

Портативный микропроцессорный колориметр для определения стабильности развития растений

Сергей Анатольевич Ракутько,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

Елена Николаевна Ракутько,
научный сотрудник

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Показали, что по величине флуктуирующей асимметрии можно судить о стабильности развития растений. Отметили недостатки оценки физиологического состояния растений – как визуальной, так и с помощью созданного ранее измерителя цвета. (*Цель исследования*) Разработать устройство для определения стабильности развития растений по результатам измерения цветовых характеристик их листьев. (*Материалы и методы*) Апробировали прибор на растениях огурца, выращиваемых под различным спектром. Измеряли цвет поверхности на втором и третьем листьях в порядке их появления на растении, слева и справа от центральной жилки: у вершины листа, в месте раздвоения вторых жилок второго порядка, у основания листа. При измерениях подносили прибор к листу. Описали принцип работы микропроцессорного колориметра. (*Результаты и обсуждение*) Выявили, что асимметрия значений цветовых координат симметричных точек поверхности листа огурца носит флуктуирующий характер и может быть использована для оценки стабильности развития растений. Определили, что различия в качестве световой среды влияют на биометрические параметры растений, проявляются в асимметрии цветовых координат симметричных точек поверхности листа, причем большим значениям показателей роста (у растений в лучших условиях световой среды) соответствуют меньшие значения флуктуирующей асимметрии. (*Выводы*) Доказали, что разработанный колориметр компактен и эргономичен, прост в изготовлении, недорогой, удобен в эксплуатации и может быть использован в полевых условиях. Прибор позволяет выявить различия стабильности развития растений, выращиваемых под разными источниками света. В условиях эксперимента определили, что в красном диапазоне величина флуктуирующей асимметрии под светодиодами составила 0,0301 относительной единицы, под натриевыми лампами – 0,0471; в зеленом диапазоне – 0,0228 и 0,0305; в синем – 0,0253 и 0,0416 относительной единицы соответственно.

Ключевые слова: растениеводство, колориметр, цвет листа, RGB, пигменты, цветовые координаты, стабильность развития растений, флуктуирующая асимметрия.

■ **Для цитирования:** Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Портативный микропроцессорный колориметр для определения стабильности развития растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 67-73. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-67-73. EDN AMSJMF.

Portable Microcontroller-Based Colorimeter For Determining Plant Development Stability

Sergey A. Rakutko,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

Elena N. Rakutko,
researcher

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

Abstract. It was shown that the magnitude of fluctuating asymmetry can be used to assess the plant development stability. The shortcomings of the plant physiological state assessment were pointed out, both the visual one and that using the previously created colorimeter. (*Research purpose*) The study aimed to develop a device for determining the plant development stability by measuring the leaf color. (*Materials and methods*) The device was tested on cucumber plants grown under different spectra. The surface color was measured on the second and third leaves in the order of their emergence on the plant, to the left and right of the central vein:

at the top of the leaf, at the bifurcation of the second veins of the second order, at the base of the leaf. During measurements, the device was brought to the leaf. The principle of the microcontroller-based colorimeter operation was described. (*Results and discussion*) The asymmetry of the values of the color coordinates of the symmetrical points on the cucumber leaf surface was found to be fluctuating and can be used to assess the plant development stability. The differences in the light environment quality, affecting the plant biometric parameters, are manifested in the asymmetry of the color coordinates of the symmetrical points on the leaf surface and the higher values of growth parameters (in plants under better light environment conditions) correspond to lower values of fluctuating asymmetry. (*Conclusions*) The developed colorimeter was proved to be compact and ergonomic, easy to manufacture, inexpensive, easy to operate and applicable to the field usage. The device enables to identify differences in the development stability of the plants grown under different light sources. The experimental conditions revealed that the fluctuating asymmetry values were 0.0301 relative units under LEDs and 0.0471 relative units under sodium lamps in the red range. In the green range they were 0.0228 and 0.0305, in the blue one 0.0253 and 0.0416 relative units, respectively.

Keywords: crop production, colorimeter, leaf color, RGB, pigments, color coordinates, plant development stability, fluctuating asymmetry

■ **For citation:** Rakutko S.A., Rakutko E.N. Portativnyy mikroprotsessornyy kolorimetr dlya opredeleniya stabil'nosti razvitiya rasteniy [Portable microcontroller-based colorimeter for determining plant development stability]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 0-0 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-0-0. EDN AMSJMF.

На рост и развитие растений влияют многие факторы окружающей среды: интенсивность и спектр излучения, условия питания, температура, влажность и т.д. По стабильности их развития судят о способности точно следовать программе, заложенной в генотипе. Индикатором стабильности развития на макроуровне служит флуктуирующая асимметрия (ФА), заключающаяся в незначительных и случайных отклонениях параметров билатеральных (зеркальных) морфологических структур. Уровень ФА минимален при оптимальных условиях среды и возрастает при любых стрессовых воздействиях [1].

От условий окружающей среды зависят оптические свойства тканей растений, особенно в листьях [2]. Они отражают структуру и расположение клеток, органелл, определяющих важнейшие физиологические процессы дыхания, респирации и фотосинтеза. Их исследование необходимо для понимания процессов, протекающих в растениях в период роста и развития. Оптические свойства листа зависят от содержания в нем пигментов, коррелирующих с другими биометрическими показателями. В зависимости от окружающих условий изменяются геометрические размеры клеток, морфология ассимиляционных тканей, содержание и соотношение основных пигментов фотосинтеза (хлорофиллов и каротиноидов), различным образом организуются фотосинтетические мембраны (хлоропласты теневого и светового типа) [3]. Их изучение в качестве диагностических признаков состояния растения представляет немаловажный интерес [4].

Ранее нами был предложен метод оценки стабильности развития растений с использованием ФА оптической плотности листьев. Выявлены значимые раз-

личия ФА оптической плотности листьев кабачка (*Cucurbita pepo* var. *Giromontina*) в отдельных спектральных диапазонах в зависимости от применяемого при выращивании растений облучения [5]. Оценка состояния растения по оптическим свойствам имела меньшую дисперсию данных и была более надежной по сравнению с другими биометрическими параметрами [6].

Цвет органов растений, особенно листьев и цветков, – наглядный индикатор физиологического состояния [7]. Цвет привлекает насекомых – опылителей и разносчиков семян [8, 9]. По нему судят о недостатке или избытке питательных веществ в почве. Например, хорошо известна избыточная экспрессия каротиноидов и антоцианов в растениях, если в почве повышена концентрация соли [10].

Вариации цвета растений характеризуют генетическую изменчивость внутри популяций и таксонов и между ними, что позволяет использовать этот параметр при проверке эволюционных гипотез в филогенетических рамках [11, 12].

Кроме того, хроматические изменения листьев и цветов свидетельствуют о болезнях растений, в том числе грибковых и бактериальных [13].

Традиционно физиологическое состояние растений оценивали по внешним признакам, визуально. Однако определение цвета и его оттенков человеческим глазом крайне ненадежно и зависит от опыта и способностей наблюдателя. Задачу облегчили оптические приборы и новые технологии [14]. Объективно параметры цвета определяют с помощью колориметров или спектрофотометров [15]. Характеристики цвета задают цветовыми координатами в различных цветовых системах [16].

Разработанный ранее измеритель цвета имел не-

которые недостатки:

- ограниченную функциональность, связанную с невозможностью передачи результатов измерений по беспроводному каналу;
- недостаточное удобство в работе (эргономичность) устройства;
- неудовлетворительную точность измерений в связи с возможностью засветки датчика цвета от внешнего излучения, проникающего сквозь корпус, при проведении измерений в светокультуре под мощными светильниками;
- затрудненность позиционирования датчика цвета в заданную область поверхности.

В наших экспериментах на примере растений томата (*Lycopersicon esculentum* Mill) выявлено влияние условий освещения растений на стабильность их развития, оцениваемую по ФА билатеральных признаков. В качестве последних использовали геометрические размеры и содержание хлорофилла в симметричных участках листовой пластины [17-19].

Цель исследования – разработка устройства для определения стабильности развития растений по результатам измерения цветовых характеристик листьев.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбрали партенокарпический гибрид огурца (*Cucumis Sativus* L.) F₁ Кураж. Сравнительный эксперимент проводили в ноябре-декабре 2020 г. в двух зонах лабораторного помещения, разделенных светонепроницаемой шторой. С помощью автоматической системы управления поддерживали параметры: температуру воздуха 23-25°C, влажность воздуха 65-72%. Влажность субстрата в горшочках 75-80% обеспечивали дозированным поливом. В качестве субстрата использовали верховой торф, нейтрализованный мелом до pH 6,0 и заправленный удобрениями до уровней элементов питания, мг/л: NO₃ – 240, NH₄ – 12, P₂O₅ – 60, K₂O – 300, Ca – 180, Mg – 80, Mn – 0,50, Mo – 0,05, Cu – 0,05. Сеянцы огурца пикировали в контейнеры объемом 1 л. Расстановку рассады проводили через 14 дней после появления всходов (25 растений на 1 м²). Рассаду подкармливали растворами удобрений K₂SO₄, MgSO₄, KH₂PO₄ и Ca(NO₃)₂. Концентрацию питательного раствора удобрений поддерживали в пределах ЕС 1,8-2,5 мСм/см.

Фактором, обеспечивающим различие качества световой среды, стал спектр излучения. Использовали облучатели с натриевыми лампами (типа ДНаЗ) и светодиодами (СД). У натриевых ламп большая доля потока находится в желто-зеленой области при наличии существенной доли теплового излучения. У СД-источников излучение сосредоточено в синем и красном диапазонах. Фотонную облученность на уровне верхушек растений поддерживали одинаковой изменением высоты подвеса облучателей.

Значение показателя ФА для билатерального признака

T_i (в качестве которых принимали RGB координаты) вычисляли по формуле:

$$FA_{T_i} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{|T_{ij}^L - T_{ij}^R|}{(T_{ij}^L + T_{ij}^R)},$$

где FA_{T_i} – показатель ФА для билатерального признака T_i ;

N – количество измерений;

j – номер точки измерения;

T_{ij}^L – значение признака T_i слева билатеральной структуры j -го растения;

T_{ij}^R – значение признака T_i справа билатеральной структуры j -го растения.

Измеряли цвет поверхности на втором и третьем листьях в порядке их появления на растении, слева и справа от центральной жилки: у вершины листа, в месте раздвоения вторых жилок второго порядка, у основания листа.

Использовали по 20 растений, выращиваемых под каждым источником света. Данные обрабатывали методами математической статистики ($p < 0,05$) с использованием пакетов программ Excel 2003 и Statistica 6.0. Статистическая обработка результатов оценки ФА включала проверку данных с учетом факторов:

- нормальность распределения величины разницы между билатеральными признаками;
- присутствие направленной асимметрии и антиасимметрии;
- зависимость величины асимметрии признака от его размера;
- сравнение уровня ФА у растений, выращиваемых при различном спектре облучения.

Конструкция измерителя цвета достаточно проста (рис. 1). Алгоритм управляющей программы позволяет изменять функционал (назначение) кнопок клавиатуры для каждого из режимов работы устройства. Все электронные компоненты смонтированы на стойках на внутренней поверхности корпуса и на разделительной пластине из светонепроницаемого материала, размещенной внутри корпуса, и электрически соединены монтажными проводами в соответствии с логикой их совместной работы. Для доступа к внутренним электронным компонентам корпус и ручка выполнены с возможностью разъема в горизонтальной плоскости.

В автономном режиме работы используется питание от батареи GB (рис. 2). «Плюс» питания подается на вход VIN микропроцессора A1 типа Arduino Nano. Стабилизированное напряжение для питания дисплея A2 и датчика цвета A4 снимается с его выхода 5V, напряжение для питания блютуза A3 – с выхода 3V3. Общим проводом является «минус», он подается на вход Gnd микропроцессора и других электронных компонентов. Линия данных SDA последовательной асимметричной шины I2C подключена к цифровому выходу D4 микропроцессора, линия синхронизации SCL

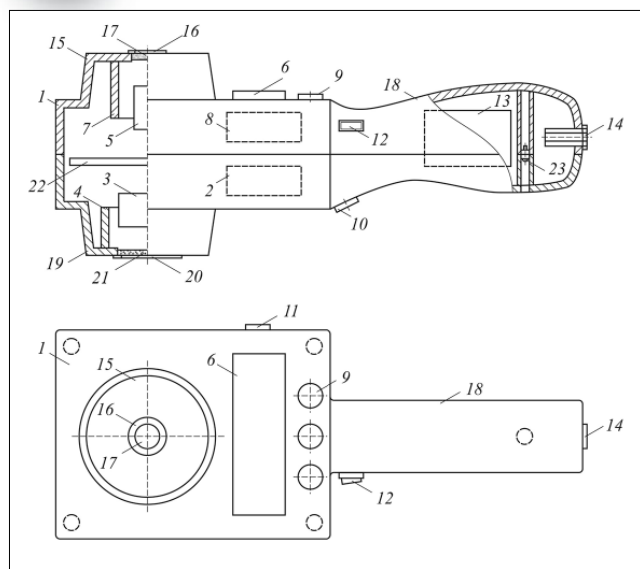


Рис. 1. Устройство колориметра: 1 – корпус; 2 – микропроцессор; 3 – датчик цвета; 4 – экран датчика цвета; 5 – индикатор цвета; 6 – дисплей; 7 – экран индикатора цвета; 8 – блютуз; 9 – клавиатура; 10 – кнопка; 11 – USB-разъем; 12 – выключатель питания; 13 – батарея автономного питания; 14 – разъем внешнего питания; 15 – верхний выступ; 16 – отверстие; 17 – диффузно пропускающий материал; 18 – ручка; 19 – нижний выступ; 20 – нижнее отверстие; 21 – прозрачный материал; 22 – разделительная пластина из светонепроницаемого материала; 23 – болтовые соединения

Fig. 1. The design of the colorimeter: 1 – body; 2 – microprocessor; 3 – colour sensor; 4 – color sensor screen; 5 – color indicator; 6 – display; 7 – color indicator screen; 8 – bluetooth; 9 – keyboard; 10 – button; 11 – USB connector; 12 – power switch; 13 – autonomous battery; 14 – external power connector; 15 – upper ledge; 16 – hole; 17 – diffuse transmissive material; 18 – handle; 19 – lower ledge; 20 – bottom hole; 21 – transparent material; 22 – separating plate made of opaque material; 23 – bolted connections

– к выходу D5. Для отображения текстовой информации использован дисплей типа LCD1602. Символы выводятся в две строки, по 16 символов в строке, их размер – 5×8 пикселей. Встроенная подсветка включается при подаче питания на пины модуля. В качестве датчика цвета использован модуль TCS34725, который содержит светочувствительные элементы для измерения красной, зеленой и синей составляющей потока света, отраженного от поверхности. Источником для освещения поверхности служит светодиод, расположенный на модуле и управляемый с аналогового выхода A0 микропроцессора. Для передачи информации на внешние устройства использован модуль блютуз типа HC 05. Управление им происходит по асинхронному протоколу шины UART, по линиям RXD и TXD микропроцессора (пины D2 и D3). Индикатор цвета A6 выполнен на базе трехцветного светодиода типа MCDL-5013RGB. Цвет его свечения задается путем изменения интенсивности свечения отдельных каналов с помощью регуляторов широт-

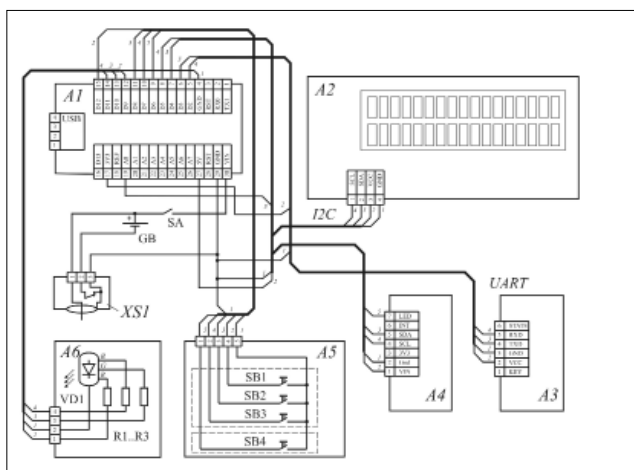


Рис. 2. Схема колориметра: A1 – микропроцессор; A2 – дисплей; A3 – блютуз; A4 – датчик цвета; A5 – клавиатура; A6 – индикатор цвета; XS1 – разъем питания; GB – батарея питания

Fig. 2. The electric diagram of the colourimeter: A1 – microprocessor; A2 – display; A3 – bluetooth; A4 – color sensor; A5 – keyboard; A6 – color indicator; XS1 – power connector; GB – power battery

но-импульсной модуляции от цифровых выходов D10-D12 микропроцессора. Управление устройством осуществляется через клавиатуру A5, подключенную к пинам D6, D7, D8 и D12.

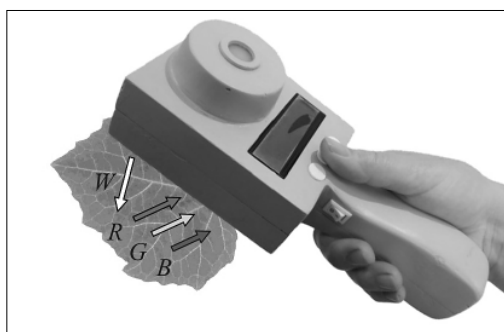


Рис. 3. Работа с устройством
Fig. 3. Work with the device

При измерениях оператор держит устройство за ручку (рис. 3). Прибор подносят нижним выступом корпуса к поверхности, цвет которой необходимо определить.

В соответствии с алгоритмом работы управляющей программы, загруженной предварительно в микропроцессор через USB-разъем, срабатывает датчик цвета. Информация о цвете поверхности после математической обработки в микропроцессоре отображается на дисплее в численном виде (значения RGB) и передается через блютуз на внешнее устройство. Из полученных RGB-составляющих синтезируется цвет свечения индикатора цвета. Управление режимами работы осуществляется с помощью клавиатуры и кнопки. Экраны индикатора, датчика цвета и разделительная пластина препятствуют попаданию параз-

итной засветки на датчик цвета. При необходимости электрическое питание устройство получает через разъем внешнего питания.

Ориентировочная стоимость основных комплектующих по ценам *AliExpress* (без затрат на изготовление корпуса) составляет €15.

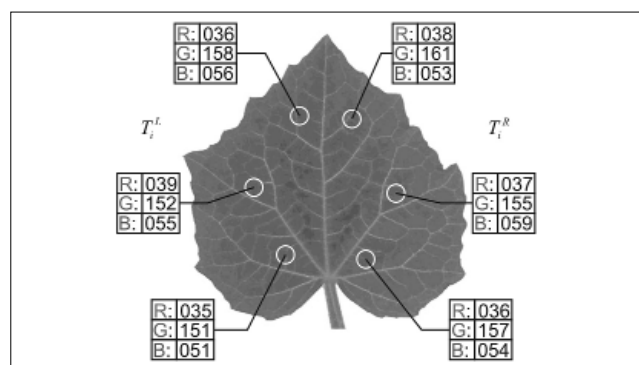


Fig. 4. Пример экспериментальных данных

Fig. 4. An example of experimental data

Экспериментальные данные свидетельствуют об *RGB*-составляющих цвета в областях поверхности листа, расположенных симметрично относительно его центральной жилки (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Природа источников освещения в светокультуре влияет на развитие и состояние растений (таблица).

При практически одинаковом количестве листьев на стебле растения под натриевыми лампами более вытянуты, имеют меньшую толщину стебля, цвет листьев светло-зеленый. Под СД растения имеют большую сырую массу и содержание сухого вещества, цвет листьев визуально имеет более насыщенный зеленый оттенок, что свидетельствует о большем содержании хлорофилла и лучшем состоянии.

Статистический анализ показал, что значения

RGB-координат распределены по нормальному закону. Однако различия между группами статистически не значимы. Следовательно, сами значения *RGB*-координат, полученные с помощью колориметра, не информативны для оценки влияния качества световой среды на растения. Анализ распределения значений асимметрии *RGB*-координат ($T_{il}^L - T_{il}^R$) показал, что они распределены по нормальному закону. Направленность асимметрии, оцененная по критерию Уилкоксона, отсутствует. Антисимметрия (судя по величине эксцесса) у анализируемых признаков не выявлена. Совокупность этих критериев свидетельствует, что асимметрия анализируемых признаков носит флуктуирующий характер. Наличие зависимости между величиной асимметрии признака и его средним размером определяли с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Для обоих типов источников света и всех анализируемых признаков статистически значимая размер-зависимость отсутствует. Различия между ФА, оцененные по *U*-критерию Манна-Уитни, статистически значимы, причем меньшие значения ФА наблюдаются у растений, обладающих лучшими биометрическими параметрами, выращенных в более благоприятных условиях световой среды.

Выводы

1. Выявили, что асимметрия значений цветовых координат симметричных точек поверхности листа огурца носит флуктуирующий характер и может быть использована для оценки стабильности развития растений.

2. Различия в качестве световой среды, приводящие к расхождению биометрических параметров растений проявляются в асимметрии цветовых координат симметричных точек поверхности листа, причем большим значениям показателей роста (у растений в лучших условиях окружающей среды) соответствуют меньшие значения ФА.

Таблица	Table	
ХАРАКТЕРИСТИКИ 25-ДНЕВНЫХ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА, ВЫРАЩЕННЫХ ПОД РАЗЛИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА PARAMETERS OF 25-DAY-OLD CUCUMBER PLANTS GROWN UNDER DIFFERENT LIGHT SOURCES		
Параметры Parameter	Натриевые лампы Sodium lamps	Светодиоды LED
Количество листьев, шт. / Number of leaves, pcs	5,9	5,8
Высота растения, мм / Plant height, mm	283	149
Диаметр стебля, мм / Stem diameter, mm	6,32	8,51
Сырая масса растения, г / Wet weight of plant, g	23,87	31,14
Сухое вещество, % / Dry matter, %	5,80	7,82
Красная составляющая цвета, отн. ед. / Red colour component, rel. units	37,1	45,4
Зеленая составляющая цвета , отн. ед./ Green colour component, rel. units	153,0	179,7
Синяя составляющая цвета , отн. ед. / Blue colour component, rel. units	55,5	68,2
Величина флуктуирующей асимметрии, отн. ед. / Fluctuating asymmetry value, rel. unit:		
по красной компоненте / by the red component	0,0471	0,0301
по зеленой компоненте / by the green component	0,0305	0,0228
по синей компоненте / by the blue component	0,0416	0,0253

3. Разработанный на основе микроконтроллера *Arduino Nano* и датчика цвета *TCS34725* колориметр имеет компактную и эргономичную конфигурацию, прост в изготовлении, удобен в эксплуатации, доступен по стоимости. Его можно использовать для полевого анализа.

4. С помощью разработанного прибора определи-

ли различия стабильности развития растений огурца, выращиваемых под разными источниками света. В красном диапазоне величина ФА под светодиодами составляет 0,0301 отн. ед., под натриевыми лампами – 0,0471; в зеленом диапазоне – 0,0228 и 0,0305; в синем – 0,0253 и 0,0416 отн. ед. соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Palmer A.R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implications of non-normal distributions and power of statistical tests. *Acta Zoologica Fennica*. 1992. 191. 57-72.
- Rahaman M., Chen D., Gillani Z., Klukas C., Chen M. Advanced phenotyping and phenotype data analysis for the study of plant growth and development. *Frontiers in Plant Science*. 2015. 6. 1-15.
- Мерзляк М.Н. Спектры отражения листьев и плодов при нормальном развитии, старении и стрессе. *Физиология растений*. 1997. Т. 44. №5. С. 707-716.
- Jacquemoud S., Ustin S. Leaf Optical Properties. Cambridge: Cambridge University Press. 2019.
- Rakutko S., Rakutko E., Avotins A., Apse-Apsitis P. Method and device for measuring stability of plant development by fluctuating asymmetry of optical density of leaves. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 18th International Scientific Conference*. 2019. 1263-1268.
- Rakutko S., Rakutko E., Mishanov A. Measuring device for optical properties of plant leaves. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 20th International Scientific Conference*. 2021. 187-193.
- Chen D., Neumann K., Friedel S., Kilian B., Chen M., Altmann T., Klukas C. Dissecting the phenotypic components of crop plant growth and drought responses based on high-throughput image analysis. *Plant Cell*. 2014. 26. 4636-4655.
- Kevan P.G. Floral colors through the insect eye: What they are and what they mean. In *Handbook of Experimental Pollination Biology*. New York: Van Nostrand Reinhold Company. 1983. 3–30.
- Yamazaki K. Colors of young and old spring leaves as a potential signal for ant-tended hemipterans. *Plant Signaling and Behavior*. 2008. 3. 984-985.
- Borghesi E., González-Miret M.L., Escudero M.L., Malorgio F., Heredia F.J., Meléndez-Martínez A.J. Effects of Salinity Stress on Carotenoids, Anthocyanins, and Color of Diverse Tomato Genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011. 59. 11676-11682.
- Valenta K., Kalbitzer U., Razaifandimby D., Omeja P., Ayasse M., Chapman C.A., Nevo O. The evolution of fruit colour: Phylogeny, abiotic factors and the role of mutualists. *Scientific reports*. 2018. 8. 14302.
- Ougham H., Thomas H., Archetti M. The adaptive value of leaf colour. *New Phytologist*. 2008. 179. 9-13.
- Matsunaga T.M., Ogawa D., Taguchi-Shiobara F., Ishimoto M., Matsunaga S., Habu Y. Direct quantitative evaluation of disease symptoms on living plant leaves growing under natural light. *Breeding Science*. 2017. 67. 316-319.
- Batinić B., Bajić J., Dedijer S., et al. Colorimetric fiber-optic sensor based on reflectance spectrum estimation for determining color of printed samples. *Opt Quant Electron*. 2020. 52. 342.
- Pathare P.B., Opara U.L., Al-Said F.A. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology*. 2012. 6. 36-60.
- Sanmartín P., Gambino M., Fuentes E., Serrano M. A Simple, Reliable, and Inexpensive Solution for Contact Color Measurement in Small Plant Samples. *Sensors*. 2020. 20(8). 2348.
- Rakutko S.A., Alsina I., Avotins A., Berzina K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 17th International Scientific Conference*. 2018. 186-191.
- Ivanyuk V.V., Shkirin A.V., Belosludtsev K.N., et al. Influence of fluoropolymer film modified with nanoscale photoluminophor on growth and development of plants. *Frontiers in Physics*. 2020. 8. 1-6.
- Simakin A.V., Ivanyuk V.V., Gudkov S.V., Dorokhov A.S. Photoconversion fluoropolymer films for the cultivation of agricultural plants under conditions of insufficient insolation. *Applied Sciences* (Switzerland). 2020. 10. N22. 1-10.

REFERENCES

- Palmer A.R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implications of non-normal distributions and power of statistical tests. *Acta Zoologica Fennica*. 1992. 191. 57-72 (In English).
- Rahaman M., Chen D., Gillani Z., Klukas C., Chen M. Advanced phenotyping and phenotype data analysis for the study of plant growth and development. *Frontiers in Plant Science*. 2015. 6. 1-15 (In English).
- Merzlyak M.N. Spektry otrazheniya list'ev i plodov pri normal'nom razvitií, starenii i stresse [Reflection spectra of

- leaves and fruits during normal development, aging and stress.]. *Fiziologiya rasteniy*. 1997. Vol. 44. N5. 707-716 (In Russian).
4. Jacquemoud S., Ustin S. Leaf Optical Properties. Cambridge: Cambridge University Press. 2019 (In English).
 5. Rakutko S., Rakutko E., Avotins A., Apse-Apsitis P. Method and device for measuring stability of plant development by fluctuating asymmetry of optical density of leaves. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 18th International Scientific Conference*. 2019. 1263-1268 (In English).
 6. Rakutko S., Rakutko E., Mishanov A. Measuring device for optical properties of plant leaves. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 20th International Scientific Conference*. 2021. 187-193 (In English).
 7. Chen D., Neumann K., Friedel S., Kilian B., Chen M., Altmann T., Klukas C. Dissecting the phenotypic components of crop plant growth and drought responses based on high-throughput image analysis. *Plant Cell*. 2014. 26. 4636-4655 (In English).
 8. Kevan P.G. Floral colors through the insect eye: What they are and what they mean. In *Handbook of Experimental Pollination Biology*. New York: Van Nostrand Reinhold Company. 1983. 3-30 (In English).
 9. Yamazaki K. Colors of young and old spring leaves as a potential signal for ant-tended hemipterans. *Plant Signaling and Behavior*. 2008. 3. 984-985 (In English).
 10. Borghesi E., González-Miret M.L., Escudero M.L., Malorgio F., Heredia F.J., Meléndez-Martínez A.J. Effects of Salinity Stress on Carotenoids, Anthocyanins, and Color of Diverse Tomato Genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011. 59. 11676-11682 (In English).
 11. Valenta K., Kalbitzer U., Razafimandimby D., Omeja P., Ayasse M., Chapman C.A., Nevo O. The evolution of fruit colour: Phylogeny, abiotic factors and the role of mutualists. *Scientific reports*. 2018. 8. 14302 (In English).
 12. Ougham H., Thomas H., Archetti M. The adaptive value of leaf colour. *New Phytologist*. 2008. 179. 9-13 (In English).
 13. Matsunaga T.M., Ogawa D., Taguchi-Shiobara F., Ishimoto M., Matsunaga S., Habu Y. Direct quantitative evaluation of disease symptoms on living plant leaves growing under natural light. *Breeding Science*. 2017. 67. 316-319 (In English).
 14. Batinić B., Bajić J., Dedijer S., et al. Colorimetric fiber-optic sensor based on reflectance spectrum estimation for determining color of printed samples. *Opt Quant Electron*. 2020. 52. 342 (In English).
 15. Pathare P.B., Opara U.L., Al-Said F.A. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology*. 2012. 6. 36-60 (In English).
 16. Sanmartín P., Gambino M., Fuentes E., Serrano M. A Simple, Reliable, and Inexpensive Solution for Contact Color Measurement in Small Plant Samples. *Sensors*. 2020. 20(8). 2348 (In English).
 17. Rakutko S.A., Alsina I., Avotins A., Berzina K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 17th International Scientific Conference*. 2018. 186-191 (In English).
 18. Ivanyuk V.V., Shkirin A.V., Belosludtsev K.N., et al. Influence of fluoropolymer film modified with nanoscale photoluminophor on growth and development of plants. *Frontiers in Physics*. 2020. 8. 1-6 (In English).
 19. Simakin A.V., Ivanyuk V.V., Gudkov S.V., Dorokhov A.S. Photoconversion fluoropolymer films for the cultivation of agricultural plants under conditions of insufficient insolation. *Applied Sciences* (Switzerland). 2020. 10. N22. 1-10 (In English).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Ракутько С.А. – научное руководство, статистический анализ, черновое написание статьи;

Ракутько Е.Н. – анализ научных источников, обработка результатов измерений, окончательный текст статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Rakutko S.A. – research supervision, statistical analysis, article drafting;

Rakutko E.N. – literature review, measurement results processing, finalizing the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

04.04.2022

12.05.2022