

## Радиационные характеристики растительного листа

Г.М. Креков, М.М. Крекова, А.А. Лисенко, А.Я. Суханов\*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 5.11.2008 г.

Проведен обзор существующих радиационных моделей листа. Предложена новая концепция оптической модели листа как мультифазной системы, содержащей три агрегатных ансамбля частиц, существенно различных по своим микрофизическим и оптическим характеристикам. В основе предложенной модели лежит решение задачи восстановления функции распределения частиц по размерам из экспериментального спектра поглощения листа. На основе полученной микрофизической модели растительного листа рассчитаны спектры отражения и пропускания оптического излучения в диапазоне 400–800 нм для различной относительной концентрации светопоглощающих пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов), а также для разных толщин листа. Моделирование распространения оптического излучения осуществлялось стохастическим методом Монте-Карло. Результаты моделирования находятся в хорошем соответствии с известными экспериментальными спектрами.

*Ключевые слова:* теория переноса, метод Монте-Карло, оптическая модель.

### Введение

Растительность играет определяющую роль в поддержании жизни на планете Земля. От состояния растительного покрова существенно зависят фундаментальные процессы воспроизводства  $O_2$  в биосфере, процессы фотосинтетической активности и, наконец, радиационный режим пограничного слоя атмосферы. Первичным фактором, стимулирующим эффективное развитие указанных процессов, является солнечное излучение. Знание того, как солнечное излучение взаимодействует с растительностью, важно не только для изучения и прогнозирования динамики экосистем, но и для дистанционного зондирования растительных покровов. С точки зрения переноса лучистой энергии в растительном покрове, важнейшими фитоэлементами, формирующими поле рассеянного излучения, являются листья (хвоя) деревьев. Сложный биохимический состав листа, включающий воду, набор пигментов, азот, целлюлозу, лигнин и пр., проявляется в специфических особенностях спектров отражения, пропускания, флуоресценции. Это создает физическую основу развития оптических методов зондирования растительности как на уровне листа, так и в широких региональных масштабах [1–5]. К настоящему времени гиперспектральные методы анализа спектров отражения солнечной радиации видимого и ближнего ИК-диапазонов волн уже показали свою эффективность в решении задач экологии [1, 6], сельского хозяйства [4, 9] и контроля

лесных ресурсов [2, 7, 8]. Особый интерес вызывает проблема обнаружения следов растительной жизни на внеземных космических объектах [3, 10]. Дальнейшее повышение эффективности и информационного содержания указанных исследований связано с расширением наших представлений о характере и влиянии биофизических процессов, сопровождающих взаимодействие радиации с растительной тканью, в первую очередь с листом.

### 1. Морфология двудольного листа

Несмотря на многообразие форм листового покрова, для подавляющего большинства так называемых высших растений характерна двудольная структура листа (*dicotyledon leaf*). Схематичная модель двудольного листа, по данным [11], показана на рис. 1.

По своим биофизическим качествам выделяют следующие зоны: а) двухслойный поверхностный слой (нижний и верхний), состоящий из чешуек воскообразного вещества (*cuticle*) и клеток эпидермиса; б) средняя часть листа (мезофилл) в модели двудольной структуры (СЗ – в ботанике [12]) четко разделена на две зоны: верхняя состоит из плотно упакованных макроклеток паренхимы, имеющих вытянутую форму (*Palisade mesophyll*); нижняя имеет губчатую структуру (*Spongy mesophyll*) за счет нерегулярного расположения воздушных полостей размером 10–80 мкм [13, 14]. Слой эпидермиса играет защитную функцию, не содержит пигментов и активных биохимических веществ и, следовательно, не участвует в процессах фотосинтеза. Макроклетки слоя *Palisade mesophyll* заполнены соком и протоплазмой с показателем

\* Георгий Михайлович Креков (gm@iao.ru), Маргарита Матвеевна Крекова, Андрей Александрович Лисенко, Александр Яковлевич Суханов.

преломления, близким к показателю преломления воды. Именно эти клетки содержат основную часть пигментов, в первую очередь хлорофиллов *a* и *b*. Хлорофилл локализован в пограничных областях протоплазмы в виде хлоропластов. Их форма успешно моделируется в виде вытянутых сфероидов многослойной структуры в диапазоне размеров 1,0–6,0 мкм [15, 16].

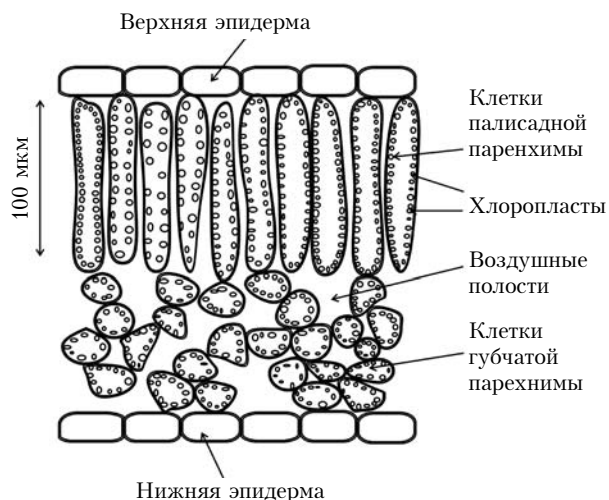


Рис. 1. Модель морфологического строения двудольного листа

Используя положения оптической взаимности, модель слоя *Spongy mesophyll* можно рассматривать как полидисперсное образование квазисферических клеток в воздухе или как полидисперсную систему воздушных пузырьков в жидкости [14]. Средний размер клеток слоя *Spongy mesophyll* равен, по оценкам [13], примерно 9,5 мкм.

## 2. Обзор радиационных моделей листа

Очевидно, что элементарный лист как рассеивающий объект является весьма сложным дисперсным образованием даже в упрощенном (см. рис. 1) морфологическом представлении. Проблема построения корректной радиационной модели листа имеет давнюю предысторию. Willstaetter и Stoll [17] были первыми, показавшими, что поток радиации, падающей на поверхность, разделяется на две части: первая отражается слоем эпидермиса (в модели плоской поверхности), другая входит в лист, где испытывает многократное рассеяние на локальных неоднородностях коэффициента преломления. При этом не учитывалось поглощение пигментами.

Далее было отмечено [18], что подобный подход приводит к завышенным значениям пропущенного диффузного потока и недооценке отраженного. Однако теоретическая модель [17] дала толчок развитию метода трассировки лучей (*ray tracing method*) в приложении к геометрически сложным структурам. Последующие работы [2, 3, 14] связаны с усложнением модели внутренней структуры

листа, с учетом оптических постоянных стенок клеток, хлоропласта, внутриклеточной жидкости, неоднородной структуры эпидермиса, эффектов полного внутреннего отражения и пр.

Современные пакеты программ, в первую очередь *Raytran* [14, 19, 20] и *BDF-Model* [21, 22], позволяют включить в число исходных модельных данных более десятка геометрических и биохимических параметров листа. Подобная детализация представляется излишней на фоне тех принципиальных допущений, на которых построен метод трассировки лучей: во-первых, пренебрежение эффектами рэлеевского и Ми-рассеяния на частицах (хлоропласты, митохондрии, протеины, липиды и др.), размеры которых сопоставимы с длиной волны излучения; во-вторых, невозможность строго учета спектрального поглощения теми же самыми частицами и внутриклеточной жидкостью.

Govaerts et al. [14] попытались учесть поглощение тканью листа путем искусственного обрыва траекторий лучей, используя рандомизированную оценку пробега фотона в дисперсной среде с поглощением. Но эта оценка вытекает из вероятностной трактовки интегрального уравнения переноса, и несмещенность оценки при таком неожиданном сочетании техники трассировки лучей и теории переноса требует доказательств. Кроме того, многопараметричность и, соответственно, громоздкость указанного подхода ограничивают его возможности в решении обратных задач дистанционного зондирования (см., например, [23]).

Физически более адекватными представляются методы расчета радиационных характеристик листа, основанные на интерпретации уравнения переноса радиации. Двухпоточное приближение Кубелки–Мунка [24], несмотря на чрезвычайную простоту вычислительного алгоритма, показало хорошую достоверность результатов при оценке интегральных характеристик рассеяния фитоэлементами. В рамках теории Кубелки–Мунка (КМТ) модель листа представляется как пластина, на которой происходят диффузия и поглощение радиации [3].

Внутри пластины процесс переноса радиации описывается двумя дифференциальными уравнениями первого порядка для восходящего и нисходящего диффузных потоков. Оптические свойства плоского листа задаются некоторыми эмпирическими коэффициентами рассеяния и поглощения, величины которых пропорциональны концентрации хлорофилла [11]. КМТ получила развитие в многочисленных работах, в частности [24–27]. Развитие метода связывается с расширением исходной системы уравнений, т.е. с описанием процесса тремя [23] и четырьмя диффузными потоками [24] и т.д., усложнением геометрической модели листа (путем разделения его на элементарные составляющие слои) [23, 25] и биохимической модели каждого слоя [25, 26]. Определенным итогом такой модификации является программный пакет PROSPECT (Leaf Optical Properties Spectra) [25–27], позволяющий моделировать интегральные отражение и пропускание различных образцов растительного

листа в спектральной области 400–2500 нм, изучать зависимости этих характеристик от содержания воды и важнейших биохимических компонентов (протеина, хлорофилла, целлюлозы, лигнина и др.).

К методическим недостаткам пакета PROSPECT и подобных моделей, основанных на КМТ, следует отнести невозможность учета процессов многократного рассеяния на реальных макрообъектах мезофилла, сопоставимых с длиной волны падающего излучения (клетки, органеллы, воздушные пузырьки и пр.).

Важным достоинством указанного подхода, в отличие от метода трассировки лучей, является обратимость алгоритмов КМТ относительно входных параметров, что делает PROSPECT удобным инструментом в решении задач дистанционного зондирования растительного покрова [26, 27].

Радиационные модели листа, основанные на численном решении полного интегродифференциального уравнения переноса, пока немногочисленны, что объясняется математической сложностью алгоритмов решения прямой и обратной задач, дефицитом информации о внутренней структуре мезофилла листа и распределении его биохимических составляющих.

Для плоской модели листа в работах [28, 29] на основе численного решения уравнения переноса в 1D-приближении предложен алгоритм оценки спектрального отражения и пропускания в зависимости от концентрации поглощающих пигментов. Оптическая модель листа регламентирует равномерное распределение изотропно рассеивающих частиц в жидкости (воде). Форма клеток и их распределение по размерам игнорируются. Физически более адекватная модель переноса использована в работе [13]. Лист моделируется системой из двух однородных слоев (*Palisade* + *Spongy cells*), отличающихся по концентрации рассеивающих частиц и пигментов. Слой *Palisade* состоит из хлоропластов со средним радиусом 2 мкм (в приближении сферы) и показателем преломления  $n_p = 1,42$ . Слой *Spongy* состоит из крупных пузырьков воздуха средним радиусом 9,5 мкм. Частицы расположены в однородной среде с показателем преломления  $n_s = 1,36$ . Для расчета сечений и дифференциальных сечений рассеяния использовались стандартные алгоритмы теории Ми [30]. Уравнение переноса в 1D-приближении решается оригинальным [13, 31] методом выделения  $\delta$ -анизотропии в нулевой азимутальной гармонике индикатрисы рассеяния. Хорошее качественное совпадение оценок спектрального отражения и пропускания [13] с результатами экспериментальных измерений показывает, что в предложенной модели учитываются основные факторы, влияющие на радиационный режим листа.

### 3. Оптическая модель листа

Как следует из названия статьи и структурной модели листа (см. рис. 1), нами сохраняется основная идеология представления исходных микрофизических параметров мезофилла, используемая

в работах [13, 14]. Влияние слоев верхней и нижней эпидермы учитывается только в процессах френелевского отражения; поглощение в эпидерме отсутствует. Цель наших исследований заключается в последовательном улучшении микрофизической модели мезофилла и оптимизации алгоритмов расчета соответствующих оптических и радиационных характеристик. На данном этапе мы ограничим анализ пределами видимого участка спектра электромагнитных волн.

Первый принципиальный вопрос возникает в связи с определением оптически активной фракции того обширного класса органических образований, которые существуют в объеме мезофилла листа. Это частично упорядоченная система клеток палисада (см. рис. 1), имеющих продольные размеры до 50–80 мкм, внутри клеток — хлоропласты, митохондрии и другие органеллы с характерными размерами 1,5–5,0 мкм. Хлорофилл в пределах хлоропласта сконцентрирован в гранулах сложной формы размером 0,2–1,0 мкм. Анализ можно продолжать до молекулярного уровня. Очевидно, что строгий расчет оптических параметров подобных морфологических структур пока не доступен. Поэтому используются упрощенные микрофизические модели.

Можно выделить два альтернативных направления. В ряде известных радиационных моделей, в том числе отмеченных выше [21, 22, 24, 29], вопрос о форме рассеивающих частиц и их распределении по размерам опускается. Считается, что в жидкой среде равномерно распределены рассеивающие центры с изотропной индикатрисой рассеяния. В другой серии исследований, например [13, 31–34], полагается, что определяющую роль в формировании радиационного режима биологических образцов играют крупные клетки, имеющие в большинстве случаев сфероидальную форму. Известные расчетные оценки, систематизированные в [35], показывают, что для таких рассеивающих объектов фактор анизотропии Хеньи–Гринштейна  $g$  равен или больше 0,99 [32]. Такой подход, по-видимому, допустим для моделирования светорассеяния океанического фитопланктона, где отдельные крупные биологические частицы типа *Chlorella vulgaris* [34] находятся за пределами волновой зоны друг друга.

В то же время, как следует из многочисленных экспериментальных данных, в частности [5, 26, 36], в оптически плотных биологических средах, таких как ткань листа или живого организма, величина диффузного пропускания в спектральном участке 750–1100 нм (поглощение практически отсутствует) не намного превышает диффузное отражение. Подобное поведение трудно объяснить, если допустить высокую анизотропию результирующей индикатрисы рассеяния. Чтобы прояснить возникающее противоречие и установить входные параметры оптической модели, предпринята попытка решения обратной задачи по восстановлению спектра по размерам оптически активной составляющей паренхимы листа, опираясь на достоверные экспериментальные данные. Наиболее представительный массив данных

был получен в комплексном эксперименте LOPEX-93 (*Leaf Optical Properties Experiment*) [26], а также в Университете Болоньи [36]. Около 2000 спектров отражения  $R(\lambda)$  и пропускания  $T(\lambda)$  в широком спектральном интервале 400–2500 нм было получено в контролируемых лабораторных условиях спектрометрическим Li-Cor 1800 (Nebr., USA). Несмотря на то что в эксперименте использовались различные листовые породы, качественное подобие спектров весьма устойчиво для двухслойных листьев. Это дало основание выбрать для натурной модели спектры ивы зеленой, показанные на рис. 2.

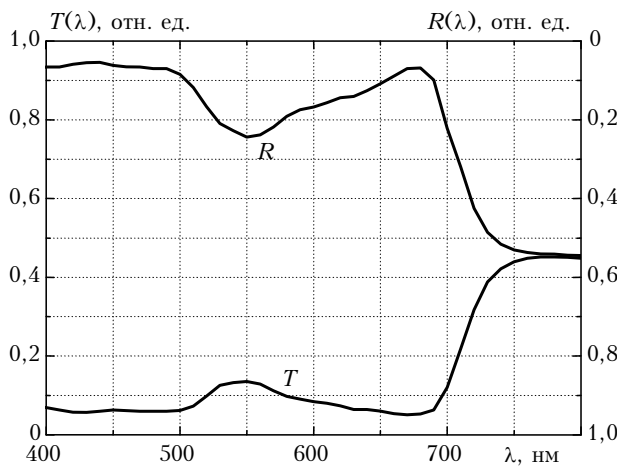


Рис. 2. Спектры отражения и пропускания листа ивы зеленой

Решение обратной задачи выполнено на основе генетического алгоритма обращения данных спектрального поглощения паренхимы листа. В последнее время генетический алгоритм, получивший развитие в биологической генетике [37], становится популярным в анализе и интерпретации данных дистанционного зондирования [38, 39, 45]. Детали нашего алгоритма (см. Приложение) обсуждались в [46, 49]. Обучение алгоритма опирается на использование реальных значений коэффициентов поглощения паренхимы листа  $\sigma_a(\lambda)$  в коротковолновой части спектра  $\lambda = 400 \div 800$  нм. В лабораторных измерениях значения  $\sigma_a(\lambda)$  непосредственно следуют из обращения закона Бугера:

$$\sigma_a(\lambda) = -\ln[R(\lambda) + T(\lambda)]/\bar{d}, \quad (1)$$

где  $\bar{d}$  — средняя толщина листа.

В выбранном участке спектра поглощением воды можно пренебречь и поглощение радиации будет определяться концентрацией хлорофилла и сопутствующих каротиноидов ( $\beta$ -каротин, лютеин и др.), которые оптически активны в интервале  $\Delta\lambda = 420 \div 480$  нм. Соответственно в численных экспериментах значения  $\sigma_a(\lambda)$  можно точно рассчитать, используя табличные данные об удельных коэффициентах поглощения хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и дру-

гих органических элементов (см., например, [40, 41]). В простейшем случае

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{1}{d} [C_a \alpha_a(\lambda) + C_b \alpha_b(\lambda) + C_c \alpha_c(\lambda)], \quad (2)$$

где  $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$  — удельные показатели поглощения хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и каротиноидов;  $C_a, C_b, C_c$  — соответствующие значения поверхностной концентрации указанных пигментов, мг/м<sup>2</sup>. Последние являются параметрами задачи, их значения зависят от вида и возраста растения и многочисленных факторов окружающей среды. Спектральный ход коэффициента поглощения паренхимы двудольного листа, по данным [26], показан на рис. 3.

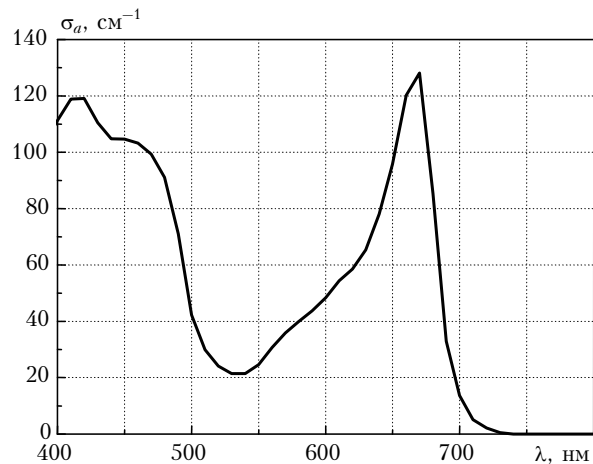


Рис. 3. Спектральный ход коэффициентов поглощения паренхимы листа ивы зеленой

Для восстановления спектра частиц по размерам необходимо задать значения действительной и мнимой частей показателя преломления  $m(\lambda) = n(\lambda) - in'(\lambda)$ . Хлорофилл в пределах хлоропласта существует в виде компактных образований (гран), состоящих из нескольких пластинчатых частиц (тилакоидов). Измерение оптических постоянных таких комплексов — весьма сложная проблема [42, 43], что объясняет крайне немногочисленное количество работ в этом направлении. Наиболее полный банк данных по спектральным моделям  $n'(\lambda)$  различных органических составляющих представлен в работе [43]. Однако значения  $n'(\lambda)$  для сухого хлорофилла кажутся нам завышенными, поскольку они превышают даже поглощение органического углерода.

Более адекватные оценки  $n'(\lambda)$ , использованные в нашем численном эксперименте, предложены авторами [44]. Спектральное поведение действительной и мнимой частей относительного показателя преломления хлорофилла показано на рис. 4.

Микрофизические особенности хлоропласта как элементарного рассеивающего объекта изучены лучше [3, 12, 14, 32–34]. Как правило, он моделируется в форме слабовянутого сфероида двухслойной структуры. Техника расчета оптических характеристик подобных частиц изложена, например, в [47, 48].

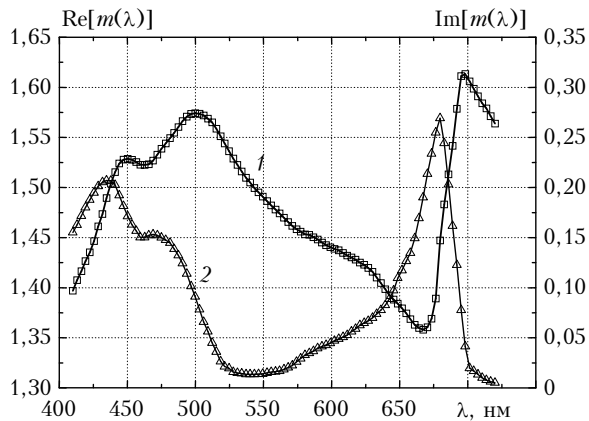


Рис. 4. Спектральное поведение действительной (1) и мнимой (2) частей относительного показателя преломления хлорофилла по данным [44]

Оптические постоянные хлоропласта и цитоплазмы показаны на рис. 5. Их значения не противостоят известным моделям [14, 32].

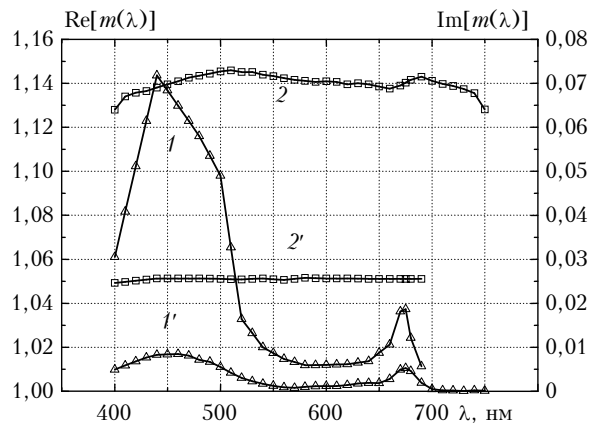


Рис. 5. Спектральное поведение действительной и мнимой частей относительного показателя преломления хлоропласта (1, 2) и цитоплазмы (1', 2') по данным [33]

На первом этапе решения обратной задачи на основе генетического алгоритма было установлено, что оптически активная фракция частиц мезофилла листа имеет, как минимум, 2-модальную структуру. Средний радиус частиц первой моды  $\bar{r}_1 \approx 0,15$  мкм; это значение находится в области размеров частиц хлорофилла (гран тилакоидов в биологии), наблюдаемых в лабораторных экспериментах [15, 16]. Вторая мода имеет максимум в области  $\bar{r}_2 \approx 2,0$  мкм, что характерно для размеров хлоропласта в представлении эквивалентными сферами [16, 33, 50]. Крупнодисперсная фракция органических соединений мезофилла листа, в первую очередь клетки, имеющие средний размер  $\bar{r}_3 \geq 8 \div 12$  мкм, не вносит заметного вклада в спектр поглощения. Тем не менее известно, например [48], что 95–99% вклада в поле рассеивающего излучения вносят частицы радиуса  $a \geq 0,2$  мкм. Поэтому целесообразно, следуя рекомендациям [13], включить в модель ниж-

него слоя листа (пористая паренхима) полидисперсную структуру воздушных пузырьков  $\bar{r}_3 \approx 9,5$  мкм. Таким образом мы приходим к мультифазной системе, содержащей три агрегатных ансамбля частиц, существенно различных по своим микрофизическим и оптическим характеристикам. Отметим, что мы пока выпускаем из рассмотрения наночастицы ( $\bar{r} \approx 10 \div 50$  нм), формирующие мембраны тилакоидов, и крупные органические структуры вегетативной системы листа и растения в целом.

Как показывают многочисленные исследования [51–53], математическая модель спектра частиц мультифазной среды не может адекватно описываться упрощенным степенным законом, как принято, например, в гидрооптике. В отличие от атмосферного аэрозоля и гидрозоля, спектр биочастиц, как правило, узкий [15, 33] и имеет куполообразную форму. Результаты решения обратной задачи дают основание предложить в качестве композитной математической модели спектра частиц паренхимы двудольного листа суперпозицию обобщенных  $\gamma$ -распределений:

$$f(a) = \sum_{i=1}^3 f_i(a) = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\Gamma(\mu_i + 1)} \left( \frac{\mu_i}{\bar{r}_i} \right)^{\mu_i + 1} a^{\mu_i} e^{-\mu_i a / \bar{r}_i}, \quad (3)$$

где  $\Gamma(\mu + 1)$  — гамма-функция;  $\bar{r}_i$  — модальный радиус;  $a$  — радиус частицы;  $\mu$  — параметр, характеризующий полуширину спектра.

Для

$$i = 1: \bar{r} = 0,15 \text{ мкм}, \mu_1 = 1, a_{\min} = 0,05 \text{ мкм}, \\ a_{\max} = 0,3 \text{ мкм};$$

$$i = 2: \bar{r} = 2,0 \text{ мкм}, \mu_2 = 2, a_{\min} = 0,3 \text{ мкм}, \\ a_{\max} = 4 \text{ мкм};$$

$$i = 3: \bar{r} = 9,5 \text{ мкм}, \mu_3 = 3, a_{\min} = 5,0 \text{ мкм}, \\ a_{\max} = 12 \text{ мкм}.$$

Третья грубодисперсная фракция, характеризующая микроструктуры нижней части листа (*Spongy mesophyll*), принята нами на основании выводов, сделанных авторами [13]. Функции  $f_i(a)$ ,

нормированные условием  $\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} f_i(a) da = 1$ , показаны

на рис. 6.

Последнее необходимое предположение делается относительно формы частиц каждой фазы. Форма хлоропластов ( $i = 2$ ), как отмечено выше, близка к сфероидальным с малым показателем вытянутости. Граны тилакоидов ( $i = 1$ ) и воздушные полости пористой паренхимы ( $i = 3$ ) ограничены существенно неправильными геометрическими поверхностями. Однако их компактное строение дает определенное основание считать их сферами, поскольку другого выбора не существует. Тем более, по известным оценкам авторов [47, 48], для полидисперсной системы хаотически ориентированных частиц влияние формы незначительно.

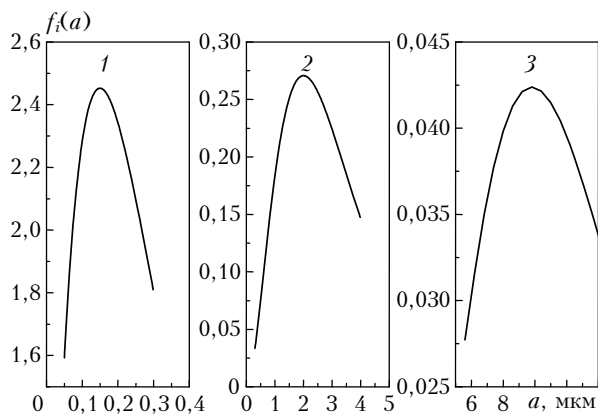


Рис. 6. Функция распределения частиц по размерам  $f_i(a)$  для частиц 0,15 мкм – грани тилакоидов (1), 2 мкм – хлоропласты (2) и 9,5 мкм – воздушные пузырьки (3)

#### 4. Оценка параметров светорассеяния

Выбранные модельные микрофизические характеристики (см. рис. 6) служат входными параметрами для компьютерной оценки интегральных и дифференциальных характеристик светорассеяния каждой биологической фазы паренхимы двудольного листа. Для расчета характеристик модели полидисперсного ансамбля сферических частиц ( $i = 1, 3$ ) использовался канонический алгоритм дифракционной теории Лоренца–Ми, апробированный нами ранее [53]. Для ансамбля сфероидальных частиц адаптирован известный алгоритм  $T$ -матриц [48].

Необходимость адаптации вызвана тем, что «свободно» размещенные в мировой сети данные пакеты программ [54] ориентированы на использование компьютера с расширенными математическими возможностями либо на привлечение дополнительного, уже коммерческого, математического обеспечения. В первую очередь это касается специальных алгоритмов LU-факторизации [48], требующих расширенной точности. В настоящей статье использовалась процедура обращения матриц на основе стандартного алгоритма исключения по Гауссу [55]. Тестовые оценки подтвердили хорошую точность оценок в диапазоне размеров частиц до  $2\pi a/\lambda \leq 60$ .

Перейдем к результатам расчетов. На рис. 7 приведены спектральные зависимости факторов эффективности рассеяния  $\beta_s(\lambda)$ , поглощения  $\beta_a(\lambda)$  и экстинкции  $\beta_{ext}(\lambda)$  соответственно для модели микробиологических частиц и модели хлоропластов. Мы не знаем счетной концентрации частиц, поэтому оценки нормированы на единичную концентрацию. Здесь же (правая шкала) показано спектральное поведение альбеда однократного рассеяния  $\Lambda(\lambda) = \beta_s(\lambda) / [\beta_s(\lambda) + \beta_a(\lambda)]$ . В целом достаточно сложный характер спектральных зависимостей  $\beta(\lambda)$  и  $\Lambda(\lambda)$  отражает экстремальное поведение мнимой части показателя преломления биочастиц, обусловленное полосами поглощения биологических пигментов, в первую очередь хлорофилла. Именно аномальное поглощение хлорофилла в си-

не-голубой части спектра приводит к тому, что  $\Lambda(\lambda)$  опускается до значений  $\leq 0,5$ .

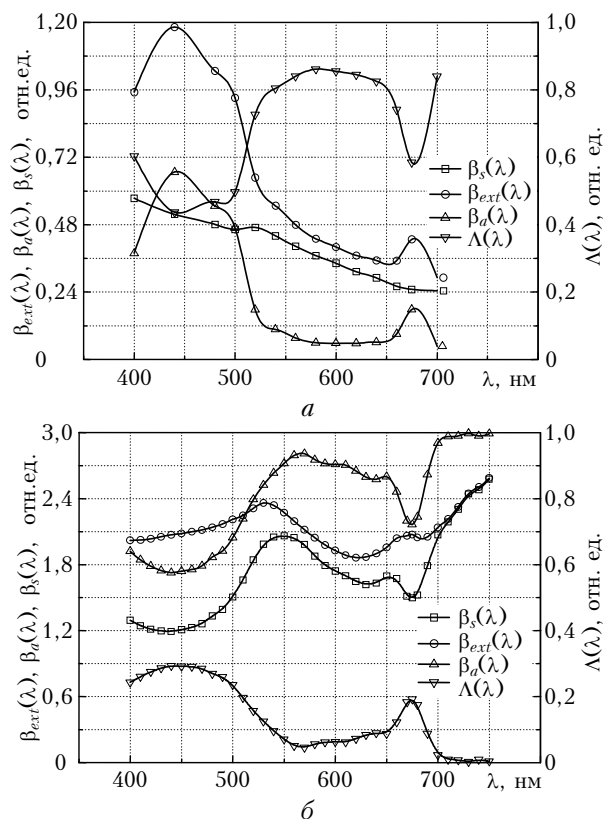


Рис. 7. Спектральные зависимости факторов эффективности рассеяния  $\beta_s(\lambda)$ , поглощения  $\beta_a(\lambda)$  и экстинкции  $\beta_{ext}(\lambda)$  для модели микробиологических частиц: грани тилакоидов (а) и хлоропластов (б)

Поведение угловых функций рассеяния (индикатрисы рассеяния)  $g(\theta)$  ( $\theta$  – угол рассеяния), показанных на рис. 8, достаточно тривиально.

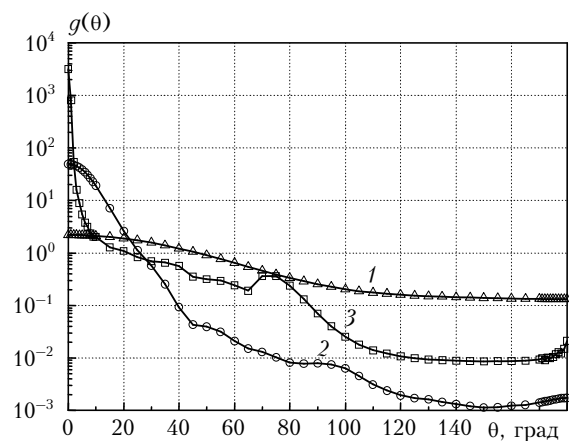


Рис. 8. Поведение угловых функций рассеяния  $g(\theta)$  для частиц 0,15 мкм – грани тилакоидов (1), 2 мкм – хлоропласты (2) и 9,5 мкм – воздушные пузырьки (3)

Для фракции крупных биочастиц (мода 2 – хлоропласты) индикатрисы рассеяния становятся более анизотропными. Отметим, в частности, что учет эллиптичности хлоропластов сказывается на

форме индикатрисы только в области локационных углов  $\theta = 170\div 180^\circ$ . Значения факторов взаимодействия (см. рис. 7) не могут быть использованы для решения уравнения переноса радиации в реальном листе, поскольку они отражают относительное соотношение механизмов рассеяния и поглощения.

Для приведения их в соответствие с реальными значениями необходимо провести процедуру калибровки. Как отмечалось выше, такой калибровочной зависимостью может служить кривая спектрального поглощения  $\sigma_a(\lambda)$  ( $\text{см}^{-1}$ ), полученная экспериментальным или расчетным путем. Зная  $\sigma_a(\lambda)$  и совместное для мультифазной среды альbedo однократного рассеяния  $\Lambda_\Sigma(\lambda)$ , нетрудно получить

$$\beta_{ext}(\lambda) = \frac{\sigma_a(\lambda)}{1 - \Lambda_\Sigma(\lambda)}. \quad (4)$$

Остается проблема оценки  $\Lambda_\Sigma(\lambda)$ . Альbedo однократного рассеяния  $\Lambda_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , можно рассматривать как функцию распределения дискретной случайной величины, характеризующей вероятность рассеяния при взаимодействии фотона с частицей, принадлежащей фазовому составу с индексом  $i$  [см. (3)].

В этом случае можно воспользоваться развитым в теории статистического моделирования методом суперпозиций [42]. Действительно, при известных  $\Lambda_i$  полную вероятность рассеяния в мультифазной дисперсной среде можно представить в виде

$$\Lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^2 \Lambda_i C_i, \quad (5)$$

где  $\sum_i C_i = 1$ ,  $C_1 = C_{12}$ ,  $C_2 = 1 - C_{12}$ .

Коэффициент  $C_{12}$  равен вероятности того, что фотон при очередном акте рассеяния в объеме среды пересекает геометрическое сечение частицы фазы 1 ( $i = 1$ ). Приблизительно эту вероятность в 2-фазной среде можно оценить как

$$C_{12} \approx \chi \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \pi a^2 f_1(a) da / \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \pi a^2 f_2(a) da. \quad (6)$$

Параметр  $\chi$  в (6) характеризует отношение концентраций частиц фазы 1 и фазы 2. В рассматриваемой микрофизической модели листа эта величина очевидно равна среднему количеству гран тилакоидов в одном хлоропласте. Концентрация хлорофилла в различных формах растительности и в различных стадиях развития листа активно изучается в биофизике электронно-оптическими методами [15, 16, 44]. Характерно, что несмотря на многообразие растительных форм жизни, структура хлоропласта как первичной органеллы и содержание в нем гран тилакоидов достаточно стабильны. Так, например, в свежем листе, по данным [16],  $\chi = 20\div 40$ . Таким образом, мы пришли к реально измеряемому параметру. Отметим, в частности, что принцип суперпозиции впервые был использован

в нашей работе [56], касающейся эффективности лазерного зондирования живых организмов в океане.

Полученные на основе изложенной методики (4)–(6) значения  $\Lambda_\Sigma(\lambda)$ , а также спектральные зависимости интегральных по фазовому составу коэффициентов рассеяния  $\beta_s(\lambda)$  и экстинкции  $\beta_{ext}(\lambda)$  дают основу для решения задачи переноса коротковолнового излучения в двудольном листе как дисперсной системе.

## 5. Математическая модель переноса излучения в листе

В линейном режиме многократного рассеяния радиационный баланс в объеме листа и на его границе удовлетворяет интегродифференциальному уравнению переноса 3D-пространства  $\mathbf{r}(x, y, z)$  с ком-  
позитным ядром

$$\begin{aligned} \Omega \nabla I(\mathbf{r}, \Omega) + \beta_{ext}(\mathbf{r}) I(\mathbf{r}, \Omega) = \\ = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} G_\Sigma(\mathbf{r}, \Omega', \Omega) I(\mathbf{r}, \Omega') d\Omega' + \Phi_0(\mathbf{r}), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $I(\mathbf{r}, \Omega)$  – интенсивность излучения в точке  $\mathbf{r}$  в направлении  $\Omega(a, b, c)$ ; ( $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ );  $\Phi_0(\mathbf{r})$  – функция внутренних источников;

$$G_\Sigma(\mathbf{r}, \Omega', \Omega) = \sum K_i G_i(\mathbf{r}, \Omega', \Omega)$$

– общезначимый коэффициент направленного светорассеяния в направлении  $\mu' \rightarrow \mu = \Omega' \cdot \Omega$ ;  $G_i(\mathbf{r}, \Omega', \Omega)$  – коэффициент направленного светорассеяния  $i$ -й фазовой составляющей среды;  $K_i$  – весовые коэффициенты;  $\beta_{ext}(\mathbf{r}) = \sum \beta_{s_i} + \sum \beta_{a_i}(\mathbf{r})$  – полный коэф-

фициент экстинкции;  $\beta_{s_i}$  и  $\beta_{a_i}$  – объемные коэффициенты рассеяния и поглощения  $i$ -й фазовой составляющей среды. Как отмечалось выше, в качестве упрощающего предположения считается, что с оптической точки зрения лист представляет собой двухслойную плоскопараллельную структуру конечной оптической толщины. Ограничивающие поверхности отражают по закону Ламберта–Френеля. В пределах каждого слоя

$$G_i(\mathbf{r}, \Omega', \Omega) = \beta_{s_i} g(\mu),$$

где  $\beta_{s_i} = \text{const}$ ;  $\int_{-1}^1 g(\mu) d\mu = 1$ , т.е.  $g(\mu)$  – нормированная, в смысле плотности вероятности, индикатриса рассеяния.

Из рассмотрения опускаются пока эффекты перераспределения вторичного излучения по частоте, т.е. явления спонтанной и вынужденной флуоресценции пигментов. Далее уравнение решается методом Монте-Карло. В большинстве связанных с этим методом работ по оптике биологических тканей используют аналоговый полуэмпирический подход, не требующий формулировки уравнения переноса. Возросшие возможности компьютерной техники

оправдывают такой подход. Тем не менее для решения многомерных задач теории переноса в сложных граничных условиях целесообразно использовать *весовые* методы Монте-Карло [57, 58], позволяющие существенно понизить дисперсию искомых оценок. Построение весовых алгоритмов требует предварительного анализа интегрального уравнения переноса, точнее, особенностей его ядра. Неоднократно показано [57–60], что в большинстве случаев интегродифференциальное уравнение (7) допускает преобразование в каноническую форму уравнения Фредгольма 2-го рода. В операторной форме оно обычно записывается в виде

$$f = Kf + \varphi, \quad (8)$$

где интегральный оператор  $K$  определен как

$$[Kf](\mathbf{r}, \Omega) = \int_{R^{4\pi}} k[(\mathbf{r}', \Omega') \rightarrow (\mathbf{r}, \Omega)] f(\mathbf{r}', \Omega') d\mathbf{r}' d\Omega'; \quad (9)$$

$$f(\mathbf{r}, \Omega) = \frac{\Lambda(\mathbf{r}') \beta_{ext}(\mathbf{r}, \Omega) g_{\Sigma}(\Omega' \cdot \Omega) \exp[-\tau(\mathbf{r}', \mathbf{r})]}{4\pi} \times \frac{1}{\|\mathbf{r}' - \mathbf{r}\|^2} \times \delta\left(\Omega - \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|}\right) \quad (10)$$

представляет собой плотность вероятности перехода фотона из состояния  $(\mathbf{r}', \Omega')$  в состояние  $(\mathbf{r}, \Omega)$ ;  $g_{\Sigma}(\Omega' \cdot \Omega)$  – общефизическая индикатриса рассеяния;

$$\varphi(\mathbf{r}, \Omega) = \int_R k[(\mathbf{r}, \Omega_0) \rightarrow (\mathbf{r}, \Omega)] \beta_{ext}(\mathbf{r}') \exp[-\tau(\mathbf{r}', \mathbf{r}_0)] \quad (11)$$

– плотность начальных столкновений (функция источника). Мы полагаем, что начальная точка  $\mathbf{r}(x_0, y_0, z_0) \in D \subset R$  освещается падающим лучом в направлении  $\Omega_0(a_0, b_0, c_0)$ ;  $\tau(\mathbf{r}', \mathbf{r})$  – оптическое расстояние между точками  $\mathbf{r}'$  и  $\mathbf{r}$  вдоль луча  $(\mathbf{r}' - \mathbf{r})/\|(\mathbf{r}' - \mathbf{r})\|$ :

$$\tau(\mathbf{r}', \mathbf{r}) = \int_0^{\|\mathbf{r}' - \mathbf{r}\|} \beta_{ext}(\mathbf{r} - \Omega s) ds. \quad (12)$$

Отметим, что фактор  $\|(\mathbf{r}' - \mathbf{r})\|^2$  характеризует элемент телесного угла  $d\Omega$ ;  $\delta$ -функция в (10) сопрягает направление  $\Omega$  с точками  $\mathbf{r}'$  и  $\mathbf{r}$  и, таким образом,  $\mu = \Omega' \cdot \Omega = \Omega' \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}')/\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|^2$  в фазовой функции  $g_{\Sigma}(\mu)$ .

Весовые модификации метода Монте-Карло основаны на представлении решения уравнения (8) рядом Неймана по последовательным столкновениям фотона:

$$f = \varphi + K\varphi + K\varphi^2 + K\varphi^3 + \dots = \sum_{b=0}^{\infty} K^b \varphi. \quad (13)$$

Для сходимости (13) достаточно, чтобы нашлось такое  $l_0$ , при котором  $\|K^{l_0}\| < 1$ . Из (9) следует

$$\int_{R^{4\pi}} k[(\mathbf{r}', \Omega') \rightarrow (\mathbf{r}, \Omega)] d\mathbf{r}' d\Omega = \Lambda(\mathbf{r}'), \quad \text{отсюда}$$

$\|K^{l_0}\| \leq \sup \Lambda(\mathbf{r}') \leq 1$ . Нетрудно заметить, что для ограниченной среды условие сходимости будет вы-

полняться, даже если  $\Lambda(\mathbf{r}') \equiv 1$ . Метод Монте-Карло обычно используют не для расчета поля интенсивности  $I(\mathbf{r}, \Omega)$ , а для оценки линейных функционалов от решения уравнения переноса

$$I_h = (f, h) = \int_{R^{4\pi}} f(\mathbf{r}, \Omega) h(\mathbf{r}, \Omega) d\mathbf{r} d\Omega, \quad (14)$$

где характеристическая функция  $h \geq 0$  при условии  $(f, h) < \infty$ . Например, для оценки интеграла от  $f(\mathbf{r}, \Omega)$  по некоторой области  $D \subset R$ , достаточно постоянной,  $h(\mathbf{r}, \Omega) = 1$  при  $\mathbf{r} \in D$  и  $h(\mathbf{r}, \Omega) = 0$  при  $\mathbf{r} \notin D$ , что соответствует аналоговой схеме моделирования, когда статистическая оценка

$$\hat{I}_h = M\xi, \quad \xi = \sum_{l=0}^N h(\mathbf{r}, \Omega). \quad (15)$$

В большинстве случаев, отражающих реальный эксперимент, в том числе и в настоящей задаче, требуется оценить спектральные характеристики восходящих и нисходящих потоков в условиях коллимированного освещения и детектирования. Это предполагает наличие локализованных детекторов и источников излучения. Области локализации  $D^* \ll R$ . Вероятность информативных событий, когда  $h \neq 0$ , минимальна. Для решения задачи в подобных граничных условиях целесообразно строить другую цепь Маркова – такую, чтобы в плотность перехода  $k[(\mathbf{r}', \Omega') \rightarrow (\mathbf{r}, \Omega)]$  входила

функция  $\delta\left(\Omega - \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|}\right)$ . Смещенность физической логики такого искусственного марковского процесса компенсируется специальными весами  $Q_l$ , что приводит к оценке

$$I_h = M \sum_{l=0}^N Q_l h(\mathbf{r}_l, \Omega_l). \quad (16)$$

Детальный анализ возможностей весовых методов Монте-Карло выполнен в фундаментальных исследованиях Г.А. Михайлова, например в работах [57, 58], в которых показана их высокая эффективность в задачах дистанционного зондирования окружающей среды. Частные алгоритмы моделирования геометрической траектории пакета фотонов в однородной и слоисто-неоднородной среде общеизвестны (см., например, [59, 61]).

## 6. Результаты расчетов радиационных характеристик

На основе изложенной выше микрофизической модели листа и математической модели переноса излучения проведены расчеты радиационных потоков диффузно пропущенного и отраженного объемом листа излучения в зависимости от относительной концентрации пигментов: хлорофиллов  $a$  и  $b$  и каротиноидов. Поскольку именно эти пигменты



являются важнейшими физиологическими показателями, определяющими эффективность трансформации световой энергии в объеме листа, то от их распределения и относительной концентрации зависят спектры поглощения, отражения и пропускания.

Данные по концентрациям пигментов для различных двудольных растений, а также спектры отражения для зеленого и желтого листа *L. Styraciflua*, используемые нами в качестве эталона для сравнения с расчетом, взяты в работе [62]. Результаты расчета представлены на рис. 9.

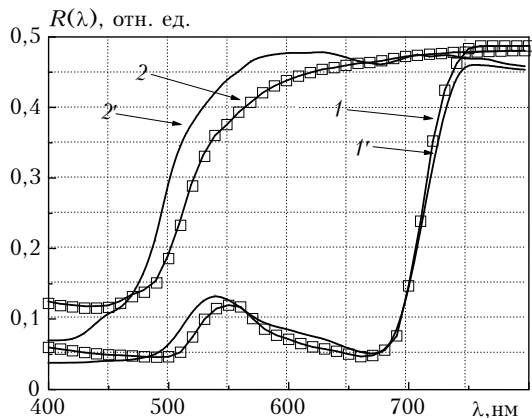


Рис. 9. Спектры отражения для зеленого (кривая 1) и желтого (кривая 2) листа *L. Styraciflua*. Спектры отражения для зеленого (кривая 1') и желтого 2' листа, полученные в результате расчета

Показано хорошее качественное совпадение экспериментальных данных и расчетных кривых, что свидетельствует о правильности выбранной нами модели. На следующем этапе расчетов мы варьировали концентрацию пигментов (рис. 10) с целью промоделировать зависимость спектров поглощения, отражения и пропускания от содержания пигментов.

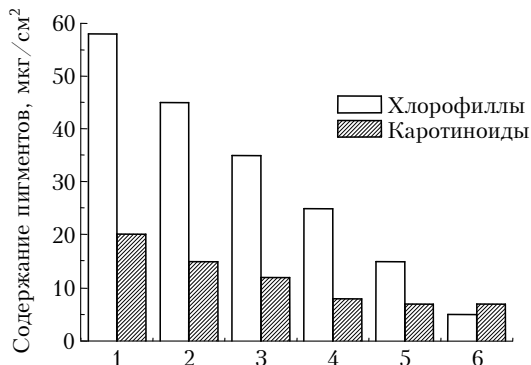
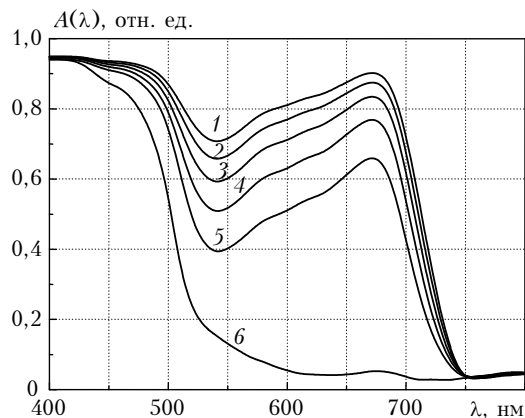
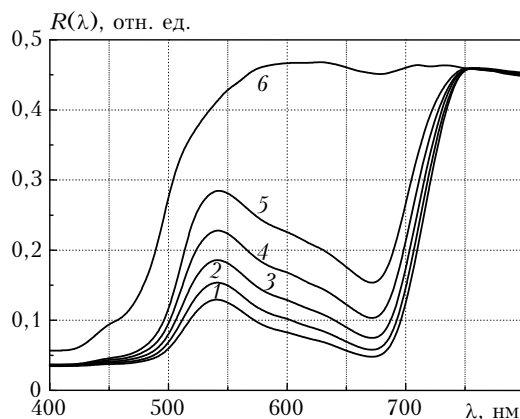


Рис. 10. Возможные вариации содержания пигментов в объеме листа

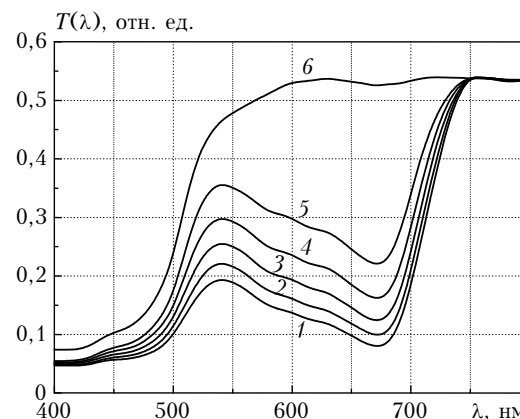
Изменения концентрации пигментов являются следствием либо естественного старения растения, либо неблагоприятных экологических условий, приводящих к стрессовому воздействию на растение. Кривые спектральной интенсивности отражения, пропускания и поглощения, рассчитанные в зависимости от относительного содержания хлорофиллов и каротиноидов, приведены на рис. 11.



a



б



в

Рис. 11. Спектры поглощения (a), отражения (б) и пропускания (в) при различном содержании пигментов; кривые 1–6 соответствуют позициям 1–6 на оси абсцисс на рис. 10

Спектры зеленых летних листьев (кривые 1–5) характеризуются высоким поглощением во всей видимой части спектра. Такие листья практически полностью поглощают излучение в синей (400–500 нм) и красной (660–680 нм) областях, а также значительную часть зеленого света.

В осенних листьях интегральная интенсивность поглощения резко снижается, и в спектрах с очень низким содержанием хлорофиллов (кривая 6)

проявляются максимумы поглощения каротиноидов. В желтых листьях каротиноиды, несмотря на их низкое содержание, сильно поглощают излучение в синей части спектра. На рис. 12 приведены результаты расчетов, для разной толщины листа (от 200 до 340 мкм), при постоянном значении суммарной концентрации хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и каротиноидов.

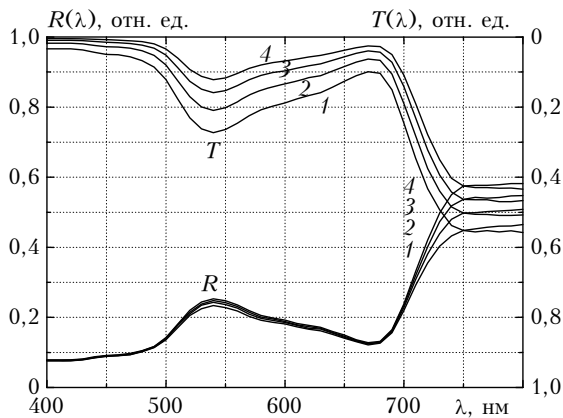


Рис. 12. Спектры пропускания  $T$  и отражения  $R$  для различной толщины листа: кривая 1 – 200, 2 – 240, 3 – 280, 4 – 340 мкм при неизменном относительном содержании пигментов

На рис. 11 выбранный нами случай соотношения между концентрациями хлорофиллов и каротиноидов соответствует кривой 3 – летний зеленый лист. При увеличении толщины листа отношение отражения и пропускания заметно изменяется за счет увеличения концентрации поглощающих пигментов.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

Восстановление функции распределения частиц по размерам возможно по спектрам ослабления, поглощения и рассеяния, полученным в натурном или модельном экспериментах. Для реализации

данной процедуры часто используются статистические методы, в том числе генетические алгоритмы [37–39]. В данной конкретной задаче используются экспериментальные спектры поглощения натурального двудольного листа  $A(\lambda)$ , поскольку спектры отражения  $R(\lambda)$  и пропускания  $T(\lambda)$  отягощены неизвестной добавкой диффузного рассеяния. Спектр поглощения листа ивы зеленой, принятый во многих работах в качестве эталонного, показан на рис. 3. Формально коэффициент поглощения  $\sigma_a(\lambda)$  может быть рассчитан по известным аналитическим формулам теории Ми [30], если допустить сферическую модель формы частиц:

$$\sigma_a(\lambda_i) = \int_0^\infty f(a) \beta_a(\lambda_i, a, m(\lambda_i)) da, \quad (\text{П1})$$

где  $f(a)$  – функция распределения;  $\lambda_i, i = 1, 2, \dots$  – дискретный набор длин волн в заданном спектральном интервале. Нахождение искомой функции  $f(a)$ , входящей в ядро интегрального уравнения (П1), является, как известно, некорректно поставленной задачей. Для решения подобной задачи разработано множество методов. Одним из эффективных является статистический метод генетического поиска, в котором обращение (П1) сводится к решению задачи оптимизации

$$\sum_i \left( \sigma_a(\lambda_i) - \int_0^\infty f(a, \mathbf{p}) \beta_a(\lambda_i, a, m(\lambda_i)) da \right)^2 \rightarrow \min, \quad (\text{П2})$$

где функция  $f(a, \mathbf{p})$  является функцией заданного вида с параметрами  $\mathbf{p}$ . В качестве модельных коэффициентов преломления  $m(\lambda_i)$  были взяты значения, приведенные на рис. 5.

Для решения задачи оптимизации был использован генетический алгоритм  $GA(P^0, a, Fit, sl, cr, mm, sc)$  (рис. П1).

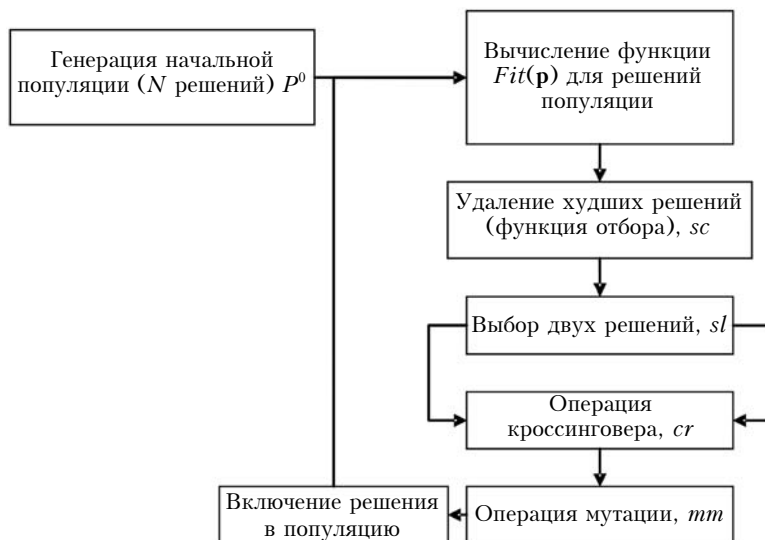


Рис. П1. Блок-схема генетического алгоритма

Искомая функция распределения  $f(a)$  представляется в виде суммы нескольких  $\gamma$ -функций с малой полушириной (суперпозиция вида (3) нескольких узких распределений). Здесь  $P^0$  – начальная популяция;  $a$  – количество элементов в популяции;  $Fit$  – функция фитнеса (функция полезности), определяющая «пригодность» решения;  $sl$  – селекция решений для создания нового решения;  $cr$  – оператор кроссинговера, определяющий возможность получения нового решения;  $mt$  – оператор мутации;  $sc$  – оператор отбора. Начальная популяция  $P^0$  – это множество начальных решений, принадлежащих пространству решений  $X \in D$ ,  $P^0$  генерируется случайным образом либо на основе априорных данных об искомом решении. Функция фитнеса определяется минимизируемым функционалом.

Селекция экземпляров уже существующих решений осуществляется для получения нового экземпляра и включения его в исходную популяцию (выборку). Эмпирически, выбор для кроссинговера с большей вероятностью наилучших решений ускоряет процесс сходимости к глобальному минимуму. Например, в соответствии с вероятностью

$$p_k = \frac{1}{Fit(X_k) \sum_{i=1}^r Fit(X_i)}, \quad k = \overline{1, r}$$

выбирают первое и второе решение  $k_1$  и  $k_2$ ,  $k_1 \neq k_2$  или

$$p_k = \frac{1}{Fit(X_k) \sum_{i=1}^r \frac{1}{Fit(X_i)}}, \quad k = \overline{1, r}.$$

Другая стратегия может заключаться в равновероятном выборе тех решений, для которых  $Fit(X_k) < Fit_{cp}$ , где  $Fit_{cp}$  – среднее значение функции фитнеса. После выбора образующих решений (предков) над ними проводится операция кроссинговера для создания нового решения (потомка). Кроссинговер может проводиться с помощью перекombинаций элементов векторов решений предков (рис. П2) или по формуле  $x_i^n = x_{k_1,i} \xi + x_{k_2,i} (1 - \xi)$ , где  $x_i^n$  –  $i$ -й элемент нового вектора решения;  $\xi \in [0, 1]$  – случайная величина, распределенная равномерно;  $x_{k_1,i}, x_{k_2,i}$  – образующие решения.

После того как новое решение создано, над ним проводится операция мутации, которая может осуществляться следующим образом:  $x_i = x_i + \delta$ ,  $i \in [1, N]$ , где  $N$  – размерность вектора решения,  $\delta$  – случайное малое значение,  $i$  выбираются из указанного диапазона, при этом вероятность изме-

нения большего числа элементов мала. Другим способом оператор мутации можно задать как  $x_i = \min_i + (\max_i - \min_i) \xi$ , где  $x_i \in [\min_i, \max_i]$ .

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix}$$

Рис. П2. Операция кроссинговера – перекombинация элементов векторов решений

После того как решение создано, оно добавляется в популяцию. Далее осуществляются отбор хороших решений или отбрасывание худших из популяции; данный процесс может происходить над одним или сразу несколькими решениями. Например, по условию  $Fit(X_k) > Fit_{cp}$  все решения отбрасываются, после чего кроссинговером и мутацией воссоздается новое множество решений. Отбор решений может осуществляться также в соответствии с вероятностью

$$p_k = Fit(X_k) / \sum_{i=1}^r Fit(X_i).$$

В нашей задаче функцию фитнеса можно представить в следующем виде:

$$Fit(\mathbf{p}) = \sum_i \left( \alpha_a(\lambda_i) - \int_0^{\infty} \sum_{j=0}^x A_j \exp\left(-\frac{(a-a_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \beta_a(\lambda_i, a, m(\lambda_i)) da \right)^2,$$

где  $\mathbf{p} = (x, A_0, a_0, \zeta_0, A_1, a_1, \zeta_1, \dots, A_{x-1}, a_{x-1}, \zeta_{x-1})$ .

Число функций также является неизвестным параметром поиска, значение которого при операции мутации выбрасывается всякий раз по экспоненциальному закону распределения:

$$F(x) = \begin{cases} q \exp(-qx), & x > 0; \\ 0, & x \leq 0, \end{cases}$$

где  $q$  – параметр распределения, определяющий среднее и дисперсию случайной величины;  $1/q$  – среднее,  $q > 0$ .

Датчик случайных чисел распределения находится по формуле  $x = \left[ -\ln\left(\frac{1-F}{q}\right) + 1 \right]$ , где квадратные скобки показывают округление до целых.

Также в качестве неизвестных параметров вводятся амплитуда и центр каждой  $\gamma$ -функции. Их полуширины  $\xi$  являются варьируемыми параметрами при  $\zeta \ll \max(a)$ , где  $a$  – радиус частиц.

### Заключение

Предложенная новая концепция оптической модели листа основана на решении задачи восстановления функции распределения частиц по размерам из экспериментального спектра поглощения листа. Для реализации данной задачи был использован генетический алгоритм. В результате решения обратной задачи было установлено, что оптически активная фракция частиц мезофилла имеет 2-модальную структуру. Средний радиус частиц моды 1  $r_s \approx 0,15$  мкм; это значение находится в области размеров частиц хлорофилла. Мода 2 имеет максимум в области  $r_l \approx 2,0$  мкм, что характерно для размеров хлоропласта в представлении эквивалентными сферами. Дополнительная мода 3 – воздушные пузырьки с  $r_b \approx 9,5$  мкм, которые не вносят существенного вклада в спектр поглощения и включены в модель нижнего слоя листа (пористая паренхима). Для расчета модельных оптических характеристик адаптирован известный алгоритм Т-матриц.

Проведенные численные расчеты радиационных характеристик растительного листа на основе предложенной концепции оптической модели для различной концентрации светопоглощающих пигментов (хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и каротиноидов), а также для разных толщин листа при сравнении показали хорошее совпадение расчетных кривых с известными экспериментальными данными.

Практическое приложение результатов настоящей работы связано с актуальной задачей дистанционного зондирования растительного покрова. Представленный подход к моделированию распространения излучения в сильнопоглощающих и сильноноссеивающих средах может быть также успешно применен для решения задач оптической диагностики в биологии, медицине, коллоидной химии и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 06-05-64799, 06-05-96962 и 07-01-00509).

1. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П. Аэрокосмические исследования почв и растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 230 с.
2. Verstraete M.M. Retrieving canopy properties from remote sensing measurements // *Imaging Spectrometry – a Tool for Environmental Observation*. Springer Netherlands, 1994. P. 109–123.
3. Kumar L., Schmidt K., Dury S., Skidmore A. Imaging spectrometry and vegetation science // *Imaging Spectrometry*. Netherlands, Kluwer Academic Publ. 2001. P. 111–155.
4. Chen Z., Ren J., Gong P., Zhang M. Monitoring and management of agriculture with remote sensing // *Ad-*

- vances in Land Remote Sensing. Springer Netherlands, 2008. P. 397–421.
5. Merzlyak M.N., Gitelson A.A., Chivkunova O.V., Solovchenko A.E., Pogosyan S.I. Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigment // *Rus. J. of Plant Physiol.* 2003. V. 50. N 5. P. 704–710.
6. Blackburn G.A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments // *J. of Experim. Botany.* 2007. V. 58. N 4. P. 855–867.
7. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sens. Environ.* 2002. V. 81. P. 337–354.
8. Zarco-Tejada P.J., Miller J.R., Harron J., Hu B., Noland T.L., Goel N., Mohammed G.H., Sampson P. Needle chlorophyll content estimation through model inversion using hyperspectral data from boreal conifer forest canopies // *Remote Sens. Environ.* 2004. V. 89. P. 189–199.
9. Pinter P.J., Hatfield J.L., Schepers J.S., Barnes E.M., Moran M.S., Daughtry C.S.T., Upchurch D.R. Remote Sensing for Crop Management // *Photogrammet. Eng. & Remote Sens.* June 2003. V. 69. N 6. P. 647–664.
10. Seager S., Turner E., Shafer J., Ford E. Vegetation's red edge: A possible spectroscopic biosignature of extraterrestrial plants // *Astrobiology.* 2005. V. 5. N 3. P. 372–390.
11. Yamada N., Fujimura S. Nondestructive measurement of chlorophyll pigment content in plant leaves from three-color reflectance and transmittance // *Appl. Opt.* 1991. V. 30. N 27. P. 3964–3973.
12. Mastroberti A., Mariath J. Leaf anatomy of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (Araucariaceae) // *Revista Brasil. Bot.* 2003. V. 26. N 3. P. 43–353.
13. Бердник В.В., Мухамедяров П.Д. Перенос излучения в листьях растений // *Оптика и спектроскопия.* 2001. T. 90. N 4. С. 652–663.
14. Govaerts Y.M., Jacquemoud S., Verstraete M.M., Ustin S.L. Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. N 33. P. 6585–6598.
15. Ellis J.R., Leech R.M. Cell size and chloroplast size in relation to chloroplast replication in light-grown wheat leaves // *Planta.* 1985. V. 165. P. 120–125.
16. Kasperbauer M.J., Hamilton J.L. Chloroplast structure and starch grain accumulation in leaves that received different red and far-red levels during development // *Plant Physiol.* 1984. V. 74. P. 967–970.
17. Willstaetter A., Stoll K. Untersuchungen über die Assimilation der Kohlensäure. Verlag-Springer, 1918. P. 122–127.
18. Sinclair T.R., Schreiber M.M., Hoffer R.M. Diffuse reflectance hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves // *Agronomy J.* 1973. V. 65. P. 276–283.
19. Ustin S.L., Jacquemoud S., Govaerts Y.M. Simulation of photon transport in a three-dimensional leaf: implications for photosynthesis // *Plant, Cell and Environ.* 2001. V. 24. P. 1095–1103.
20. Govaerts Y.M., Verstraete M.M. Raytran: a Monte-Carlo ray-tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media // *IEEE Trans.*

- Geosci. and Remote Sens. 1998. V. 36. N 2. P. 493–505.
21. *Baranoski G., Rokne J., Xu G.* Virtual spectrophotometric measurements for biologically and physically-based rendering // *The Visual Computer*. 2001. V. 17. N 8. P. 506–518.
  22. *Baranoski G.V.G.* Modeling the interaction of infrared radiation (750 to 2500 nm) with bifacial and unifacial plants leaves // *Remote Sens. Environ.* 2006. V. 100. P. 335–347.
  23. *Allen W.N., Gausman H.W., Richardson A.J.* Mean effective optical constant of cotton leaves // *J. Opt. Soc. Amer.* 1970. V. 60. P. 542–547.
  24. *Fukshansky L., Fukshansky-Kazarinova N., von Remisovsky A.M.* Estimation of optical parameters in a living tissue by solving the inverse problem of the multiflux radiative transfer // *Appl. Opt.* 1991. V. 30. N 22. P. 3145–3153.
  25. *Jacquemoud S., Baret F.* PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra // *Remote Sens. Environ.* 1990. V. 34. P. 75–91.
  26. *Jacquemoud S., Ustin S.L., Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G., Hosgood B.* Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model // *Remote Sens. Environ.* 1996. V. 56. P. 194–202.
  27. *Jacquemoud S., Bacour C., Poilve H., Frangi J.-P.* Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance – Direct and inverse mode // *Remote Sens. Environ.* 2000. V. 74. P. 471–481.
  28. *Ma Q., Ishimaru A., Phu P., Kuga Y.* Transmission, reflection, and depolarization of an optical wave for a single leaf // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 1990. V. 28. N 5. P. 865–872.
  29. *Ganapol B.D., Johnson L.F., Hammer P.D., Hlavka C.A., Peterson D.L.* LEAFMOD: a new within-leaf radiative transfer model // *Remote Sens. Environ.* 1998. V. 63. N 2. P. 182–193.
  30. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
  31. *Berdnik V.V., Loiko V.A.* Modeling of radiative transfer in disperse layers of a medium with a highly stretched phase function // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 1999. V. 61. N 1. P. 49–57.
  32. *Dunn A.K.* Modeling of light scattering from inhomogeneous biological cells / A. Hoekstra et al., eds. // *Optics of Biologic. Particles*. Berlin: Springer, 2007. P. 19–29.
  33. *Quirantes A., Bernard S.* Light-scattering methods for modeling algal particles as a collection of coated and/or nonspherical scatterers // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2006. V. 100. P. 315–324.
  34. *Quirantes A., Bernard S.* Light scattering by marine algae: two-layer spherical and nonspherical models // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2004. V. 89. P. 311–321.
  35. *Havemann S., Baran A.J.* Calculation of the phase matrix elements of elongated hexagonal ice columns using the T-Matrix method // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2004. V. 89. P. 87–96.
  36. *Baldini E., Facini O., Nerozzi F., Rossi F., Roton di A.* Leaf characteristics and optical properties of different woody species. Berlin: Springer-Verlag, 1997. V. 12. P. 73–81.
  37. *Holland J.H.* Adaptation in Natural and Artificial System. Michugan: MIT Press, 1992. 228 p.
  38. *Ye M., Wang S., Lu Y., Zhu Z., Xu Y.* Inversion of particle-size distribution from angular light-scattering data with genetic algorithms // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. P. 2667–2685.
  39. *Jones M.R., Brewster M.Q., Yamada Y.* Application of genetic algorithm to the optical characterization of propellant smoke // *J. Thermophys. Heat Transfer.* 1996. V. 10. P. 372–377.
  40. *Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.Н.* Оптические постоянные природных и технических сред. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 216 с.
  41. *Мухайлов Г.А.* К вопросу о построении экономичных алгоритмов моделирования случайных величин // *Ж. вычисл. мат. и мат. физ.* 1966. Т. 6. С. 1134–1136.
  42. *Razi Naqvi K., Merzlyak M.N., Melo T.B.* Absorption and scattering of light by suspensions of cells and sub-cellular particles: an analysis in terms of Kramers–Kronig relations // *Photochem. & Photobiol. Sci.* 2004. V. 3. P. 132–137.
  43. *Wozniak B., Wozniak S.B., Tyszka K., Dera J.* Modeling the light absorption properties of particulate matter forming organic particles suspended in seawater. Part 1. Model description, classification of organic particles, and example spectra of the light absorption coefficient and the imaginary part of the refractive index of particulate matter for phytoplankton cells and phytoplankton-like particles // *Oceanologia.* 2005. V. 47. N 2. P. 129–164.
  44. *Pailotin G., Leibl W., Gapinski J., Breton J., Dobek A.* Light gradients in spherical photosynthetic vesicles // *Biophys. J.* 1998. V. 75. N 1. P. 124–133.
  45. *Lienert B.R., Porter J.N., Sharma S.K.* Aerosol size distributions from genetic inversion of polar nephelometer data, [http://www.soest.hawaii.edu/lidar/polar\\_inversion\\_13a.htm](http://www.soest.hawaii.edu/lidar/polar_inversion_13a.htm)
  46. *Krekov G.M., Sukhanov A.Ya.* Application of artificial intelligence methods in remote sensing problems // *XV Int. Symp. on Atmos. and Ocean Optics. Atmos. Physics.* Krasnoyarsk, 2008. P. 100.
  47. *Mishchenko M.I., Hovenier J.W., Travis L.D.* Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications. San Diego: Academic Press, 2000. 396 p.
  48. *Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A.* Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles. Cambridge: University Press, 2002. 445 p.
  49. *Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я.* Оценка эффективности использования перспективных лидаров белого света для зондирования микрофизических параметров слоистой облачности: 3. Решение обратной задачи // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22 (в печати).
  50. <http://www.purchon.com/biology/chloroplasts/>
  51. *Twardowski M.S., Boss E., Macdonald J.B., Pegau W.S.* A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition // *J. Geophys. Res. C.* 2001. V. 106. N 7. P. 14129–14142.
  52. *Risovic D.* Two-component model of sea particle distribution // *Deep-Sea Res. Pt. 1.* 1993. V. 40. P. 1459–1473.
  53. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 255 с.
  54. <http://www.giss.nasa.gov/~cirmim>
  55. *Gilat A., Subramaniam V.* Numerical Methods with Matlab. Wiley, John & Sons, Inc., 2006. 624 p.

56. *Krekova M.M., Krekov G.M., Samokhvalov I.V., Shamanaev V.S.* Numerical evaluation of the possibilities of remote laser sensing of fish schools // *Appl. Opt.* 1994. V. 33. P. 5715–5720.
57. *Михайлов Г.А.* Некоторые вопросы теории методов Монте-Карло. Новосибирск: Наука, 1974. 142 с.
58. *Михайлов Г.А.* Оптимизация весовых методов Монте-Карло. М.: Наука, 2000. 187 с.
59. *Метод Монте-Карло в атмосферной оптике* / Под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.
60. *Evans K.F., Marshak A.* Numerical Methods, 3-D Radiative Transfer in Cloudy Atmosphere. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. P. 243–282.
61. *Креков Г.М., Орлов В.М., Белов В.В.* Имитационное моделирование в задачах оптического дистанционного зондирования. Новосибирск: Наука, 1988. 164 с.
62. *Sims D.A., Gamon J.A.* Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sens. Environ.* 2002. V. 81. P. 337–354.

*G.M. Krekov, M.M. Krekova, A.A. Lisenko, A.Ja. Sukhanov.* **Radiation characteristics of a plant leaf.**

The paper overviews the available radiation models of a leaf. A new idea of the leaf optical model is proposed as a multiphase system containing three aggregate ensembles of particles, which differ greatly in their microphysical and optical characteristics. The basis for the proposed model is the solution of the problem of reconstruction of the function of the particle size distribution from the leaf absorption experimental spectrum. On the basis of the developed by the authors microphysical model of a plant leaf the spectra of the optical radiation reflection and transmission were calculated in the range from 400 to 800 nm for different relative concentration of luminous absorbing pigments (chlorophyll *a,b* and carotins) as well as for different leaf thicknesses. The optical radiation propagation was modeled performed by the Monte-Carlo stochastic method. The results of modeling are in good agreement with the known experimental spectra.