

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИСТЬЕВ РАСТЕНИЙ В БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ИЗЛУЧЕНИИ В СВЯЗИ С ИХ ВОДНЫМ РЕЖИМОМ

*О. А. ИЛЬНИЦКИЙ, доктор биологических наук,
С.С. РАДЧЕНКО, доктор биологических наук, И.С. ЛИСКЕР, доктор биологических наук,
И.Н. ПАЛИЙ, Н.С. РАДЧЕНКО*

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр

Исследования оптических свойств листьев растений в видимой части спектра связаны с состоянием пигментной системы и структуры листьев [1,2,5,10,11]. Исследования водного статуса растений проводились, в основном, в диапазоне длин волн более 1000 нм. Для определения водного стресса растений путем анализа измерений отражения на нескольких ключевых длинах волн, называемых «полосами воды» использовались интерференционные и лазерные спектрометры. Наиболее известными «полосами» воды, являются 1400 и 1900 нм. Показано, что отражение на этих длинах волн соответствует содержанию воды в тканях растений [8,9]. Однако, эти спектрометры довольно дороги. К тому же, трудно измерить водный стресс на этих длинах волн дистанционно из-за высокого уровня поглощения парами воды земной атмосферы.

Сегодня существуют несколько недорогих спектрометров на кремниевых диодах, пригодных для точных измерений длин волн до 1000 нм, в том числе и для дистанционных измерений. Полоса 970 нм исторически считалась слишком маленькой для точного измерения водного стресса, однако было показано, что она может быть использована для индикации водного стресса сомкнутых посевов, где индекс листовой поверхности не слишком варьирует [9]. Даллон, используя современный относительно недорогой спектрометр на кремниевых диодах, провел экспериментальное сравнение тестов на оводненность листьев в полосах 970 и 1400 нм. Показана высокая корреляция ($r^2 = 0.97$) между результатами в этих полосах, хотя диапазон изменений отраженной радиации на длине волны 970 нм в 30 раз меньше, чем на длине волны 1450 нм. Результаты были получены на листьях, подвергнутых быстрому и сильному обезвоживанию после их отсечения от растения. На интактных листьях подобные исследования не проводились.

Целью наших исследований являлось изучение оптических свойств листьев растений. Данная работа посвящена исследованию поглощения листьями растений ближнего инфракрасного (БИК) излучения, методике измерения и вычисления коэффициента поглощения в так называемой «водной полосе» 970 нм.

Проведены исследования поглощения ближней инфракрасной радиации (в диапазоне 970 нм) интактных органов растений ряда декоративных растений и плодовых культур на фоне изменяющегося водного режима. Инструментом исследования служил переносной лазерный фотометр «Перфот-93» и микрометр. Установлена линейная зависимость поглощения и высокая корреляция (0,97) оптических параметров листьев с толщиной (оводненностью) интактных листовых пластинок. Поглощение излучения в полосе 970 нм зависит не только от содержания воды в листе, но и от особенностей структуры тканей листа.

Во взаимодействии листьев растений с оптическим излучением существуют аспекты, которые были в свое время отмечены в научной литературе, но фактически остались неисследованными и мало обсуждаемыми. Это проблема применимости законов классической оптики к распространению излучения в тканях листьев и особенностям взаимодействия со светом верхней и нижней поверхностей листьев. В данной работе, экспериментальная часть которой содержит исследования только в БИК-диапазоне, обсуждаются оптические свойства листьев не только в этом диапазоне, но и в видимой части спектра излучения.

Методика

Основным инструментом исследования послужил полупроводниковый лазерный прибор «Перфот-93». Полоса его излучения имеет максимум на длине волны 935 нм, находящийся в полосе резонансного поглощения воды в области 900-1000 нм [4]. «Перфот-93» позволяет одновременно регистрировать значения интегральных коэффициентов отражения, поглощения и прохождения излучения и использовался для дискретных измерений. Изменения оптических характеристик листьев сопоставлялись с состоянием водного режима интактных растений — нарастанием водного дефицита, реакцией на полив. Для быстрого обезвоживания листьев их срезали с растения. Толщина листьев во всех опытах использовалась в качестве характеристики их оводненности. Измерения толщины листьев в описываемой серии экспериментов выполнены с помощью специально приспособленного циферблатного микрометра (цена деления 10 мкм).

Результаты и обсуждение

Толщина листа и поглощение лучистой энергии

В видимой области спектра измерения поглощения обычно проводятся с целью найти корреляцию поглощения с содержанием пигментов в листьях, в БИК-области — в связи с водным режимом растений [1- 3,6,7]. Поэтому, если в роли поглощающей субстанции или «растворенного вещества» в видимой области спектра выступают пигменты, то в БИК-области таковой является вода. На практике процедура измерения оптических параметров листа состоит в регистрации падающей, отраженной и проходящей радиации, а коэффициент поглощения традиционно вычисляется по формуле:

$$A = 100 - (T + R), \quad (1)$$

где A — поглощение (коэффициент поглощения, %);

T — прохождение, %;

R — отражение, %.

В фотометре «Перфот-93» производится измерение падающего, отраженного и прошедшего излучения, а поглощение вычисляется автоматически по формуле (1).

Наряду с отмеченным, существует еще одна особенность оптических свойств листьев. Леман [3] отмечает, что в видимой части спектра поглощение зависит от того, падает ли излучение на верхнюю (адаксиальную) или на нижнюю (абаксиальную) поверхность листа. Если излучение падает на верхнюю поверхность, то поглощение его будет в среднем на 10% больше, чем при падении на нижнюю поверхность. Объясняется это, прежде всего, тем, что у большинства растений нижняя сторона листа значительно светлее верхней. Благодаря этому отражение лучистой энергии на 10-12% больше. Прохождение излучения также зависит от особенностей анатомии листа, от того, в какие ткани сначала попадает лучистая энергия. Если лист освещается сверху, на пути лучистой энергии сначала встретится столбчатая паренхима, а затем губчатая, и количество прошедшей энергии будет на 2-3% меньше, чем при освещении нижней поверхности листа.

Формула (1) не вполне подходит для исследования связи между поглощением и структурой листа, поскольку результат оценки поглощения зависит от отражения. Способ определения поглощения излучения некими средами перенесен в область ботаники и физиологии растений из области физики, как уже было отмечено. Вероятно, при изучении оптических свойств косных объектов не возникала проблема различий отражательных способностей верхней и нижней поверхностей, хотя это и не очевидно. В физиологических исследованиях характеристику поглощения чаще всего связывают с содержанием какого-то компонента листа. Если в силу каких-то причин отражение R увеличилось, то это означает уменьшение доли $A+T$, а это может подвести к ложному выводу о том, что поглощение снизилось из-за неких изменений свойств внутренних тканей листа, хотя таковых не было, и их поглотительные свойства остались без изменений. Поскольку основной характеристикой

листьев, исследуемой в ИК-диапазоне, является их оводненность, поглощение излучения листом должно определяться толщиной листа, его структурой и его влажностью, но не его отражательной способностью. Эти же рассуждения относятся и к видимой части спектра при обсуждении связи поглощения излучения с содержанием пигментов. Поэтому логично было бы при анализе поглотительных свойств среды исключить влияние величины отражения на оценку поглощения и прохождения лучистой энергии.

Мы провели измерение оптических параметров 58 образцов интактных листьев различных видов растений, включая декоративные растения, из них эфиромасличных – 4 (*Nepeta cataria L.*, *Lophanthus anisatus Benth* и др, цветочных – 3, кустарниковых – 5, декоративных травянистых – 1, плодовых – 23, декоративных деревьев – 18, суккулентов – 4. Толщина листовой пластины этих видов находилась в диапазоне от 125 мкм до 1600 мкм. Наблюдается линейная зависимость оптических свойств от оводненности листа в диапазоне изменения последней от 100 до 65%, или при уменьшении толщины листа в диапазоне 0-35% от максимальной толщины (рис.1).

Для того, чтобы исключить влияние различий в отражательных свойствах верхней и нижней поверхностей листа, строим график зависимостей, вычисленных по формуле

$$A' = \frac{A}{A+T}, \quad (2)$$

т.е. вычисляем поглощение не как составляющую падающего излучения, а как часть излучения, которое проникло в лист. Поскольку пока нет канонизированного термина для обозначения этой части излучения, можно условно назвать ее «проникшей» в лист.

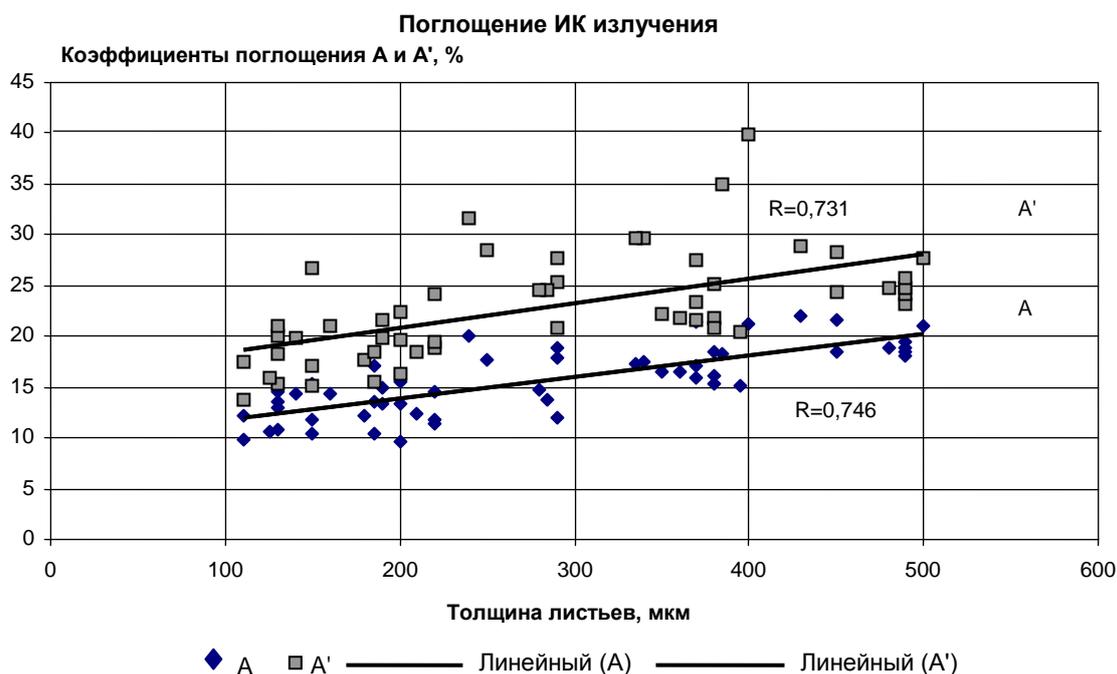


Рис.1. Зависимость поглощения БИК-излучения от толщины листьев.
A — коэффициент поглощения; A' = A / (A+T);

Не канонизированный термин «удельное поглощение» есть частное от деления среднего значения поглощения на среднее значение толщины листа и характеризует наклон соответствующих линий трендов A и A' на рис.2. Эта зависимость имеет простой вид:

$$A = C + Kd, \quad (3)$$

где C - постоянная, d - толщина листа, K = A/d — удельное поглощение и по существу – показатель экстинкции для линейной зависимости поглощения БИК-излучения от толщины

листьев растений с размерностью $\% / \text{мкм}$.

Как известно, термин экстинкция означает ослабление пучка света при его распространении в веществе как результат комбинированного действия поглощения и рассеяния света.

Нужно отметить такой важный момент: при воздействии на листья излучением в БИК – диапазоне их нижняя поверхность отражает меньше, чем верхняя. В то же время, при облучении листьев видимой областью спектра наблюдается обратная картина – нижняя поверхность отражает больше, чем верхняя. Соответственно, при вычислении поглощения БИК-излучения по формуле (1) значения поглощения нижней стороной листьев выше, чем верхней. Следует заметить, что абсолютные значения средних уровней оптических характеристик листьев и их разностей могут сильно варьировать в зависимости от типа измерительной аппаратуры, поскольку аппаратура использует излучатели различных типов и обладает различными полосами пропускания. Однако на знак разности это не влияет, различие действительно существует и, вероятно, имеет некоторый экологический смысл: верхняя поверхность листьев меньше отражает излучение в видимой области спектра, так называемой ФАР, и больше отражает БИК-излучение влияющее на температуру листьев. Ранее в литературе факт различий в поглощении видимой и инфракрасной областей спектра верхней и нижней поверхностями листьев не был отмечен.

Довольно большой разброс точек измерения вокруг линии тренда отчасти можно объяснить спецификой анатомии листа (результаты измерений на жилках и между ними могут существенно различаться), а также различной влажностью листьев.

Водный режим и поглощение БИК-излучения

Помимо утолщения листьев в процессе роста основными причинами изменения их толщины являются изменения оводненности вследствие естественного суточного хода, под влиянием водного дефицита либо полива. Обратимые прижизненные изменения толщины листовых пластинок могут достигать трети или даже половины максимальной величины [5]. Это, естественно, должно сказываться на величине поглощения БИК- излучения. Рассмотрим вначале изменение всех оптических характеристик листьев персика сорта Спринголд (рис.2).

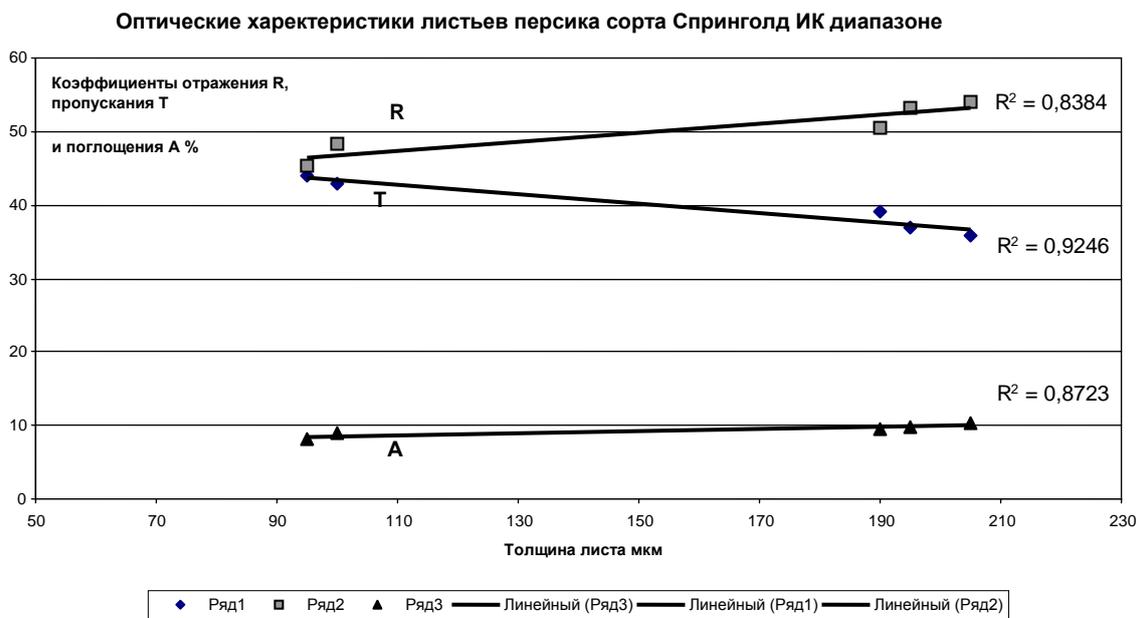


Рис.2. Оптические параметры листа персика сорта Спринголд при различной оводненности.

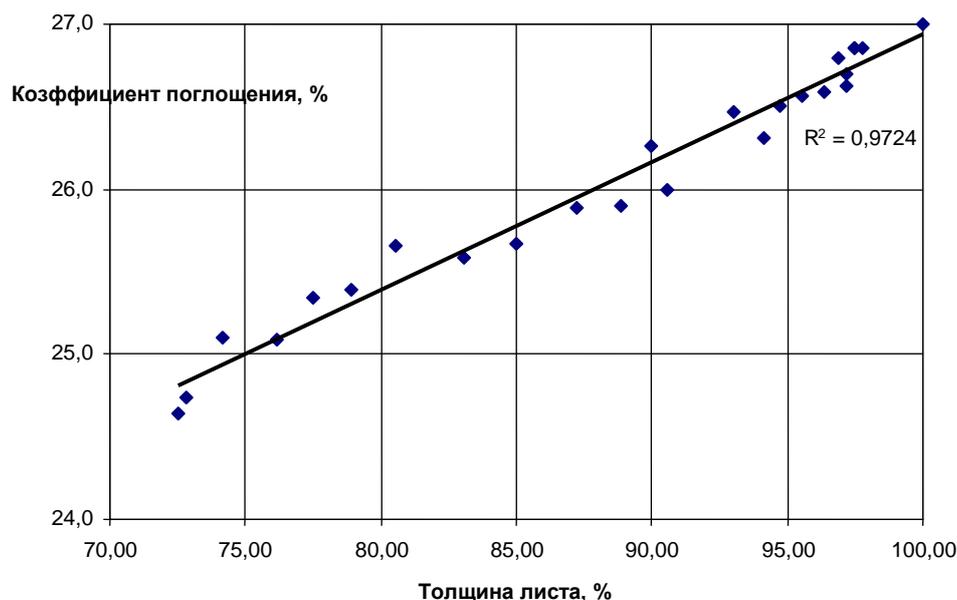


Рис.3. Поглощение БИК-излучения листом ириса при различной оводненности.

Характеристика поглощения БИК-излучения листом бегонии также имеет линейный характер (рис.4).

Характеристики построены в соответствии с традиционной формулой (1).

В результате, при увеличении оводненности прохождение либо практически не снижается, либо даже повышается. Таким образом, само явление экстинкции или ослабления света при прохождении им листа, как бы отсутствует. В такой ситуации применимость закона Бугера-Ламберта-Бэра-Вавилова (1) более чем проблематична. Точнее, закон неприменим. Это еще один аргумент в пользу нашей версии не учитывать отраженное излучение при рассмотрении распространения БИК-излучения в тканях листьев. Поэтому в дальнейшем будут фигурировать экспериментальные данные, вычисленные по формуле (2), т.е. как часть «проникшего» излучения. Зависимость изменения поглощения БИК-излучения листом томата в результате его утолщения после полива растения имеет линейный характер с высоким коэффициентом корреляции (рис.3).

Итак, обе эти характеристики имеют вид линейного уравнения:

$A' = Kd + C$ (3), где d – толщина листа, K и C – константы. В численном виде уравнения представлены на графиках. Коэффициент K по существу является некой «внесистемной» характеристикой экстинкции для листьев данных культур с размерностью [% поглощения на % изменения толщины листа]. Еще один вид этой характеристики, характеризующий чувствительность изменения поглощения к изменению содержания воды (толщины) в листьях культуры – это удельное поглощение с размерностью [% поглощения / мкм толщины листа].

Удельное поглощение = $\Delta A' / \Delta d$.

Значения удельного поглощения БИК-излучения листьями ириса и бегонии различаются существенно, и эти различия нельзя объяснить различиями толщины и относительной влажностью листьев. Остается объяснить это некими различиями структуры листьев. Вероятно, именно в структурных особенностях листьев различных культур состоит причина большого разброса экспериментальных точек рис.1. Этот вопрос ждет своего исследования.

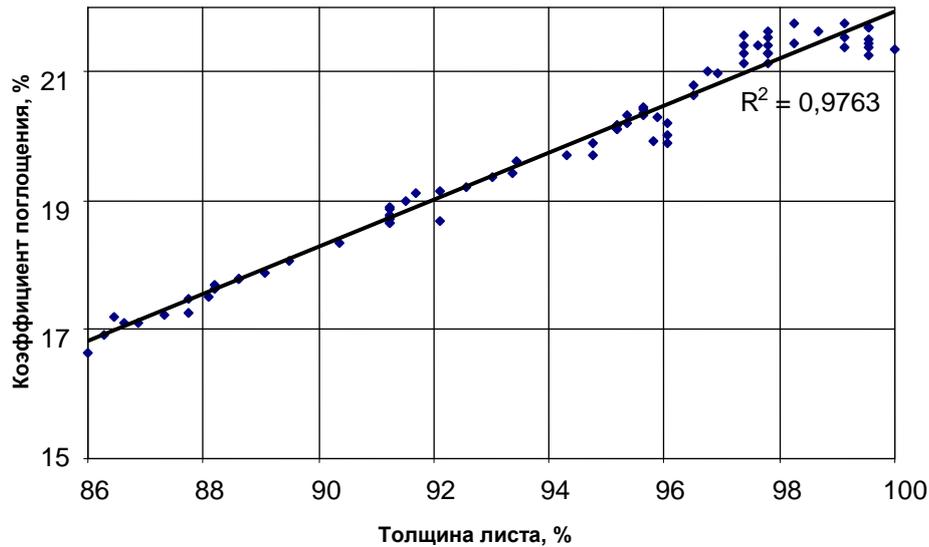


Рис. 4. Поглощение БИК излучения листом бегонии при различной оводненности.

Выводы

- Существует градуальная зависимость поглощения БИК — излучения от толщины листа. В диапазоне небольших изменений толщины листа зависимость имеет линейный характер.
- Характеристикой экстинкции при линейной аппроксимации поглощения излучения как функции толщины листа может служить крутизна линии тренда этой функции.
- Поглощение БИК-излучения в полосе 970 нм зависит не только от содержания воды в листе, но и от особенностей структуры тканей листа.

Список литературы

1. Брандт А.В., Тагеева С.В. Оптические параметры растительных организмов. — М.: Наука, 1967. — 301 с.
2. Клешнин А.Ф. Растение и свет. — М.: Изд. АН СССР, 1954. — 456 с.
3. Леман В.М. Курс светокультуры растений. — М.: Высшая школа, 1961. — 206 с.
4. Лискер И.С. Лазерно-оптические методы, устройства и системы автоматизированного исследования растений и семян // Агрофизические методы и приборы, в 3-х т. — Т.3. Растения и среда их обитания. — СПб.: АФИ, 1998. — С. 299-311.
5. Лискер И.С., Радченко С.С. Лазерно-оптические и гидромеханические методы диагностики стрессов в растениях в онтогенезе // Полевые эксперименты — для устойчивого землепользования. Труды 3-го Международного коллоквиума. — Т.1. — СПб., 1999. — С.51-52.
6. Радченко С.С. Иванова В.М., Маричев Г.А., Черняева Е.В. Методика мониторинга толщины листовой пластинки // Методика мониторинга толщины листовой пластинки. — С. 159-166.
7. Шульгин И.А. Растение и солнце. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 251 с.
8. Dallon, D. Measurement of water stress: Comparison of reflectance at 970 and 1450 nm // Utah State University, Crop Phys. Lab. 2005. — P. 1-5.
9. Penuelas, J., Pinol J., Ogaya R., and Filella I. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970) // Int. J. Remote Sens. 1997. V. 18: P. 2869-2875.
10. Penuelas J., Filella, C. Bell, L., Serrano, and R. Save. The reflectance at the 950 – 970 nm region as an indicator of plant water status. Int. J. Remote Sens. 1993. V. 14: 1887-1905.
11. Surin V.G. Precision field spectrometry: possibilities and prospects // Earth Obs. Rem. Sens. 1997. Vol. 14. P. 973-984.