

Моделирование взаимодействия поляризованного лазерного излучения с листьями растений

Ю.Н.Кульчин, А.А.Сергеев, Ю.А.Зинин,
Д.О.Гольцова, С.О.Кожанов, Е.П.Субботин

Предложена оптическая модель для описания особенностей взаимодействия поляризованного лазерного излучения с листьями растений. Показано, что эпидермальный слой листьев растений обладает оптической анизотропией, возникающей в процессе их развития. Это может служить важным фактором, обуславливающим особенности взаимодействия поляризованного лазерного излучения с содержащимися в клетках листьев растений биомолекулами, белками и ферментами, для которых характерна изомерия физических и химических свойств. Проведена экспериментальная проверка предложенной модели.

Ключевые слова: поляризованное лазерное излучение, анизотропия эпидермиса, листья растения, модель взаимодействия.

1. Введение

Свет является одним из наиболее важных факторов развития растений, он регулирует в них процессы фотосинтеза, морфогенеза, метаболизма, экспрессию генов и другие физиологические и биохимические реакции. Как правило, при описании процессов, влияющих на рост растений, учитываются такие характеристики света, как интенсивность, спектральный состав и фотопериод. Однако на практике ситуация оказывается более сложной. Сегодня, когда особое внимание во всем мире уделяется развитию контролируемого сельского хозяйства, основанного на широком применении светодиодного освещения, необходимо учитывать и другие количественные и качественные характеристики излучения. К ним следует отнести достигаемые значения мощности фотосинтетически активного излучения, динамику изменения интенсивности и спектра освещающего излучения, его когерентность и поляризацию, направление освещения. Именно эти, отсутствующие в обычном солнечном свете, уникальные характеристики оказались доступными с использованием лазерного и светодиодного излучения.

В ряде работ было обращено внимание на влияние поляризации излучения на развитие растений [1, 2], однако детального изучения процесса взаимодействия поляризованного света с растениями не проводилось. Целью настоящей работы является моделирование взаимодействия поляризованного лазерного излучения с эпидермальной клеточной системой растений.

Ю.Н.Кульчин. Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922 Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

А.А.Сергеев, Ю.А.Зинин, Д.О.Гольцова, Е.П.Субботин. Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: s.e.p@list.ru

С.О.Кожанов. Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922 Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

Поступила в редакцию 12 июля 2021 г.

2. Модель и оптические свойства эпидермиса листьев растений

Современная клеточная теория исходит из единства расчлененности многоклеточных организмов на клетки и целостности организма, основанной на взаимодействии клеток [3–5]. Форма и размеры растительных клеток сильно варьируются и зависят от положения клеток в теле растения и выполняемых ими функций. У большинства высших растений размер паренхимных клеток, составляющих ткани листьев и цветков, обычно находится в пределах 10–100 мкм [6].

В клетках взрослых растений можно различить три основные части: клеточную оболочку, протопласт и вакуоль. Оболочка клетки обычно бесцветна и прозрачна, легко пропускает свет, и по ней могут перемещаться вода и растворенные низкомолекулярные вещества [7]. Клеточная оболочка состоит в основном из полисахаридов, белков, минеральных солей, лигнина, пигментов, микрофибрилл целлюлозы и других веществ. Толщина оболочек растительных клеток варьирует в широких пределах в зависимости от функции клеток и их возраста и может быть более 10 мкм, заполняя значительную часть объема клетки. Показатель преломления оболочки клеток листьев растений изменяется в пределах 1.40–1.50 [8–11].

Главным компонентом клетки, определяющим ее функционирование как элементарной биологической системы, является протопласт, который состоит из ядра клетки и цитоплазмы [12]. Химический состав протопласта очень разнообразен и непрерывно меняется в процессе жизнедеятельности. Основные его компоненты: конституционные вещества (белки, нуклеиновые кислоты, липиды, углеводы, минеральные соли, вода) и эргастические вещества (запасные вещества и отбросы). Содержимое вакуолей – клеточный сок – представляет собой водный раствор углеводов, белков, аминокислот, органических кислот и их солей, минеральных ионов, алкалоидов, гликозидов, пигментов, танинов и др. В связи с этим показатель преломления внутреннего содержимого клетки может изменяться в достаточно широких пределах – от 1.34 до 1.42 [13–15].

Строение листа растения тесно связано с функциональными особенностями его составляющих. Как правило, он состоит из трех слоев (рис.1,*a*) [16]. Сверху и снизу лист покрыт прозрачным слоем эпидермиса, который предохраняет его от повреждения и высыхания. Обычно эпидермис состоит из одного слоя клеток, которые выделяют воскоподобную кутикулу, покрывающую поверхность листа и защищающую его от испарения воды. Ниже располагается слой столбчатой паренхимы, образованный клетками призматической формы – основными фотосинтезирующими клетками листа, которые содержат много хлоропластов. Еще ниже находится губчатая паренхима, состоящая из неплотно прилегающих друг к другу клеток неправильной формы с небольшим количеством хлоропластов и из сосудистой системы в виде проводящих пучков (жилок).

Взаимодействия между падающим излучением и растениями чрезвычайно сложны из-за разнообразия размеров, формы, состава и расположения клеток, листьев, стеблей и самих растений в экосистемах. Однако почти все эти взаимодействия можно сгруппировать в три вида: поглощение, отражение и пропускание излучения.

В настоящее время предложен ряд моделей для описания оптических свойств листьев растений (оптических моделей) [17, 18]. Но ни одна из них не является совершенной, особенно для описания взаимодействия растений с поляризованным излучением.

Поглощение света растениями связано с его взаимодействием с пигментами, водой и другими биологическими компонентами, содержащимися в клетках растений. Эффективность и особенности поглощения света обусловлены изменениями электронных энергетических состояний либо изменениями колебательных или вращательных характеристик молекул, определяемых составом и топологическими особенностями их строения [19, 20].

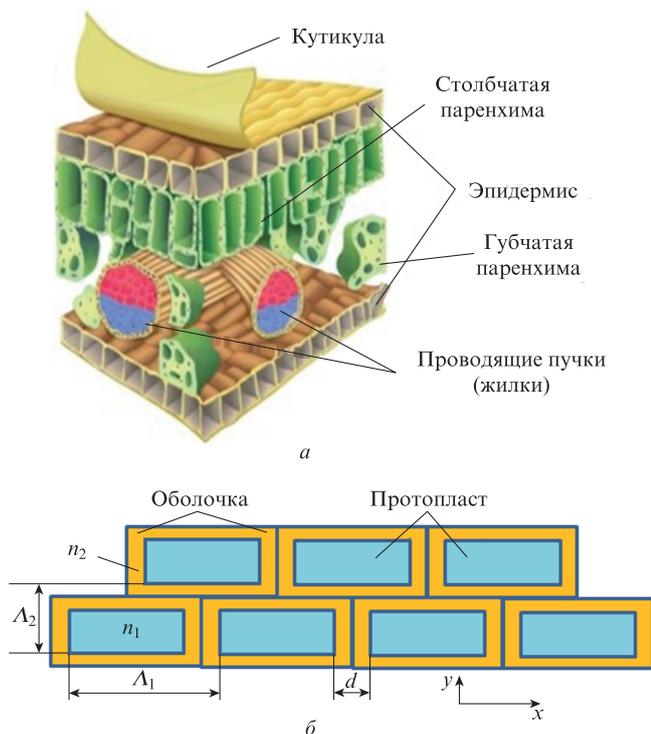


Рис.1. Строение листа растения (*a*) и оптическая модель многоклеточного эпидермиса листьев растений (вид сверху) (*b*).

Свет, падающий на лист растения, прежде всего, взаимодействует с границами раздела воздух–кутикула–эпидермис. Отраженный от поверхности листа свет обычно незначительно изменяется по спектральному составу. Кроме того, отраженный свет поляризован, что используется при дистанционном зондировании для получения информации о тонких особенностях поверхности листьев и видовом составе сообществ в посевах растений [21]. При отсутствии заметных количеств воска на поверхности листа определяющую роль в отражении света играет слой эпидермиса, который, вследствие особенностей строения его клеток, способен оказывать влияние на проходящее внутрь листа излучение.

В работе [22] была исследована поляризация солнечного излучения, отраженного от поверхностей цветков и листьев растения *Campsis radicans* под превышающими 45° относительно нормали углами. Было показано, что отражательная способность листьев наиболее высока в синем и зеленом диапазонах спектра. В зависимости от ориентации листа *Campsis radicans* отражали частично поляризованный свет со степенью поляризации Δ от 10% до 80%, причем преобладало излучение s-поляризации.

Вопрос о том, как органы растений достигают своей окончательной формы, является центральным и до сих пор не решенным в биологии [23]. В настоящее время развивается представление о механической обратной связи между полярностью деформации клеток эпидермиса и максимальным растягивающим механическим напряжением в эпидермисе во время роста листьев, когда клетки делятся и реорганизуются. При этом развитие сложной формы клеток эпидермиса обеспечивает эффективную стратегию снижения механического напряжения в его клеточной стенке, которое обуславливается действием давления тургора [24–26]. Как показано в [26], в результате механического растяжения тканевая среда листа растения изменяется, что вызывает ответные изменения полярности деформации клеток, которая и определяет ориентацию клеточного и тканевого роста. При этом центральная часть клеток эпидермиса листьев имеет преимущественно сонаправленную директорию полярности деформации клеток, поворачивающуюся по мере приближения к краям листа [26]. Таким образом, следствием направленной деформации клеток эпидермиса, обусловленной их механическим растяжением в процессе роста, является различие оптических характеристик листа растения в продольном и поперечном направлениях.

Все вышесказанное позволило нам предложить оптическую модель для слоя эпидермиса листьев растений (рис.1,*b*). Данная модель учитывает сонаправленность ориентации клеток эпидермиса и анизотропию растяжения клеток, вследствие чего их размер в продольном направлении (вдоль оси x) L_1 превышает размер в поперечном направлении (вдоль оси y) L_2 . Толщина оболочки клетки равна $d/2$. Как отмечалось выше, показатель преломления внутреннего содержимого клетки (цитозоля) n_1 зависит от состава ее протопласта и может изменяться от 1.34 до 1.42, а показатель преломления оболочки клетки n_2 , который зависит от вида и возраста клетки, может изменяться в пределах 1.40–1.50. Анизотропия растяжения клеток эпидермиса обуславливает анизотропию ее показателя преломления и всего слоя эпидермиса листа растения. Согласно предложенной модели и работам [27, 28] значения показателей преломления клеток эпидермиса для

излучения, поляризованного вдоль осей x и y , могут быть определены как

$$n_x = \left[n_1^2 + (n_2^2 - n_1^2) \frac{d}{\Lambda_1} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

$$n_y = \left[n_1^2 + (n_2^2 - n_1^2) \frac{d}{\Lambda_2} \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Размер клеток эпидермиса листьев растений может изменяться в пределах 10–300 мкм, анизотропия деформации клеток способна достигать 10%–30%, а толщина оболочка клеток (в зависимости от вида растения и его возраста) составлять от 5% до 30% продольного размера клеток. В результате, с учетом диапазона изменений показателей преломления n_1 и n_2 , используя выражения (1) и (2), можно показать, что анизотропия показателя преломления слоя эпидермиса клеточного листа $\delta n = n_y - n_x$ находится в диапазоне 0.002–0.07. Таким образом, эпидермальный слой листа растения обладает естественной оптической анизотропией, которая может меняться в процессе развития растения вследствие происходящих изменений оптических и геометрических параметров его клеток. Именно это, по-видимому, определяет особенности взаимодействия поляризованного лазерного излучения с растениями, у которых для таких важнейших групп биомолекул, как белки, ДНК, РНК, ферменты, антитела, гормоны и т. д., характерна оптическая изомерия. В базовом метаболизме абсолютно всех живых существ задействован всегда только один из двух возможных оптических изомеров [29].

Вследствие этого конформация органических биомолекул играет исключительно важную роль во многих биохимических процессах, и потому способность слоя эпидермиса вращать плоскость поляризации проходящего через него лазерного излучения позволяет сделать процесс взаимодействия лазерного излучения с клетками растений более эффективным.

Используя [30] и (1), (2) можно получить выражения для коэффициентов отражения световых волн, поляризованных в плоскости падения и перпендикулярно к ней:

$$R_{\parallel} = \left| \frac{n_0 \sqrt{n_x^2 - (n_0 \sin \theta_i)^2} - n_x^2 \cos \theta_i}{n_0 \sqrt{n_x^2 - (n_0 \sin \theta_i)^2} + n_x^2 \cos \theta_i} \right|^2, \quad (3)$$

$$R_{\perp} = \left| \frac{n_0 \cos \theta_i - \sqrt{n_y^2 - (n_0 \sin \theta_i)^2}}{n_0 \cos \theta_i + \sqrt{n_y^2 - (n_0 \sin \theta_i)^2}} \right|^2, \quad (4)$$

где n_0 – показатель преломления окружающей листья среды, а θ_i – угол падения света на поверхность листа по отношению к нормали (рис.2).

На рис.3 приведены рассчитанные с использованием (3), (4) зависимости коэффициентов отражения световых волн, поляризованных вдоль осей x и y , от угла падения на поверхность для $n_0 = 1.0$ и усредненных параметров клеток листьев растений: $n_1 = 1.34$, $n_2 = 1.46$, $\Lambda_1 = 50$ мкм, $\Lambda_2 = 45$ мкм и $d/2 = 5$ мкм. На вставке к рис.3 приведена фотография, иллюстрирующая зависимость эффективности отражения солнечного излучения листьями растения *Hedera helix* от их ориентации по отношению к поверхности Земли и наблюдателю.

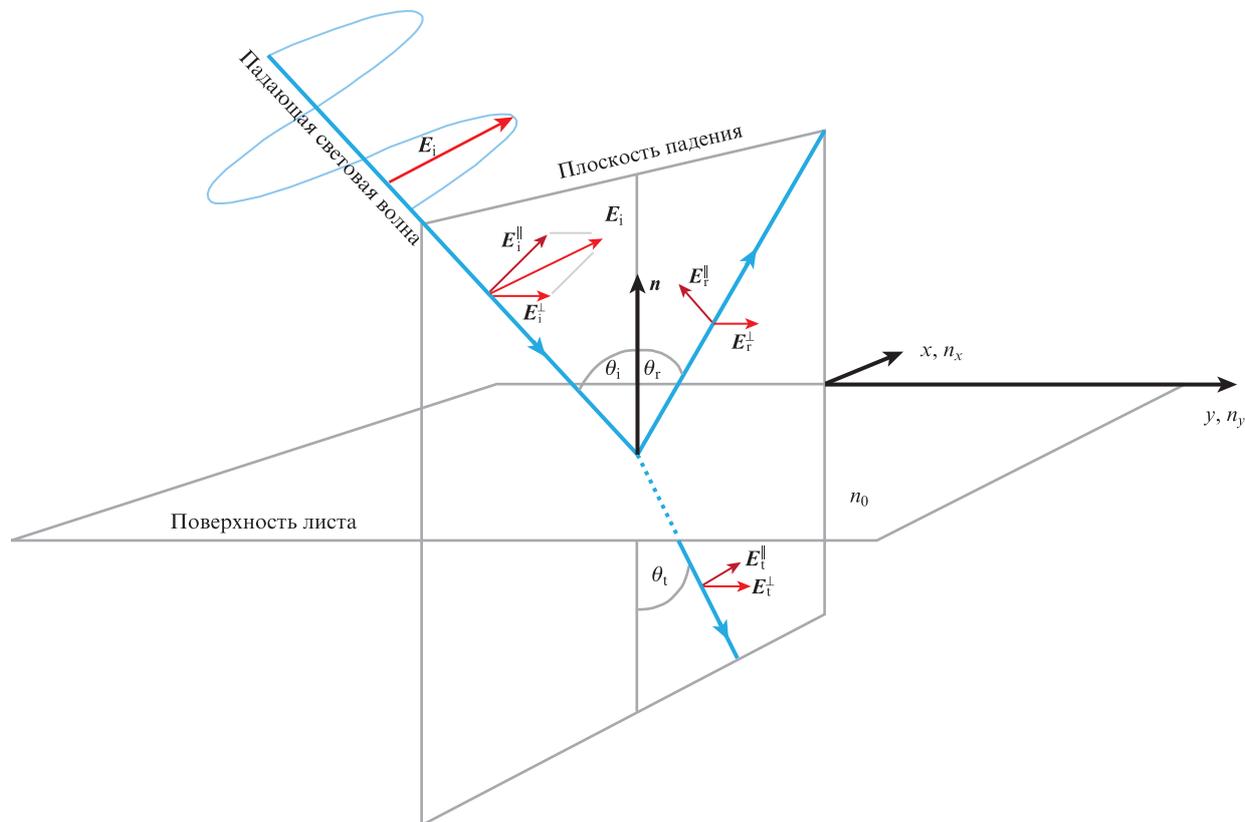


Рис.2. Схема падения световой волны на поверхность листа: n – вектор в направлении нормали к поверхности листа; E_i , E_r , E_t – напряженности электрических полей падающей, отраженной и прошедшей волн соответственно; θ_i , θ_r , θ_t – углы между направлениями распространения соответствующих волн и нормалью; x , y – оси координат, совпадающие с осями анизотропии показателей преломления n_x , n_y ; n_0 – показатель преломления окружающей среды.

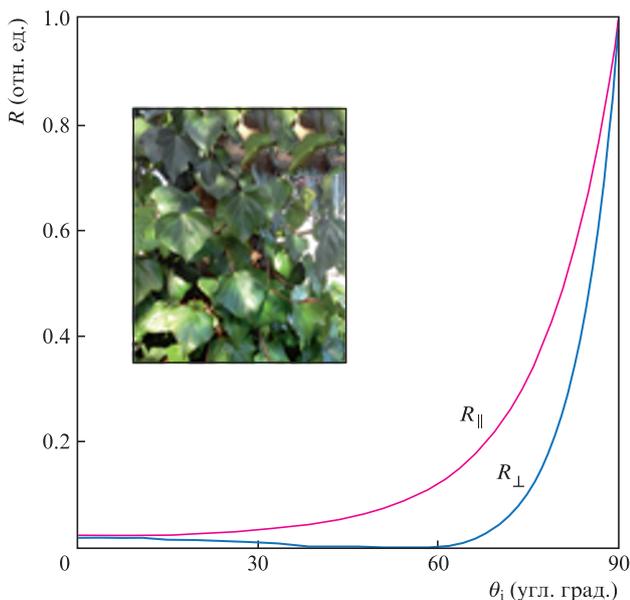


Рис.3. Расчетные угловые зависимости коэффициентов отражения световых волн R_{\parallel} и R_{\perp} , поляризованных в плоскости падения и перпендикулярно к ней соответственно. На вставке: фотография растения *Hedera helix*, иллюстрирующая зависимость эффективности отражения солнечного излучения листьями от их ориентации по отношению к поверхности Земли.

Как следует из рис.3, с учетом директории анизотропии клеток эпидермиса [24–26], листья растений должны демонстрировать анизотропию при отражении s- и p-поляризованного света. Используя вышеприведенные физические параметры клеток эпидермиса и выражения (3), (4), в предположении, что $n_0 \approx 1$, можно показать, что в солнечном излучении, отраженном в диапазоне углов 40° – 60° от горизонтально ориентированной поверхности слоя эпидермиса, будет преобладать излучение s-поляризации, а максимальное значение степени поляризации излучения превысит 70%. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными о поляризации солнечного излучения, отраженного от поверхности листьев растения *Campsis radicans* [20], а также с данными из обзорной статьи [31], в которой представлены результаты по измерению оптических характеристик 30 типов растений.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследование взаимодействия поляризованного лазерного излучения с эпидермисом листьев растений проводилось с использованием установки, оптическая схема которой показана на рис.4. Излучение He–Ne-лазера 1 с длиной волны 632.8 нм коллимировалось системой линз

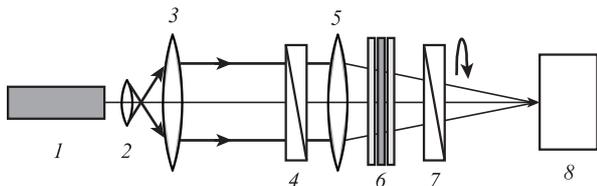


Рис.4. Оптическая схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2, 3 – коллимирующие линзы; 4 – поляризационный светофильтр; 5 – фурие-объектив; 6 – исследуемый образец; 7 – анализатор; 8 – ПЗС-камера/поляриметр.

2, 3 до диаметра пучка 5 мм и фурие-объективом 5 с фокусным расстоянием $F = 50$ мм собиралось на матрице ПЗС-камеры (Nikon D7100, Япония) 8. Препарат с исследуемым образцом 6 помещался за выходной плоскостью фурие-объектива. Поляризатор 4 использовался для контроля мощности поляризованного лазерного излучения, а анализатор 7 – для анализа оптической активности образцов эпидермиса.

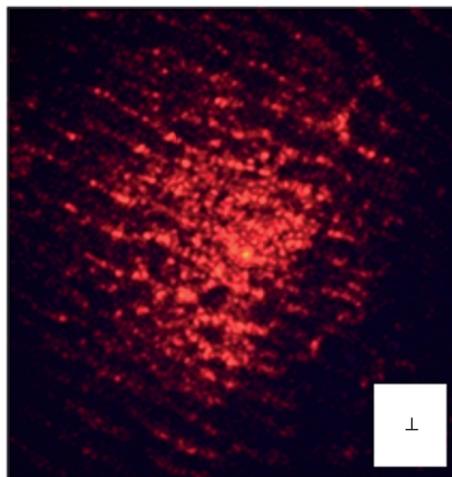
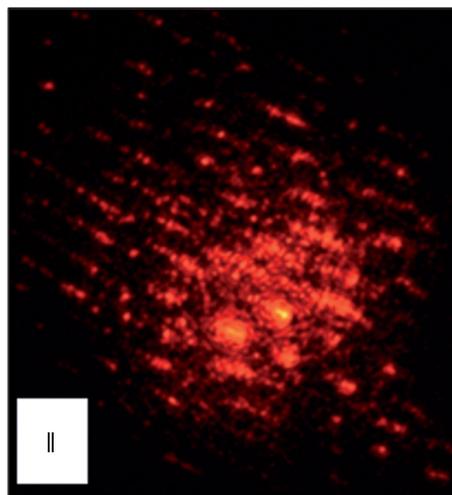
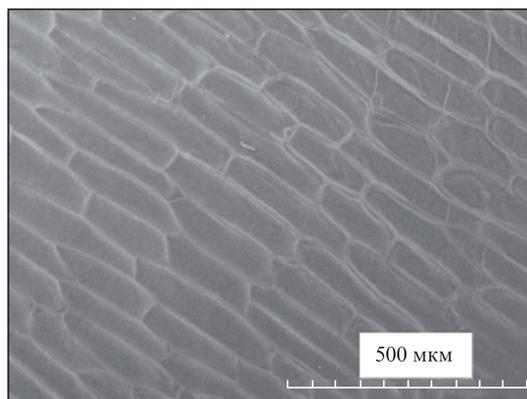


Рис.5. Полученная с помощью электронного микроскопа фотография эпидермального слоя кожицы лука (a), а также фурие-спектры поляризованного лазерного излучения после прохождения через эпидермальный слой кожицы лука при сонаправленной с поляризацией лазерного излучения (b) и ортогональной ей (c) ориентациях анализатора.

На практике чрезвычайно трудно отделить слой эпидермиса от нижележащих клеток листа без его механического повреждения, вследствие чего возникла потребность в поиске удобной модели, которая позволяет измерять степень анизотропии оптических свойств эпидермиса. В связи с этим для исследований оптических свойств эпидермиса листьев растений в качестве модели был выбран адаксиальный эпидермис чешуи лукавицы лука. Эпидермис лука состоит из одного слоя тонкостенных клеток эпидермиса, которые слабо прикреплены к нижележащей паренхиме. Это позволяет легко изолировать слой эпидермиса без повреждения его клеток и без возникновения дополнительных механических напряжений. Для исследований сегмент эпидермальной полоски лука размером 10×10 мм помещался между двумя покровными стеклами толщиной 2 мм.

На рис.5 приведена фотография адаксиального эпидермиса чешуи лукавицы лука, полученная с использованием электронного микроскопа (Hitachi TM1000, Япония). Хорошо видны клетки эпидермального слоя, средние размеры которых в продольном направлении $100\text{--}350$ мкм, в поперечном направлении ~ 60 мкм, а средняя толщина стенок клеток ~ 6 мкм, что подтверждается данными [32]. Средняя толщина слоя эпидермиса, измеренная с использованием эллипсометра (Эллипс-1891 САГ, Россия), равнялась 15 мкм. Наблюдаемый регулярный порядок укладки клеток в слое эпидермиса чешуи лука с различающимися показателями преломления во взаимно перпендикулярных направлениях обуславливает наличие периодических дифракционных рефлексов в распределении интенсивности в фокальной плоскости фурье-объектива (рис.5,б,в), что соответствует принятой нами оптической модели эпидермального слоя листьев растений. В экспериментах не наблюдалось полного ослабления интенсивности фурье-спектра образца эпидермального слоя при изменении ориентации анализатора от сонаправленной с поляризацией лазерного излучения на ортогональное ей (рис.5,б,в), что также подтверждает наличие оптической анизотропии эпидермального слоя.

Для определения оптической активности эпидермального слоя кожицы лука исследовалась величина угла эллиптичности η поляризации лазерного излучения, прошедшего через образец, в зависимости от угла поворота ϕ оси x . Измерения проводились с использованием поляриметра (РАХ5710Thorlabs, США), который устанавливался вместо ПЗС-камеры (см. рис.4). Результаты измерений, выполненных для случаев прохождения линейно поляризованного лазерного излучения через систему покровных стекол при наличии и в отсутствие эпидермальной пленки между ними, приведены на рис.6.

Как следует из рис.6, при прохождении лазерного излучения через систему покровных стекол состояние его поляризации не изменяется. При помещении между покровными стеклами образца эпидермальной пленки чешуи лука наблюдается вращение плоскости поляризации излучения, величина которого зависит от ориентации образца. Прошедшее излучение остается линейно поляризованным, когда при поворотах образца плоскость поляризации лазерного излучения совпадает с осью x или y . В остальных случаях прошедшее излучение оказывается эллиптически поляризованным. Результаты поляриметрических измерений показали, что средняя величина анизотропии показателя преломления Δn для эпидермальной пленки чешуи лука составляет ~ 0.0002 , т.е. для клеток

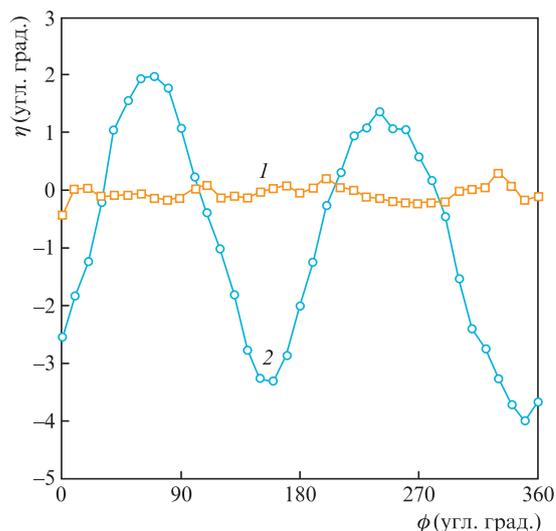


Рис.6. Углы эллиптичности η поляризации прошедшего через образец линейно поляризованного лазерного излучения в зависимости от угла ϕ поворота оси x в отсутствие (1) и при наличии (2) эпидермальной пленки чешуи лука между покровными стеклами.

эпидермиса пленки чешуи лука различие в показателях преломления между материалами клеточной стенки и ее протопласта незначительны. Как правило, приводимые в публикациях данные для значений показателей преломления входящих в состав клеток растений элементов имеют достаточно большой разброс [8–15]. Учитывая, что материал стенок клеток эпидермиса лука состоит главным образом из встроенных в полисахаридный матрикс микрофибрилл целлюлозы, а протопласт его клеток представлен в основном цитоплазмой и органеллами, согласно [11], можно считать, что для клеток эпидермиса чешуи лука $n_1 = 1.39$ и $n_2 = 1.4$. С учетом наблюдающейся на практике вариации продольных размеров клеток эпидермиса чешуи лука и выражений (1) и (2), получаем, что расчетные значения анизотропии показателя преломления могут находиться в пределах $0.0008\text{--}0.0016$, и это достаточно близко к экспериментально полученному значению.

4. Заключение

Результаты проведенных исследований подтверждают сделанное нами предположение о том, что многоклеточный эпидермис листьев растений обладает оптической анизотропией, которая обусловлена анизотропией растяжения клеток эпидермиса, возникающей в процессе роста листа. Предложенная оптическая модель для слоя эпидермиса листьев позволяет установить характер взаимодействия поляризованного лазерного излучения с растением. Согласно данной модели поляризованное лазерное излучение изменяет состояние поляризации при отражении и прохождении через эпидермальный слой листа. Как показывают результаты экспериментальных исследований, выполненных на модельных образцах эпидермальных слоев чешуи лука, изменение поляризации света оказывается достаточно значительным. Это позволяет предположить, что наличие оптической анизотропии эпидермальных слоев листьев растений служит важным фактором, объясняющим наблюдающиеся на практике особенности воздействия поляризованного лазерного излучения на развитие растений, что связано с взаимодей-

ствием лазерного излучения с содержащимися в клетках листьев растений биомолекулами, белками и ферментами, для которых характерна изомерия физических и химических свойств.

1. Macht D.I. *J. Gen. Physiol.*, **10**, 41 (1926).
2. Shibayev P., Pergolizzi R. *Int. J. Botany*, **7**, 113 (2011).
3. Васильев А.Е., Воронин Н.С. и др. *Ботаника. Анатомия и морфология растений* (М.: Просвещение, 1988).
4. Ченцов Ю.С. *Введение в клеточную биологию* (М.: ИКЦ «Академкнига», 2004).
5. Воротников В.П., Чкалов А.В. *Особенности растительной клетки: Учебно-методическое пособие* (Н. Новгород, Нижегородский госуниверситет, 2010).
6. Moghaddam P.R., Wilman D. *J. Agricultural Science*, **131**, 59 (1998).
7. Alberts B., Johnson A., Lewis J., Raff M., Robert K., Walter P. *Molecular biology of the cell* (New York: Garland Science, 2002).
8. Shackelford J.F. *Introduction to Materials Science for Engineers* (New York: McGraw-Hill, 2000).
9. Landry V., Alemdar A., Blanchet P. *Forest Products J.*, **6** (2), 104 (2011).
10. Lehmuskero A., Chauton M.S., Boström T. *Progress in Oceanography*, **168**, 43 (2018).
11. Tamada Y., Murata T., Hattori M., Oya S., Hayano Y., Kamei Y., Hasebe M. *Int. J. Optomechatronics*, **8**, 89 (2014).
12. Атабекова А.И., Устинова Е.И. *Цитология растений* (М.: Агропромиздат, 1987).
13. Hassani H., Kreysing E. *Opt. Lett.*, **44** (6), 1359 (2019).
14. Liu P.Y., Chin L.K., Ser W., Chen H.F., Hsieh C.-M., Lee C.-H., Sung K.-B., Ayi T.C., Yap P.H., Liedberg B., Wang K., Bourouinaj T., Leprince-Wang Y.J. *Lab Chip*, **16**, 634 (2016).
15. Choi W., Fang-Yen C., Badizadegan K., Oh S., Lue N., Dasari R.R., Feld M.S. *Nat. Methods*, **4**, 717 (2007).
16. Лотова Л.И. *Ботаника: Морфология и анатомия высших растений* (М: Комкнига, 2007).
17. Kumar R., Silva L. *Reflectance Model of a Plant Leaf* (West Lafayette, Purdue University, 1973, LARS Technical Reports, paper 17).
18. Jaquemoud S., Ustin S. *Proc. 8th Int. Symp. Phys. Measurements & Signatures in Remote Sensing* (Aussois (France), 2001, CNES, p. 223).
19. Carter G.A., Knapp A.K. *Amer. J. Botany*, **88** (4), 677 (2001).
20. Сидорова А.Э., Малышко Е.В., Котов А.Р., Левашова Н.Т., Устинин М.Н., Твердислов В.А. *Изв. РАН. Сер. Физич.*, **83** (1), 100 (2019) [*Bull. RAS: Phys.*, **83**, 91 (2019)].
21. Vogelmann T.C. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, **44**, 231 (1993).
22. Horváth G., Gál J., Labhart T., Wehner R. *J. Experimental Biology*, **205**, 3281 (2002).
23. Baluska F., Wojtaszek P., Volkmann D., Barlow P. *Bio Essays*, **25**, 569 (2003).
24. Abley K., Barbier de Reuille P., Strutt D., Bangham A., Prusinkiewicz P., Marée A.F.M., Grieneisen V.A., Coen E. *Development*, **140**, 2061 (2013).
25. Hervieux N., Dumond M., Sapala A., Routier-Kierzkowska A.-L., Kierzkowski D., Roeder A.H.K., Smith R.S., Boudaoud A., Namant O.A. *Current Biology*, **26**, 1019 (2016).
26. Bringmann M., Bergmann D.C. *Current Biology*, **27**, 877 (2017).
27. Рыгов С.М. *ЖЭТФ*, **29** (5), 605 (1955).
28. Tuchin V.V. *J. Biomed. Opt.*, **21** (7), 071114 (2016).
29. Смирнова И.Г., Гильдеева Г.Н., Кукес В.Г. *Вестник МГУ. Сер. Химия*, **53** (3), 147 (2012) [*Moscow University Chem. Bull.*, **53** (3), 147 (2012)].
30. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1970).
31. Gausman H.W., Allen W.A. *Plant Physiol.*, **52**, 57 (1973).
32. Slikboer E., Ana Sobota A., Garcia Caurel E., Guaitella O. *Sci. Rep.*, **10**, 1358 (2020).