Y. A., Bulgakov V. P., Burkovskaya E. V., Grigorochuk V. P., Prokuda N. A., Kholin A. S., Gafitskaya I. V., Mikheeva A. V., Orlovskaya I. Y., Burdukovskii M. L., Subbotin E. P., Kul'chin Y. N. Effect of LED Lighting on Morphogenesis and Content of Ascorbic Acid, P, K, and Ca in *Eruca sativa* Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2021, vol. 68, pp. 356-366. <https://doi.org/10.1134/S1021443721020138>
20. Nguyen T. H., Tran T. T., Nguyen Q. T. Effects of light intensity on the growth, photosynthesis and leaf microstructure of hydroponic cultivated spinach (*Spinacia oleracea* L.) under a combination of red and blue LEDs in house. *International Journal of Agricultural Technology*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 75-90. URL: [http://www.ijat-aatsea.com/pdf/v15_n1_2019_January/6_IJAT_15\(1\)_2019_Nguyen,%20T.%20P.%20D..pdf](http://www.ijat-aatsea.com/pdf/v15_n1_2019_January/6_IJAT_15(1)_2019_Nguyen,%20T.%20P.%20D..pdf)
21. Ouzounis T., Fretté X., Ottosen C. O., Rosenqvist, E. Spectral effects of LEDs on chlorophyll fluorescence and pigmentation in *Phalaenopsis* 'Vivien' and 'Purple

- Star'. *Physiologia plantarum*, 2015, vol. 154, no. 2, pp. 314-327. <https://doi.org/10.1111/ppl.12300>
22. Ruban A. V., Nonphotochemical Chlorophyll Fluorescence Quenching: Mechanism and Effectiveness in Protecting Plants from Photodamage. *Plant Physiology*, 2016, vol. 170, no. 4, pp. 1903-1916. <https://doi.org/10.1104/pp.15.01935>
23. Su P., Ding S., Wang D. Kan W., Yuan M., Chen X., Tang C., Hou J. Wu L. Plant morphology, secondary metabolites and chlorophyll fluorescence of *Artemisia argyi* under different LED environments. *Photosynthesis Research*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11120-023-01026-w>
24. Xu Y., Yang M., Cheng F., Liang Y. Effects of LED photoperiods and light qualities on in vitro growth and chlorophyll fluorescence of *Cunninghamia lanceolata*. *BMC Plant Biology*, 2020, vol. 20, pp. 269. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02480-7>
25. Yorio N. C., Goins G. D., Kagie H. R., Wheeler R. M., Sager J. C. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *HortScience*, 2001, vol. 36, no. 2, pp. 380-383.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Кульчин Юрий Николаевич, доктор физико-математических наук, академик, научный руководитель института
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт автоматизации и процессов управления» ДВО РАН
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация
kulchin@iacp.dvo.ru

Холин Александр Сергеевич, научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт автоматизации и процессов управления» ДВО РАН
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация
a_kholin@dvo.ru

Кожанов Сергей Олегович, старший инженер

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт автоматики и процессов управления» ДВО РАН
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация
kozhanov_57@mail.ru*

Субботин Евгений Петрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт автоматики и процессов управления» ДВО РАН
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация
s.e.p@list.ru*

Ковалевский Кирилл Валерьевич, генеральный директор

*Общество с ограниченной ответственностью «Иннофарм-ДВ»
ул. Муравьева-Амурского, 3, офис 104, г. Владивосток, 690001, Российская Федерация
kovalevsky.kirill@mail.ru*

Субботина Наталья Ивановна, младший научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт автоматики и процессов управления» ДВО РАН
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация
sale789@mail.ru*

Гомольский Андрей Сергеевич, инженер-исследователь, передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем»

*Дальневосточный федеральный университет
о. Русский, п. Аякс, 10, г. Владивосток, 690922, Российская Федерация
gotolskii.as@dvfu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Yuriy N. Kulchin, Doctor of Sciences in Physical and Mathematical sciences, Academic, Academic Supervisor

*Institute of Automation and Control Processes
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation
kulchin@iacp.dvo.ru*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8750-4775>

Alexander S. Kholin, Research Fellow

*Institute of Automation and Control Processes
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation
a_kholin@dvo.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9751-5136>*

Sergey O. Kozhanov, Senior Engineer

*Institute of Automation and Control Processes
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation
kozhanov_57@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2629-3521>*

Evgeny P. Subbotin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher

*Institute of Automation and Control Processes
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation
s.e.p@list.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8658-3504>*

Kirill V. Kovalevsky, General Director

*Innofarm LLC
3-104, Muravyov Amurskiy Str., Vladivostok, 690001, Russian Federation
kovalevsky.kirill@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3321-7189>*

Natalia I. Subbotina, Junior Researcher

*Institute of Automation and Control Processes
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation
sale789@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0945-3877>*

Andrey S. Gomolsky, Research Engineer, Advanced Engineering School “Institute of Biotechnology, Bioengineering and Food Systems”

*Far Eastern Federal University
10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation
gomolskii.as@dvfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5606-9648>*

Поступила 12.09.2023

После рецензирования 10.10.2023

Принята 16.10.2023

Received 12.09.2023

Revised 10.10.2023

Accepted 16.10.2023