

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОКРОВНЫХ ТКАНЕЙ РАСТЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЯНОГО ОБРАТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2008 И.А. Братченко, В.П. Захаров, Е.В. Тимченко

Самарский государственный аэрокосмический университет

Разработан алгоритм расчета обратного рассеяния оптического излучения растительной тканью с учетом характеристик покровных тканей. В качестве базового метода использован метод Монте–Карло. Статистические испытания были выполнены с помощью программного обеспечения TracePro Expert. Разработанная модель позволяет учитывать как неоднородность в распределении оптических характеристик растительной ткани, описывающую ее внутреннюю структуру, так и влияние структуры и формы поверхности на интегральные и дифференциальные свойства обратно рассеянного оптического излучения при его взаимодействии с листом растения.

Растительная ткань, оптическое излучение, метод Монте-Карло, обратное рассеяние

Исследование оптических параметров растительных тканей является важной задачей для понимания процессов, протекающих в растениях в ходе их жизнедеятельности. Следует также отметить, что изучение этих параметров является основой для интерпретации данных, полученных при помощи дистанционного оптического зондирования, обеспечивающего мониторинг состояния растений.

Изучение оптических свойств листьев и механизмов поглощения ими света позволяет понять общие принципы усвоения солнечной энергии, механизмов фотосинтеза и адапционных процессов в растениях [1]. 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).

Оптические спектры растений, содержащие разное количество основных пигментов, пригодны для регистрации изменений оптического состояния объекта, которое можно определить из измерений интенсивности рассеянного света.

Современная техника позволяет регистрировать спектры отражения растений на значительном расстоянии, включая наблюдения из космоса. Представляются огромные возможности для глобальной оценки фото-

синтетической продуктивности, для слежения за состоянием растительности в процессе развития под влиянием различных внешних факторов. Появилась возможность реализации метода объективного экологического мониторинга с выявлением факторов влияния различных компонент внешней среды.

Правильная интерпретация экспериментальных данных невозможна без учета как собственно оптических параметров растительных сред, так и формы и структуры ее поверхности. Растительная ткань является оптически неоднородной многократно рассеивающей средой, в связи с чем значительную долю в регистрируемую интенсивность обратного рассеяния вносит диффузная составляющая из глубинных слоев исследуемого объекта. В то же время форма и состояние поверхности существенно влияют на диаграмму рассеяния. Аналогичный вклад вносят распределенные микроструктуры (эмиргенцы) на поверхности растения, в общем случае играющие роль поверхностных рассеивателей, что приводит к перераспределению диффузно рассеянного излучения из глубинных слоев растительной ткани.

Форма и количество образований на поверхности листа растения довольно сильно различаются для различных видов растений, что также вносит ощутимый вклад в диаграмму рассеянного излучения.

С учетом плоской геометрии листа растений с малой кривизной поверхности его математическая модель представлена в виде

ряда плоскопараллельных слоев, оптические характеристики каждого из которых соответствуют биологической структуре растения [2]. Это позволяет учесть объемную оптическую неоднородность листа как многократно рассеивающей среды. Поверхностная оптическая неоднородность моделировалась либо тригонометрической функцией (модель «синуса»), либо в виде набора ориентированных поверхностных цилиндров (модель «цилиндров»), размеры и период которых соответствовали характерным размерам и положению эмергенцев на поверхности листа.

В качестве базового метода модели использовался статистический метод Монте-Карло [3]. Статистические испытания проводились в программной среде TracePro Expert [4]. В результате численных экспериментов проведено исследование сходимости

данного метода для предложенной модели растения. На рис. 1 представлен характерный график сходимости численных результатов, полученный при моделировании распространения излучения в эпидермисе зеленого листа растения. Для других растительных сред полученные результаты качественно совпадали с приведенными на рис. 1. Это позволило сформулировать критерий сходимости и обеспечения необходимой точности вычислений: для обеспечения погрешности вычислений менее одного процента требуется, чтобы минимальное количество испытаний превышало значение 10^8 итераций. Но на практике такая точность требуется редко, и вполне удовлетворительные результаты (погрешность не более 3.5%) достигаются уже при 10^7 итераций.

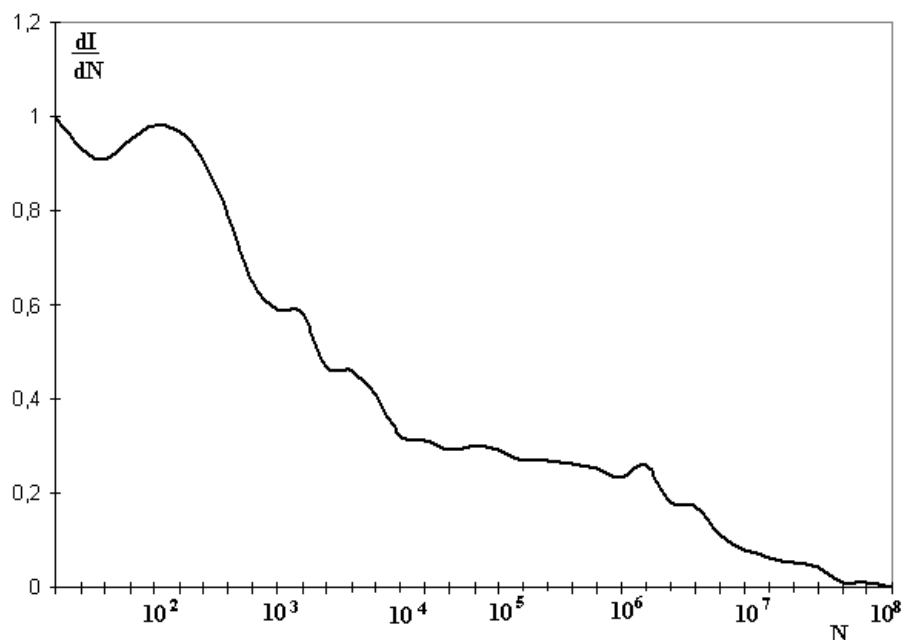


Рис. 1. Сходимость численных экспериментов в зависимости от числа испытаний N

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования спектрального распределения интенсивности обратного рассеяния от листа сенполии, полученные для данных, соответствующих экспериментальным условиям работы [2]: температура окружающей среды 300 К, общая толщина исследуемого объекта 135 мкм, источник излучения находился на расстоянии 4,5 мм под углом 85° к поверхности листа, прием-

ник - на расстоянии 5 мм. Использовалась трехслойная модель листа: центральный слой 105 мкм, соответствующий паренхиме, и боковые слои эпидермиса по 15 мкм. Поверхностные структурные образования не учитывались. Оптические характеристики слоев задавались в виде матрицы, элементы которой покрывали спектральный диапазон в интервале от 400 до 750 нм. Видно, что полученное численное решение находится в

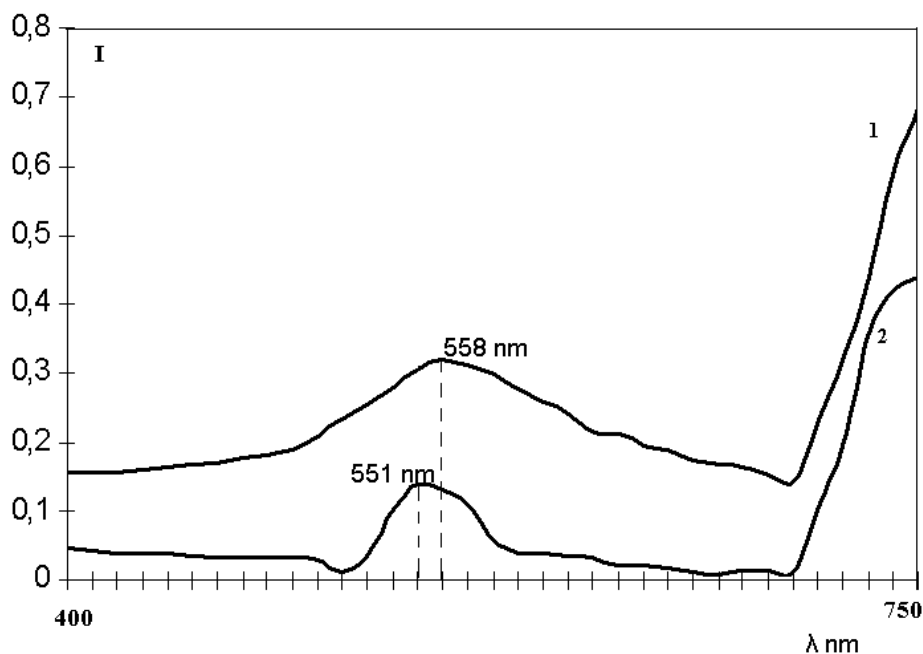
удовлетворительном качественном согласии с экспериментальными данными. Количественные различия, по-видимому, связаны с упрощенной моделью слоев, не учитывающих столбчатую и губчатую составляющие паренхимы, а также проводящую систему листа (жилки). Видно, что расчетная спектральная интенсивность имеет экстремум в области 551 нм, что совпадает с максимумом поглощения хлорофилла «а», характеристики которого использовались при построении матрицы оптических параметров слоев. Экспериментальное значение максимума интенсивности незначительно отличается (558 нм) и обусловлено как уширением линий хлорофилла в среде, так и наличием в фотосинтетическом аппарате растений хлорофиллов другой формы, отличающихся положением в мембране клетки и имеющих сдвинутые спектральные максимумы относительно хлорофилла «а».

Для корректного расчета диаграммы рассеянного излучения необходимо учитывать поверхностные структурные неоднородности листа. Как и следовало ожидать, их учет слабо сказывается на величине интегральной спектральной интенсивности (рис. 3) ввиду их малой объемной плотности. В то же время диаграмма направленности и

распределение интенсивности по сечению может меняться существенно.

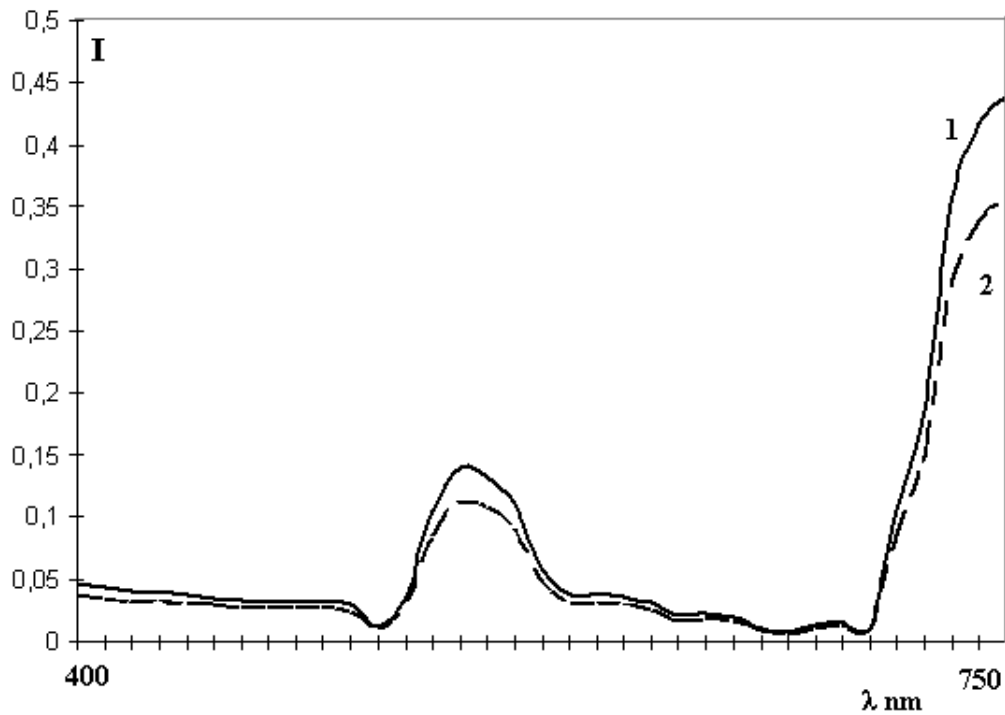
На рис. 4 приведены характерные радиальные распределения нормированной интенсивности обратного рассеяния. Для сравнения на графике также представлены распределения интенсивности для зеркальной (кривая 1) и ламбертовской (кривая 2) моделей поверхности, определяющих асимптотические теоретические границы возможных значений. Видно, что распределение интенсивности без учета поверхностной структуры объекта (кривая 3) имеет четко выраженный максимум. Это отражает тот факт, что наибольший вклад в интенсивность обратного рассеяния вносит эпидермис (первый приповерхностный слой). Учет структуры поверхности приводит к существенному перераспределению и сглаживанию максимума интенсивности.

Другим фактором, влияющим на диаграмму направленности рассеянного излучения, является форма поверхности листа. На рис. 5 представлены численные результаты для различных моделей формы поверхности листа. Видно, что увеличение кривизны поверхности приводит к значительному сглаживанию диаграммы рассеяния, приводящему к квазиоднородному радиальному распределению интенсивности обратного рассеяния.

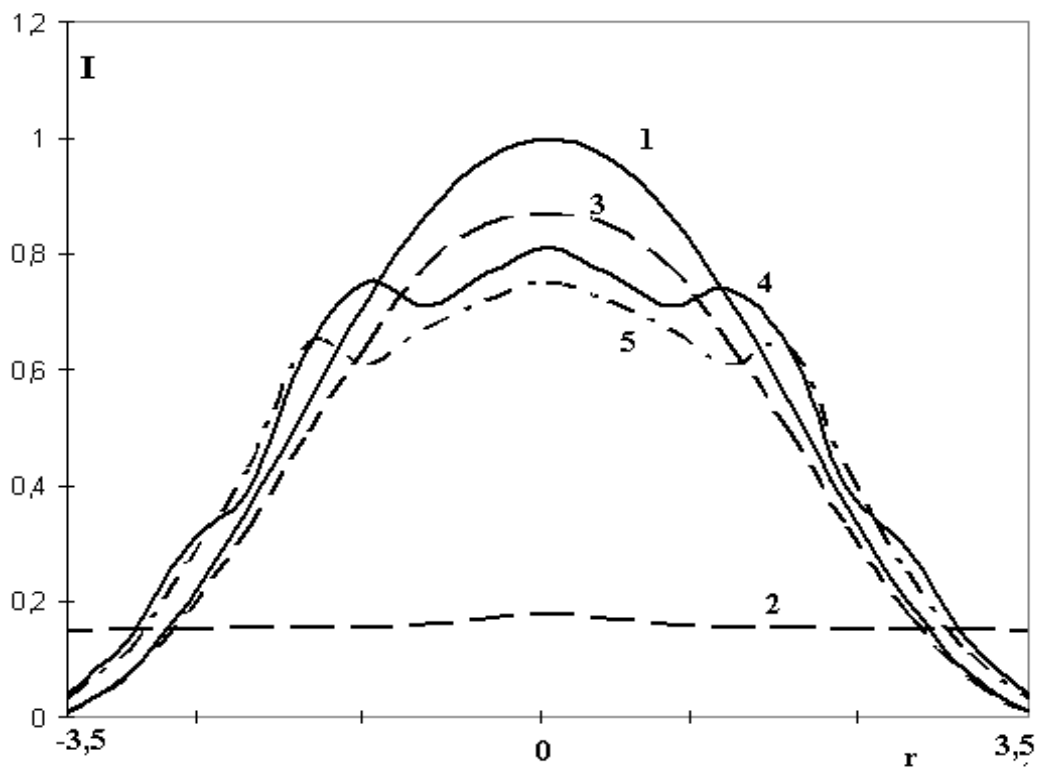


1 – экспериментальные данные работы [2], 2 – численное решение

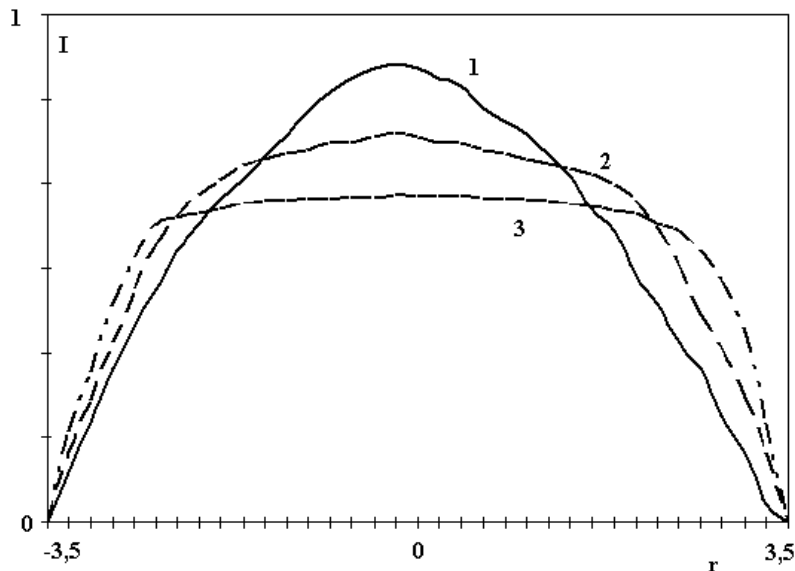
Рис. 2. Спектр нормированной интенсивности обратного рассеяния $I(\lambda)$ зеленого листа сенполии



1 – гладкая поверхность без неоднородностей; 2 – модель «синуса»
 Рис. 3. Спектры нормированной интенсивности обратного рассеяния $I(\lambda)$
 для различных моделей поверхности



1 - зеркальная поверхность, 2 – матовая поверхность, 3 – гладкая поверхность
 без неоднородностей, 4 – модель «синуса», 5 – модель «цилиндров»
 Рис. 4. Радиальное распределение нормированной интенсивности $I(r)$ обратного рассеяния



1 – неискривленная поверхность, 2 – поверхность с отрицательным радиусом кривизны, 3 – поверхность с положительным радиусом кривизны

Рис. 5. Радиальное распределение нормированной интенсивности $I(r)$ обратного рассеяния для различных форм поверхности

В целом разработанная математическая модель позволяет корректно определять и отслеживать изменения спектральных характеристик растения и делает возможным прогнозирование и интерпретацию результатов эксперимента. Расчетные данные могут быть использованы для анализа влияния внешних факторов на фотосинтетические процессы растений, выявлять заболевания и другие факторы, влияющие на процессы жизнедеятельности растений.

Библиографический список

1. Мерзляк, М.Н. Спектры отражения листьев и плодов при нормальном развитии, старении и стрессе [текст] / М.Н. Мерзляк //

Физиология растений. – 1997. – Т 44, №5. – С. 707-716.

2. Братченко, И.А. Экспериментальное исследование и математическое моделирование оптических характеристик растительной ткани [текст] / И.А. Братченко [и др.] // СНЦ РАН, 2007.

3. Словецкий, С.Д. Моделирование пространения оптического излучения в сложной случайно-неоднородной среде методом Монте-Карло [текст] / С.Д. Словецкий // Радиотехника. – 1994. - №7. – С. 654-671.

4. TracePro user's manual supplement, release 3.1. – Lambda Research Corporation, 2005.

Сведения об авторах

Братченко Иван Алексеевич, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, студент 6 курса факультета информатики, специальность «Прикладная математика и физика», ud_liche@mail.ru. Область научных интересов: оптические свойства биологических тканей.

Захаров Валерий Павлович, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, профессор кафедры Автоматизированных систем энергетических установок, доктор физико-математических наук, zakharov@ssau.ru. Область научных интере-

сов: физика плазмы, нелинейная оптика, взаимодействие лазерного излучения с биообъектами, медицинская лазерная техника.

Тимченко Елена Владимировна, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, аспирант кафедры Автоматизированных систем энергетических установок, vorobjeva.82@mail.ru . Область научных интересов: оптические методы диагностики, исследование взаимодействия низкоинтенсивного лазерного излучения с биологическими объектами.