



Изменение эллиптичности поляризации лазерного излучения красного, зеленого и синего диапазонов при прохождении через листья растений кукурузы

Ю. Н. Кульчин¹, С. О. Кожанов¹, Е. П. Субботин¹, А. С. Холин¹,
Н. И. Субботина¹, А. С. Гомольский², О. О. Слугина³

¹ Институт автоматизации и процессов управления, Дальневосточное отделение Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН), г. Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, Россия

³ Передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем», Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, Россия

Установлено, что при прохождении через листья кукурузы линейно поляризованного лазерного излучения красного (633 нм), зеленого (526 нм) и синего (405 нм) диапазонов происходит изменение эллиптичности поляризации в зависимости от угла поворота образца относительно начального положения. Наибольшие изменения отмечены для синего света, чей показатель эллиптичности k варьирует в пределах от -16° до 16° . Для красного и зеленого света эллиптичность варьирует в пределах от -9° до 10° и от -9° до 8° соответственно. Выдвинута гипотеза, что эти изменения вызваны взаимодействием света со слоем эпидермиса, с упорядоченными клетками в форме прямоугольников с волнистыми краями, что обуславливает анизотропию показателя преломления и сдвиг фаз между двумя ортогональными компонентами

Polarization Ellipticity Change of the Red, Green and Blue Ranges of Laser Radiation Transmitted Through the Maize Leaves

Yu. N. Kulchin¹, S. O. Kozhanov¹, E. P. Subbotin¹, A. S. Kholin¹,
N. I. Subbotina¹, A. S. Gomolsky², O. O. Slugina³

¹ Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russia

² Far Eastern Federal University, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russia

³ Advanced Engineering School "Institute of Biotechnology, Bioengineering and Food Systems" of the Far Eastern Federal University, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russia

The paper shows that when linearly polarized laser radiation of red (633 nm), green (526 nm), and blue (405 nm) ranges passes through the leaves of maize plants, the ellipticity of polarization changes depending on the angle of rotation of the sample. The largest changes in ellipticity occur when passing blue light, for which the ellipticity index k varies from -16° to 16° . When red and green light passes through the sample, the ellipticity varies from -9° to 10° and -9° to 8° , respectively. It is suggested that these variations are due to the interaction of light with the epidermis layer. The layer cells are ordered and have shape of rectangles with wavy edges, which leads to the refractive index anisotropy and the phase shift between the two orthogonal components of the E vector. The interaction of light with greater ellipticity with chiral photosensitive structures should occur more efficiently, thus, allegedly, this is the plants mechanism to use linearly polarized light.

Keywords: polarization, polarized radiation, polarization ellipticity, plant leaves, maize, monocotyledonous plants

Article received: 19.07.2024

Article accepted: 14.10.2024

напряженности. Взаимодействие света с большей эллиптичностью с хиральными фоточувствительными структурами должно происходить более эффективно, следовательно, предположительно, это один из механизмов использования растениями линейно поляризованного света.

Ключевые слова: поляризация, поляризованное излучение, эллиптичность поляризации, листья растений, кукуруза, однодольные растения

Статья получена: 19.07.2024

Статья принята: 14.10.2024

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день влияние на растения таких параметров света как длина волны, интенсивность, фотопериод широко исследовано, в то время как изучению действия поляризованного света на растения посвящено небольшое число работ, хотя в природе поляризованный свет не является редкостью и может использоваться растениями, предположительно выполняя сигнальную функцию. Как правило работы, где исследуется данный вопрос посвящены изучению влияния на растения света с круговой поляризацией [1-3], имеющего большую эллиптичность, чем свет с линейной поляризацией. Влияние линейно поляризованного света на развитие растений хотя и исследовалось еще в начале прошлого века [4], после этого практически не изучалось. Из недавних работ можно отметить работу [3], где о действии линейно поляризованного света на растения рапса упоминалось на ряду с действием света с круговой поляризацией. Итогом упомянутых исследований были результаты, показывающие более эффективное влияние излучения с левой либо правой круговой поляризацией на отдельные параметры развития растений или же на их рост в целом. При этом на разные параметры положительно может влиять по-разному закрученный циркулярно поляризованный свет [2]. Авторы данных работ отталкивались от идеи гомохиральности в природе. Обладая свойством кругового дихроизма лево и право закрученные хиральные структуры фоточувствительных клеток листьев должны по-разному поглощать свет с левой и правой круговой поляризацией, что должно оказывать влияние на развитие растения в целом.

INTRODUCTION

At present, the effect of such light parameters as the wavelength, intensity, and photoperiod on the plants has been widely studied, while only a small number of researches have been devoted to the influence of polarized light on the plants, although the polarized light is not uncommon in the wild and can be used by the plants, while presumably performing a signaling function. As a rule, the studies that consider this issue are devoted to the effect of circularly polarized light on the plants [1-3] that has a greater ellipticity than the linearly polarized light. Although the effect of linearly polarized light on the plant development was investigated at the beginning of the last century [4], it has almost not been studied since then. It is possible to note the paper [3], where the effect of linearly polarized light on the rapeseed plants was mentioned along with the effect of circularly polarized light. The results of the above-mentioned studies demonstrated the greater influence of radiation with the left or right circular polarization on the individual parameters of plant development or on their entire growth process. Moreover, different parameters can be positively affected by randomly twisted circularly polarized light [2]. The authors of such papers relied on the homochirality concept in nature. Having the property of circular dichroism, the left and right twisted chiral structures of photosensitive leaf cells should absorb light with the left and right circular polarization in various ways that should affect the entire plant development.

In our previous studies of the polarized laser radiation interaction with the plant leaves, we showed that the ellipticity of polarized He-Ne laser radiation passing through the onion epidermis is changed depending on the leaf rotation angle [5]. We have found that such changes also occur when the light is passed through the leaves, the epidermal cells of which (similar to those of onions) have a shape close to the rectangular one and generate a two-dimensional lattice [6, 7]. Such an arrangement of the epidermal layer is usually typical for the monocotyledonous plants.

The transformation of linearly polarized light into the elliptically polarized light can lead to its more efficient absorption by the plant pigments and photoreceptors that should affect the entire plant growth. This may be one of the mechanisms by using which the plants respond to the polarized radiation. In [8], we demonstrated that the maize plants grown under the linearly polarized light are developed similarly to the control group of plants, and in some cases even surpass them in terms of the growth rates.

In the paper [7] we have already described some changes in the light ellipticity that occur when the

При изучении взаимодействия поляризованного лазерного излучения с листьями растений в наших предыдущих работах мы показали, что эллиптичность поляризованного излучения He-Ne лазера при прохождении через эпидермис лука изменяется в зависимости от угла поворота листа [5]. Мы обнаружили, что такие изменения встречаются также при прохождении света через листья, клетки эпидермиса которых, как и у лука имеют форму близкую к прямоугольной и образуют двумерную решетку [6, 7]. Такое устройство слоя эпидермиса как правило характерно для однодольных растений.

Преобразование линейно-поляризованного света в эллиптически поляризованное может приводить к его более эффективному усвоению пигментами и фоторецепторами растений, что должно влиять на рост растений в целом. Возможно это один из механизмов, с помощью которого растения реагируют на поляризованное излучение. В работе [8] мы показали, что растения кукурузы, выращиваемые при освещении линейно поляризованным светом, развиваются аналогично контрольным растениям, а в некоторых случаях даже превосходят их по темпам развития.

В работе [7] мы уже описывали изменения эллиптичности света, которые происходят при прохождении линейно поляризованного красного света через листья растений кукурузы. В данной работе мы исследуем сравнительные изменения эллиптичности лазерного излучения красного, синего и зеленого спектральных диапазонов, которые происходят при его прохождении через листья растений кукурузы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оптическая установка

Для исследования анизотропии оптических свойств листьев растений кукурузы была собрана экспериментальная установка, построенная согласно оптической схеме на рисунке 1. Излучение лазера (1) проходит через волновую пластину $\lambda/4$ (2) и расширяется линзой (3) до диаметра луча 5 мм. Далее световой луч проходит через attenuator (4), позволяющий регулировать степень облученности образца (5). Образец закреплен на поворотном столике и способен вращаться в плоскости, перпендикулярной распространению излучения. После этого световой пучок собирается на поляриметре (PAX5710 Thorlabs, США) (6) для анализа состояния поляризации излучения. Для получения излучения красного, синего и зеленого диапазонов использовались соответственно гелий-неоновый

linearly polarized red light passes through the maize leaves. In this paper we consider the comparative changes in the ellipticity of laser radiation of the red, blue and green spectral ranges that occur when it passes through the maize leaves.

MATERIALS AND METHODS

Optical setup

To study anisotropy of the optical properties of maize leaves, an experimental setup was assembled according to the optical circuit given in Figure 1. The laser radiation (1) passes through a $\lambda/4$ wave plate (2) and is expanded by the lens (3) to a beam diameter of 5 mm. Further, the light beam is passed through an attenuator (4) that allows regulating the sample irradiation degree (5). The sample is fixed on a turntable and can rotate in a plane perpendicular to the radiation propagation direction. After that, the light beam is gathered on a polarimeter (PAX5710 Thorlabs, USA) (6) to analyze the radiation polarization condition. To obtain radiation in the red, blue, and green ranges, a helium-neon laser (632.8 nm) and diode-pumped solid-state lasers with the radiation peaks of 526.5 and 445 nm were applied, respectively.

The samples studied were the rectangular fragments of maize leaves with the dimensions of 15×15 mm. The size was selected so that the defocused laser beam would not go beyond the sample boundaries during the sample rotation. The leaf sample was placed between two glass plates with the thickness of 0.15 mm. For correct calibration and interpretation of the measurement results, the radiation polarization condition was assessed with and without the plant leaf sample between the glass plates. The measurement results of the light transmission through the glass were taken as the control results. The polariza-

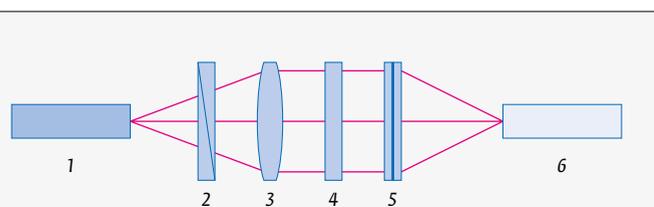


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – пластина $\lambda/4$; 3 – коллимирующая линза; 4 – attenuator; 5 – исследуемый образец на ротаторе; 6 – поляриметр (PAX5710 Thorlabs, США)

Fig. 1. Optical circuit of the experimental setup: 1 – a laser; 2 – a $\lambda/4$ plate; 3 – a collimating lens; 4 – an attenuator; 5 – a test sample on a rotator; 6 – a polarimeter (PAX5710 Thorlabs, USA)

лазер (632,8 нм), а также твердотельные лазеры с диодной накачкой с пиками излучения 526,5 и 445 нм.

Исследуемые образцы представляли собой прямоугольные фрагменты листьев кукурузы размером 15×15 мм. Размер подбирался с учетом того, чтобы расфокусированный пучок лазера при вращении образца не выходил за пределы образца. Образец листа растения помещался между двумя стеклянными пластинами толщиной 0,15 мм. Для правильной калибровки и интерпретации результатов измерений, измерения состояния поляризации излучения производились с наличием и отсутствием образца листа растения между стеклянными пластинами. Результаты измерений прохождения света через стекло принимались за контроль. Обработка результатов поляризационных измерений осуществлялась с использованием программного обеспечения TXP Series Instrumentation (Starter, Server Control, TPX Polarimeter), США.

Основным параметром при анализе состояния поляризации был показатель эллиптичности k (точность измерения эллиптичности $\pm 0,25^\circ$) [9]. Когда свет поляризован линейно он составляет 0° , при правой круговой поляризации он равен 45° , а при левой круговой -45° .

Растительный материал

В эксперименте для исследования изменения состояния поляризации света при его прохождении через листья растений в качестве растительного материала использовались растения кукурузы (*Zea mays* L.), сорт «Кубанский сахарный».

Образцы растений для исследований подготавливались следующим образом. Семена после замачивания в дистиллированной воде (72 часа) высаживались в пластиковые горшки (ш×в, см: 9×10, ООО Сады Приморья, Уссурийск, Российская Федерация) заполненные универсальной почвой для садовых культур (N1:P1:K1, мг/л: 160-240:145-215:180-290, органическое вещество, мг/л: 35, pH 5,5-7, ООО Терра Мастер, Новосибирск, Российская Федерация). Растения выращивались в течение 21 дня в фитобоксе с белым светодиодным излучением интенсивностью 200 мкмоль/с·м² (температура – $22\pm 2^\circ$, влажность $70\pm 5\%$). Полив осуществлялся один раз за три дня.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости эллиптичности света от угла поворота образца в плоскости, перпендикулярной рас-

tion measurement results were processed using the TXP Series Instrumentation software (Starter, Server Control, TPX Polarimeter), USA.

The main parameter during the polarization state analysis was the ellipticity index k (the ellipticity measurement accuracy was $\pm 0.25^\circ$) [9]. When the light is polarized linearly, it is equal to 0° ; in the case of right circular polarization, it is equal to 45° , and in the case of left circular polarization – 45° .

Plant material

In the experiment to study the changes in the light polarization state as it passes through the plant leaves, the maize (*Zea mays* L.), variety “Kuban sweet corn”, was used as the plant material.

The plant samples for research were prepared as follows. The seeds were soaked in the distilled water (for 72 hours) and planted into the plastic pots (W×H, cm: 9×10, Sady Primoriya LLC, Ussuriysk, Russian Federation) filled with the multipurpose soil for horticultural crops (N1:P1:K1, mg/l: 160-240:145-215:180-290, organic matter, mg/l: 35, pH 5.5-7, Terra Master LLC, Novosibirsk, Russian Federation). The plants were grown for 21 days in a phytobox under the white LED radiation with the intensity of 200 $\mu\text{mol/s m}^2$ (temperature: $22\pm 2^\circ$, humidity: $70\pm 5\%$). Watering was performed once every three days.

RESULTS AND DISCUSSION

The dependences of the light ellipticity on the sample rotation angle in the plane perpendicular to the radiation propagation direction during the passage of light with three wavelength ranges (blue (405 nm), green (524 nm) and red (633 nm)) are shown in Fig. 2. The negative values of ellipticity k correspond to the light with left elliptical polarization, in the case of which the intensity vector E is rotated counterclockwise. When the index k is positive, the light has right elliptical polarization and the intensity vector of the electric component of the light wave field E is rotated clockwise.

It is evident on the basis of the graphs that the passage of linearly polarized laser radiation through the maize leaves results in a change in the polarization ellipticity. In this case, the light ellipticity is changed harmonically depending on the sample rotation angle relative to the predominant oscillation direction of the incident light intensity vector that has been already noted in the papers [6, 7] when studying the laser radiation passage within the red range (633 nm) through the phalaris and maize leaves. In this case, when the red light passes, any change in the ellipticity occurs within almost the same limits as when the green

пространению излучения при прохождении света трех диапазонов длин волн: синего (405 нм), зеленого (524 нм) и красного (633 нм) приведены на рис. 2. Отрицательные значения эллиптичности k соответствуют свету с левой эллиптической поляризацией, при которой вектор напряженности E вращается против часовой стрелки. При положительном k свет имеет правую эллиптическую поляризацию и вращение вектора напряженности электрической компоненты поля световой волны E происходит по часовой стрелке.

Из графиков видно, что при прохождении линейно поляризованного лазерного излучения через листья растений кукурузы происходит изменение эллиптичности поляризации. При этом в зависимости от угла поворота образца относительно преимущественного направления колебаний вектора напряженности падающего света эллиптичность света гармонически изменяется, что уже отмечалось в работах [6, 7] при исследовании прохождения через листья растений фалариса и кукурузы лазерного излучения красного диапазона (633 нм). При этом при прохождении красного света изменение эллиптичности происходит почти в таких же пределах, как и при прохождении зеленого света и варьируется для красного от -9° до 10° , а для зеленого от -9° до 8° . Эллиптичность поляризации синего света изменяется сильнее в диапазоне от -16° до 15° . Изменения эллиптичности света при прохождении излучения через стекло при отсутствии образца на графиках не отражены, поскольку малы и составляют $0,3-0,5^\circ$. Мы полагаем, что наблюдающиеся при взаимодействии лазерного излучения с листом кукурузы изменения эллиптичности излучения обусловлены его взаимодействием с эпидермальным слоем листьев.

Фото клеток слоя эпидермиса изучаемого листа кукурузы представлена на рис. 3. Видно, клетки в слое эпидермиса расположены упорядоченно и имеют форму прямоугольников с волнообразными стенками. Как было показано в [5] при прохождении линейно поляризованного лазерного излучения через эпидермис лука свет становится

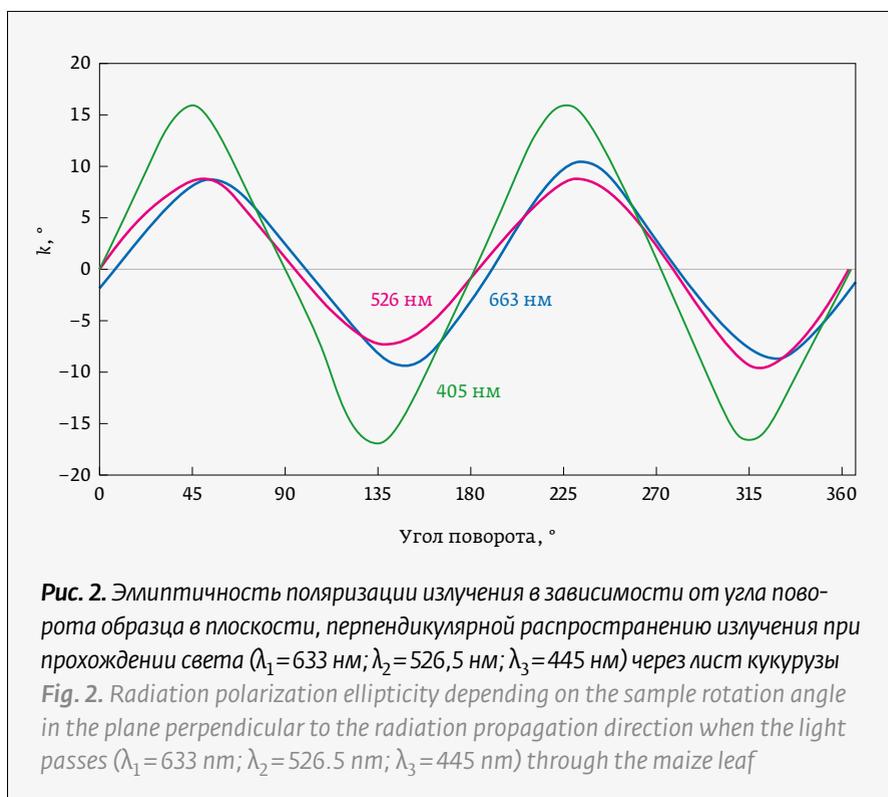


Рис. 2. Эллиптичность поляризации излучения в зависимости от угла поворота образца в плоскости, перпендикулярной распространению излучения при прохождении света ($\lambda_1=633$ нм; $\lambda_2=526,5$ нм; $\lambda_3=445$ нм) через лист кукурузы
Fig. 2. Radiation polarization ellipticity depending on the sample rotation angle in the plane perpendicular to the radiation propagation direction when the light passes ($\lambda_1=633$ нм; $\lambda_2=526.5$ нм; $\lambda_3=445$ нм) through the maize leaf

light passes. It varies for the red light from -9° to 10° , and for the green light - from -9° to 8° . The blue light polarization ellipticity is changed more significant within the range from -16° to 15° . The changes in the light ellipticity when radiation passes through the



Рис. 3. Клетки эпидермиса листа кукурузы (AmScope T120 Series, камера AmScope MU1000-HS)

Fig. 3. Epidermal cells of a maize leaf (AmScope T120 Series, AmScope MU1000-HS camera)



эллиптически поляризованным, и его эллиптичность изменяется в зависимости от поворота образца в плоскости, перпендикулярной распространению излучения также, как и в представленной нами работе, что объясняется анизотропией показателя преломления, который различен для цитозоля и клеточной мембраны.

Анализ результатов показал (рис. 2), что наибольшие изменения эллиптичности наблюдаются, когда угол между вектором напряженности падающего света и направлением длинной оси клеток эпидермиса составляет 45°. При таком угле анизотропия показателя преломления является максимальной. Это приводит к значительному сдвигу фаз между двумя ортогональными составляющими вектора напряженности света. В результате возникающего сдвига фаз падающий линейно поляризованный свет преобразуется в эллиптически поляризованный. В таком случае слой эпидермиса ведет себя как фазовая пластинка, которая согласно данным рис. 2, сильнее всего изменяет состояние поляризации синего света. При этом толщины слоя и анизотропии показателя преломления в данном слое недостаточны для преобразования света в циркулярно поляризованный. Тем не менее, как показывают экспериментальные результаты, эллиптичность может достигать 16°. Это может сказываться на поглощении света хиральными молекулами листьев кукурузы.

Стоит также отметить, что значительная часть падающего излучения при прохождении сквозь лист рассеивается, что приводит к его деполаризации. Для оценки степени поляризации света используется параметр Degree of Polarization (DOP). Принято, что он равен 100% для полностью поляризованного света и 0% для неполяризованного света. Параметр рассчитывается по следующей формуле:

$$DOP = \frac{I_{pol}}{I_{pol} + I_{unp}}$$

где I_{pol} – интенсивность поляризованного света, а I_{unp} – интенсивность неполяризованного света.

В таблице приведены значения степени поляризации DOP излучения прошедшего сквозь образец, когда эллиптичность k максимальна (k_{max}) и равна нулю (k_0). Изначально падающее на лист излучение имеет значение DOP более 99%.

Из таблицы видно, что линейно поляризованный свет красного и зеленого диапазона деполаризуется в одинаковой степени и значение DOP при эллиптичности равной k_0 для них составляет 50%, что говорит о том, что свет остается частично поля-

Таблица. Степень поляризации DOP света в результате прохождения через лист кукурузы при максимальной k_{max} и нулевой эллиптичности k_0 ($k=0$)

Table. Degree of polarization DOP of the light as a result of passing through the maize leaf at maximum ellipticity k_{max} and zero ellipticity k_0 ($k=0$)

Цвет Color	$k_{max}, ^\circ$	DOP при $k_0, \%$ DOP at $k_0, \%$	DOP при $k_{max}, \%$ DOP at $k_{max}, \%$
Красный Red	10	50,1	42,7
Зеленый Green	9	51,3	40,8
Синий Blue	16	37,4	26,3

glass in the absence of the sample are not indicated on the graphs, since they are small and equal to 0.3–0.5°. We believe that the changes in the radiation ellipticity observed during the laser radiation interaction with the maize leaf are due to its interaction with the epidermal layer of the leaves.

The photo of the epidermis layer cells of the maize leaf under study is shown in Fig. 3. It can be seen that the cells in the epidermis layer are arranged in an orderly manner and have the shape of rectangles with the wavy walls. As it was shown in [5], when the linearly polarized laser radiation passes through the onion epidermis, the light becomes elliptically polarized, and its ellipticity is changed depending on the sample rotation in a plane perpendicular to the radiation propagation direction, as in the paper provided, that is explained by the anisotropy of the refractive index being different for the cytosol and the cell membrane.

Analysis of the results has showed (Fig. 2) that the greatest changes in ellipticity are observed when the angle between the incident light intensity vector and the major axis direction of the epidermal cells is 45°. At this angle, the refractive index anisotropy is maximum. This leads to a significant phase shift between two orthogonal components of the light intensity vector. As a result of the obtained phase shift, the incident linearly polarized light is converted into the elliptically polarized light. In this case, the epidermal layer behaves as a retardation plate that, according to the data in Fig. 2, changes the polarization state of blue light most strongly. Moreover, the layer thickness and the refractive index anisotropy in this layer are insufficient to convert this light into the circularly polarized light. However, according to the experi-



ризованным даже после взаимодействия с внутренними тканями листа. Синий линейно поляризованный свет деполаризуется сильнее, а параметр DOP имеет значение 37%, что по-видимому связано с более низкой длиной волны излучения и оптическими свойствами среды. При угле поворота образца листа, когда эллиптичность максимальна k_{\max} степень линейной поляризации для красного и зеленого света снижается практически до 40%, а для синего до 26%. При прохождении поляризованного света через слой эпидермиса лука степень его поляризации практически не изменялась и составляла 98–99%. Таким образом, в результате прохождения света через эпидермис листа кукурузы линейно поляризованный свет преобразуется в эллиптический и остается сильно поляризованным, после чего он взаимодействует с внутренними клетками листа и частично деполаризуется, особенно в синем спектральном диапазоне.

У растений за поглощение света отвечают такие фоточувствительные структуры как пигменты, использующие световую энергию в процессе фотосинтеза, а также фоторецепторы, с помощью которых контролируется развитие растения и происходит фотоморфогенез [10, 11]. Основными группами пигментов листьев являются хлорофиллы, каротиноиды, флавоноиды, в целом позволяющие растениям использовать свет всего видимого диапазона и преимущественно свет красной и синей областей спектра. Фоторецепторы также используют свет широкой части видимого диапазона. Фоторецепторами красного света являются фитохромы, синего – криптохромы и фототропины, а излучение ультрафиолета В листья поглощают с помощью белка UVR8.

Фототропины в растениях регулируют фототропизм, движение хлоропластов, открытие устьиц и расширение листьев у растений [12]. Криптохромы влияют на фотопериодический контроль зарождения цветка, ингибирование удлинения гипокотила синим светом, а также такие световые реакции как циркадные ритмы, развитие корней, открытие устьиц и др. [13, 14]. Фитохромы отвечают за такие функции как прорастание семян, избегание тени, цветение, фотопериодическое восприятие и прочее [14–16].

В [13–15] было показано, что в фототропинах в основном состоянии мононуклеотид флавина домена LOV2 показывает отрицательный круговой дихроизм в синей области спектра поглощения. При этом LOV2 играет важную роль в регуляции физиологических реакций. Хромофор криптохромов – динуклеотид аденина флавина в окисленном

состоянии, эллиптичность может достигать 16°. Это может повлиять на поглощение света хиральными молекулами в листьях кукурузы.

Также стоит отметить, что значительная часть падающего излучения рассеивается при прохождении через лист, что приводит к его деполаризации. Для оценки степени поляризации света используется параметр Degree of Polarization (DOP). Предполагается, что он равен 100% для полностью поляризованного света и 0% для неполяризованного. Параметр рассчитывается по следующей формуле:

$$DOP = \frac{I_{\text{pol}}}{I_{\text{pol}} + I_{\text{unp}}},$$

где I_{pol} – интенсивность поляризованного света, а I_{unp} – интенсивность неполяризованного света.

Таблица показывает значения степени поляризации (DOP) излучения, прошедшего через образец, когда эллиптичный индекс k достиг максимума (k_{\max}) и равен нулю (k_0). Излучение, изначально падающее на лист, имеет значение DOP более 99%.

Из таблицы очевидно, что линейно поляризованный свет в красной и зеленой областях спектра деполаризуется в одинаковой степени, а значение DOP для эллиптичности, равной k_0 , составляет 50%, что указывает на то, что свет остается частично поляризованным даже после взаимодействия с внутренними тканями листа. Синий линейно поляризованный свет деполаризуется более значительно, а значение DOP параметра составляет 37%, что, очевидно, связано с более короткой длиной волны излучения и оптическими свойствами среды. При повороте образца листа, когда эллиптичность достигла максимума (k_{\max}), степень линейной поляризации для красного и зеленого света снизилась до почти 40%, а для синего – до 26%. При прохождении поляризованного света через слой эпидермиса лука степень его поляризации практически не изменилась и составила 98–99%. Таким образом, в результате прохождения света через эпидермис листа кукурузы линейно поляризованный свет преобразуется в эллиптический и остается сильно поляризованным, после чего он взаимодействует с внутренними клетками листа и частично деполаризуется, особенно в синем спектральном диапазоне.

В растениях за поглощение света отвечают такие фоточувствительные структуры как пигменты, использующие световую энергию в процессе фотосинтеза, а также фоторецепторы, с помощью которых контролируется развитие растения и происходит фотоморфогенез. Основными группами пигментов листьев являются хлорофиллы, каротиноиды, флавоноиды, в целом позволяющие растениям использовать свет всего видимого диапазона и преимущественно свет красной и синей областей спектра. Фоторецепторы также используют свет широкой части видимого диапазона. Фоторецепторами красного света являются фитохромы, синего – криптохромы и фототропины, а излучение ультрафиолета В листья поглощают с помощью белка UVR8.



состоянии также обладает отрицательным круговым дихроизмом в синей части спектра, как и хромофор домена LOV2 [15, 16]. Наличие отрицательного кругового дихроизма хромофора фитохрома phyV отмечалось в работе [2].

Фоточувствительные хиральные структуры фоторецепторов растений, перечисленные выше, напрямую влияют на работу этих фоторецепторов, которые в свою очередь контролируют ключевые процессы в развитии растений. Как было показано, линейно поляризованный свет при прохождении через лист кукурузы становится эллиптически поляризованным. Такое излучение должно более эффективно поглощаться хиральными фоточувствительными структурами клеток листьев и в итоге приводить к более высоким показателям роста. При этом синий свет, имеющий наибольшую эллиптичность в результате прохождения через слой эпидермиса, в момент взаимодействия с рецепторами должен более эффективно усваиваться, чем красный и зеленый свет.

Известно, что естественный солнечный свет, попадающий на Землю, не поляризован, однако он способен поляризоваться при рассеянии в направлении перпендикулярном лучам солнца. Таким образом в утренние и вечерние часы из зенитной точки неба падает поляризованный свет [17]. Используя выше описанный механизм растения, могли бы получать информацию об изменениях внешних световых условий и в соответствии с ними регулировать процессы развития.

Понимание того как растения используют информацию о поляризации света может помочь в поиске идеальных для растений параметров света, что поспособствует развитию технологий выращивания растений в условиях искусственного освещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было показано, что при прохождении через листья растений кукурузы линейно поляризованного монохроматического излучения с длинами волн 633, 526 и 405 нм происходит изменение эллиптичности поляризации света, которое можно объяснить взаимодействием света со слоем эпидермиса, клетки которого у листа кукурузы упорядочены и имеют форму, близкую к прямоугольной. В зависимости от угла поворота образца в плоскости, перпендикулярной распространению излучения, эллиптичность гармонически меняется в пределах от -9° до 10° при красном свете, от -9° до 8° при зеленом свете и от -16° до 16° при синем, выполняя таким образом роль фазовой пластинки.

of the visible range. The red light photoreceptors are phytochromes, the blue light ones – cryptochromes and phototropins, and the leaves absorb ultraviolet radiation using the UVR 8 protein.

The phototropins in the plants regulate phototropism, chloroplast movement, stomatal opening, and leaf expansion [12]. The cryptochromes affect photoperiodic control of flower formation, inhibition of hypocotyl elongation by the blue light, as well as the light reactions, such as the circadian rhythms, root development, stomatal opening, etc. [13, 14]. The phytochromes are responsible for the functions such as seed germination, shade avoidance, flowering, photoperiodic perception, etc. [14–16].

In [13–15] it has been shown that in the case of ground state of phototropins, the mononucleotide of the LOV2 domain flavin demonstrates negative circular dichroism within the blue region of the absorption spectrum. In this case, LOV2 plays an important role in the regulation of physiological reactions. The chromophore of cryptochromes is an adenine flavin dinucleotide. In the oxidized state it also has negative circular dichroism within the blue spectral range, similar to the LOV2 domain chromophore [15, 16]. The availability of negative circular dichroism of the phytochrome chromophore phyB was noted in the paper [2].

The above-mentioned photosensitive chiral structures of plant photoreceptors directly influence the operation of these photoreceptors that in turn control the key processes in plant development. As it has been shown, the linearly polarized light becomes the elliptically polarized one when passing through the maize leaf. Such radiation should be more efficiently absorbed by the chiral photosensitive structures of leaf cells and ultimately lead to the higher growth rates. Moreover, the blue light that has the greatest ellipticity as a result of transmission through the epidermis layer, should be more effectively absorbed than the red and green light when interacting with the receptors.

It is known that the natural sunlight reaching the Earth is not polarized, but it can become polarized when scattered in a direction perpendicular to the sunbeams. Thus, the polarized light falls from the zenith point of the sky in the morning and evening [17]. While using the mechanism described above, the plants could receive information about any changes in the external light conditions and regulate the development processes in accordance with them.

Understanding of the mechanisms used by the plants to obtain the light polarization information can help in determining the ideal light parameters for plants that



Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2022-1143 от 07 июля 2022 года).

REFERENCES

1. **Shibayev P. P., Pergolizzi R. G.** The effect of circularly polarized light on the growth of plants. *International Journal of Botany*. 2011; 7:113–117. DOI: 10.3923/ijb.2011.113.117.
2. **Lkhamkhuu E., Zikihara K., Katsura H., Tokutomi S., Hosokawa T., Usami Y., Ichihashi M., Yamaguchi J., Monde K.** Effect of circularly polarized light on germination, hypocotyl elongation and biomass production of *Arabidopsis* and lettuce: Involvement of phytochrome B. *Plant Biotechnology*. 2020; 37:57–67. DOI: 10.5511/plantbiotechnology.19.1219a.
3. **Anderson C.** *The effects of polarized light on B. napus growth*. 2018 Apr 19. Milligan University Digital Repository. URL: <https://mcstor.library.milligan.edu/handle/11558/3448> [28.05.2024].
4. **Macht D. I.** Concerning the influence of polarized light on the growth of seedlings. *Journal of General Physiology*. 1926; 10(1):41–52. DOI: 10.1085/jgp.10.1.41.
5. **Kulchin Y. N., Sergeev A. A., Zinin Y. A., Gol'tsova D. O., Kozhanov S. O., Subbotin E. P.** Simulation of interaction of polarised laser light with plant leaves. *Quantum Electronics*. 2021; 51:947–952. DOI: 10.1070/QEL17630.
6. **Kulchin Y. N., Subbotin E. P., Kholin A. S., Kozhanov S. O., Dzemidchuk V. V., Trofimov Y. V., Kovalevsky K. V., Subbotina N. I., Gomolskii A. S.** Effect of epidermis of plant leaves on their interaction efficiency with low-intensity laser light. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2023; 50: 5613–5623. DOI: 10.3103/S1068335623170074.
7. **Kulchin Y. N., Subbotin E. P., Kozhanov S. O., Kholin A. S., Subbotina N. I.** Эффект изменения состояния поляризации лазерного излучения, проходящего через листья растений = [The effect of laser light state of polarization change while transmitted through plant leaves]. *Optical Methods of Flow Investigation: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference*. Moscow. 26–30 June 2023. Moscow: Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation. 2023; 562–572. (In Russ.). EDN PFHMLU. eLIBRARY ID: 54941637.
Кульчин Ю. Н., Субботин Е. П., Кожанов С. О., Холин А. С., Субботина Н. И. Эффект изменения состояния поляризации лазерного излучения, проходящего через листья растений. *Оптические методы исследования потоков: Труды XVII Международной научно-технической конференции*. Москва, 26–30 июня 2023 года. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023; 562–572. – EDN PFHMLU. eLIBRARY ID: 54941637.
8. **Kulchin Y. N., Kozhanov S. O., Kholin A. S., Subbotin E. P., Kovalevsky K. V., Subbotina N. I., Gomolsky A. S.** The linearly polarized light effect on maize development. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023; 87(3): 5409–5415. DOI: 10.1134/S1062873823705950.
9. **Tuchin V. V.** Polarized light interaction with tissues. *Journal of Biomedical Optics*. 2016; 21(7):7114. DOI: 10.1117/1.JBO.21.7.07114. PMID: 27121763.
10. **Kulchin Y. N., Bulgakov V. P., Gol'tsova D. O., Subbotin E. P.** Optogenetika rasteniy – svetoregulyatsiya geneticheskogo i ehpigeneticheskogo mekhanizmov upravleniya ontogenezom = [Plant optogenetics – photoregulation of genetic and epigenetic mechanisms of ontogenesis control]. *Vestnik of the FEB RAS*. 2020; 1:5–25. (In Russ.). DOI 10.25808/08697698.2020.209.1.001. EDN QHUXPC.
Кульчин Ю. Н., Булгаков В. П., Гольцова Д. О., Субботин Е. П. Оптогенетика растений – светорегуляция генетического и эпигенетического механизмов управления онтогенезом. *Вестник ДВО РАН*. 2020; 1:5–25. DOI: 10.25808/08697698.2020.209.1.001. EDN QHUXPC.
11. **Golovatskaya I. F.** *Morfogenez rasteniy i yego regulyatsiya. Ch. 1. Fotoregulyatsiya morfogeneza rasteniy* = [Plants morphogenesis and its regulation: pt. 1. Photoregulation of plants morphogenesis]. – Tomsk.: Tomsk State University Publ. 2016. 172 p. (In Russ.). URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/287483189.pdf> [28.05.2024].
Головацкая И. Ф. *Морфогенез растений и его регуляция. Ч. 1. Фоторегуляция морфогенеза растений*. – Томск: Томский гос. ун-т. 2016. 172 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/287483189.pdf> [28.05.2024].
12. **Takemiya A., Inoue S., Doi M., Kinoshita T., Shimazaki K.** Phototropins promote plant growth in response to blue light in low light environments. *The Plant Cell*. 2005; 17(4):1120–1127. DOI: 10.1105/tpc.104.030049.

will contribute to the development of plant growing technologies in the conditions of artificial lighting.

CONCLUSION

It has been shown that when the linearly polarized monochromatic radiation with the wavelengths of 633, 526 and 405 nm passes through the maize leaves, the light polarization ellipticity is changed that can be explained by the light interaction with the epidermis layer, the cells of which in the maize leaf are well-ordered and have a shape close to rectangular. Depending on the sample rotation angle in the plane perpendicular to the radiation propagation direction, the ellipticity varies harmonically within the range from -9° to 10° for the red light, from -9° to 8° for the green light, and from -16° to 16° for the blue light, thus acting as a retardation plate.

Funding. The paper has been prepared with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2022-1143 dated July 07, 2022).

AUTHORS

Kulchin Yuriy Nikolayevich, Doctor of sciences in physical and mathematical sciences, Academic Supervisor, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russian Federation.

ORCID: 0000-0002-8750-4775

Kozhanov Sergey Olegovich, Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russian Federation.

ORCID: 0009-0001-2629-3521

Subbotin Evgeny Petrovich, Candidate of physical and mathematical sciences, Leading Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russian Federation.

ORCID: 0000-0002-8658-3504

Kholin Alexander Sergeevich, Research Fellow, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9751-5136>

Subbotina Natalia Ivanovna, Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russian Federation.

ORCID: 0000-0003-0945-3877

Gomolsky Andrey Sergeevich, Graduate student, Far Eastern Federal University (FEFU), Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russian Federation.

ORCID: 0009-0003-5606-9648

Slugina Olga Olegovna, Student, Advanced Engineering School "Institute of Biotechnology, Bioengineering and Food Systems" of the Far Eastern Federal University (AES IBBaFS FEFU), Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russian Federation.

ORCID: 0009-0008-0805-4544

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

COMPETING INTERESTS

The authors declare that they have no conflicts of interest.



13. **Yu X., Liu H., Klejnot J., Lin C.** *The cryptochrome blue light receptors*. The Arabidopsis Book. 2010; 8: e0135. DOI: 10.1199/tab.0135.
14. **Franklin K. A., Quail P. H.** Phytochrome functions in Arabidopsis development. *Journal of Experimental Botany*. 2010; 61(1):11–24. DOI: 10.1093/jxb/erp304. PMID: 19815685; PMCID: PMC2800801.
15. **Corchnoy S. B., Swartz T. E., Lewis J. W., Szundi I., Briggs W. R., Bogomolni R. A.** Intramolecular proton transfers and structural changes during the photocycle of the LOV2 domain of phototropin 1. *Journal of Biological Chemistry*. 2003; 278(2):724–731. DOI: 10.1074/jbc.M209119200. Epub 2002 Oct 30. PMID: 12411437.
16. **Brazard J., Usman A., Lacombat F., Ley C., Martin M. M., Plaza P., Mony L., Heijde M., Zabulon G., Bowler C.** Spectro-temporal characterization of the photoactivation mechanism of two new oxidized cryptochrome/photolyase photoreceptors. *Journal of the American Chemical Society*. 2010; 132(13):4935–4945. DOI: 10.1021/ja1002372. PMID: 20222748.
17. **Zvereva S. V.** *V mire solnechnogo sveta = [At the world of sunlight]*. – Л.: Gidrometeoizdat. 1988. 160 p. (In Russ.). URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-417144956.pdf [28.05.2024].
Зверева С. В. В мире солнечного света: монография. – Л.: Гидрометеоиздат. 1988. 160 с. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-417144956.pdf [28.05.2024].

Российская Федерация.

ORCID: 0009-0001-2629-3521

Субботин Евгений Петрович, к. ф.-м.н, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт автоматике и процессов управления» ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация.

ORCID: 0000-0002-8658-3504

Холин Александр Сергеевич, научный сотрудник, ФГБУН «Институт автоматике и процессов управления» ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация. ORCID: 0000-0002-9751-5136

Субботина Наталья Ивановна, младший научный сотрудник, ФГБУН «Институт автоматике и процессов управления» ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация.

ORCID: 0000-0003-0945-3877

Гомольский Андрей Сергеевич, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, о. Русский, п. Аякс, г. Владивосток, Российская Федерация. ORCID: 0009-0003-5606-9648

Слугина Ольга Олеговна, студент, Передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем», Дальневосточный федеральный университет, о. Русский, п. Аякс, г. Владивосток, Российская Федерация.

ORCID: 0009-0008-0805-4544

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кульчин Юрий Николаевич, ФГБУН «Институт автоматике и процессов управления» ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, академик, научный руководитель института.

ORCID: 0000-0002-8750-4775

Кожанов Сергей Олегович, младший научный сотрудник, ФГБУН «Институт автоматике и процессов управления» ДВО РАН, г. Владивосток,

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Авторы внесли равноценный вклад в работу в части своих компетенций, ознакомлены с текстом статьи и согласны с ним.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Металлообработка. Сварка — Урал

международная выставка технологий, оборудования, материалов для машиностроения, металлообрабатывающей промышленности и сварочного производства

18–21 марта 2025
Екатеринбург

крупнейший специализированный
региональный проект в России



телеграм-канал

@expometal



(342) 264-64-27
egorova@proexpo.ru

metal-ekb.proexpo.ru

