

ГОНИОФОТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ И СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ

И. И. Бручковский*, О. О. Силук, Г. С. Литвинович,
А. А. Ломако, В. В. Станчик, С. И. Гуляева

УДК 535.346.1;535.34:582.47

Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
220045, Минск, Беларусь; e-mail: bruchkovsky2010@yandex.ru

(Поступила 27 ноября 2020)

Описана конструкция автоматизированного лабораторного гониофотометра CHERRY (Chlorophyll Estimation and Reflectance Registration sYstem), предназначенного для измерений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ(λ)) хвои в диапазоне 400–2500 нм и количественного анализа содержания цветных пигментов в хвое в диапазоне 400–700 нм. Гониофотометр CHERRY позволяет проводить измерения двух типов: гониометрические, при которых измеряется КСЯ(λ) излучения, отраженного от исследуемого образца в вертикальном направлении, и фотометрические, при которых измеряется коэффициент пропускания прямого излучения, прошедшего через кювету с раствором пигментов. Результаты измерений КСЯ(λ) еловой хвои *Picea abies* в области 400–700 нм показывают различия до 15 % при использовании протяженного и квазипараллельного источников. Вегетационный индекс *Vog2* для здоровой хвои варьируется от –0.45 до –0.34 при различных способах размещения образца и от –0.42 до –0.39 при разных ориентациях поляроида для выбранного способа размещения образца. Влияние лабораторного источника излучения на КСЯ(λ) хвои в диапазоне 470–770 нм подтверждает относительное отклонение измеряемых КСЯ(λ) до 5 % за 2 ч измерений. Количественные измерения показывают, что в образце здоровой хвои исследуемых пигментов содержится на 30 % больше, чем в образце хвои дерева в состоянии стресса.

Ключевые слова: гониофотометр, коэффициент спектральной яркости, лабораторные измерения оптических параметров хвойных.

We describe the design of an automated laboratory goniophotometer CHERRY (Chlorophyll Estimation and Reflectance Registration sYstem) intended for measuring the spectral reflectance coefficients of coniferous needles in the spectral range 400–2500 nm and the quantitative analysis of the content of colored pigments in needles in the spectral range 400–700 nm. The CHERRY goniophotometer permits to carry out two types of measurements: goniometric ones, in which the spectral reflectance is measured from the test sample in the vertical direction, as well as photometric ones, in which the transmittance of the direct radiation passed through a cuvette with a pigment solution is measured. The spectral reflectance measurements of spruce needles (*Picea abies*) in the spectral range 400–700 nm showed differences up to 15 % by employing extended or quasi-parallel sources. The vegetation index *Vog2* for healthy needles is varied from –0.45 to –0.34 for different types of the sample location and from –0.42 to –0.39 for different orientations of the polarizer for the selected way of placing the sample. A relative deviation of the measured spectral reflectance in the spectral range 470–770 nm up to 5 % for 2 hours of measurements confirms the influence of the lab radiation source on the spectral reflectance of the needles. Quantitative measurements show that the sample of healthy needles contains 30 % more of the studied pigments than the sample of needles from a tree in a state of stress.

goniophotometer for measurements of spectral reflectance coefficients and transmission spectra

I. I. Bruchkovski*, V. A. Siliuk, H. S. Litvinovich, A. A. Lamaka, V. V. Stanchyk, S. I. Guliaeva
(A. N. Sevchenko Institute for Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, 220045, Belarus; e-mail: bruchkovsky2010@yandex.ru)

Keywords: *goniophotometer, spectral reflectance function, laboratory measurements of optical parameters of conifers.*

Введение. Для дистанционного зондирования актуально восстановление коэффициентов спектральной яркости КСЯ(λ) природных объектов в лабораторных условиях с целью расчета по ним характеристических вегетационных индексов для сопоставления с результатами авиационных и спутниковых измерений. Интерес представляет дистанционный мониторинг состояния хвойных лесов Беларуси [1], поскольку в последние десятилетия оно значительно ухудшилось вследствие изменения климатических условий, что привело к распространению заболеваний (вершинного короеда и др.). Один из способов противодействия распространению заболеваний древостоев — раннее обнаружение очагов поражения, поэтому актуальны поиск и расчет характеристических вегетационных индексов. Характеристические вегетационные индексы могут быть получены в результате спектрометрических измерений исследуемых образцов хвои. С точки зрения измерений оптических характеристик иглы хвойных деревьев — одни из наиболее сложных природных объектов, так как они анизотропны, имеют очень низкие коэффициенты отражения, гляцевую поверхность благодаря наличию воскового слоя [2] и малый размер. Кроме того, в лабораторных условиях увеличение мощности источника освещения с целью повышения уровней регистрируемого сигнала может приводить к перегреву образца, из-за чего происходит изменение КСЯ(λ) до 9 % [3].

Для измерений оптических характеристик природных объектов в лабораторных условиях применяются различные гониофотометрические установки, большинство из которых имеют особенности, связанные со спецификой исследуемых объектов. Эти особенности касаются конструктивных деталей и алгоритмов работы гониофотометра, который в общем случае позволяет измерять [4] двуправленный коэффициент спектрального отражения, как, например, гониофотометры ONERA [5] и EGO [6].

Цель настоящей работы — создание автоматизированного лабораторного гониофотометра CHERRY (CHlorophyll Estimation and Reflectance Registration sYstem), оптимизированного для измерений оптических характеристик хвои и получение с его помощью измерений КСЯ(λ) образцов хвои ели *Picea abies* для надирной геометрии визирования и количественных измерений цветных пигментов в образцах хвои, взятых с деревьев, имеющих различную степень усыхания.

С помощью гониофотометра CHERRY возможно определение в автоматическом режиме как КСЯ(λ), так и содержания хлорофилла и других цветных пигментов в навеске, взятой из образца. Измерения цветных пигментов в навеске, как и измерения КСЯ(λ), осуществляются с помощью одного и того же спектрометра с целью минимизации инструментальных погрешностей. Отличия гониофотометра CHERRY от аналогов — наличие фотометра, специализация на спектрометрировании игл хвои и компактные размеры.

Описание установки CHERRY. Гониофотометр CHERRY состоит из гониометра и фотометра. Гониометрическая часть предназначена для проведения измерений КСЯ(λ) исследуемых объектов в надирной геометрии визирования для различных углов возвышения имитатора солнца. В качестве осветителя применялась комбинация квазипараллельного источника (имитатор солнца) и диффузного источника (имитатор неба), причем относительная освещенность, создаваемая имитатором неба, может быть изменена путем регулировки силы питающего постоянного тока.

В имитаторе солнца осветитель представляет собой галогеновую лампу накаливания, коллимирующий объектив размещен таким образом, чтобы обеспечить квазипараллельность (угол расходимости 1.7°) и однородность светового пучка, сферическое зеркало служит для увеличения плотности потока энергии в световом пучке. Для эффективного отвода тепловой энергии от осветителя и объектива применяются два теплообменника, в которые доставляется вода по трубкам. Имитатор солнца предназначен для воспроизведения геометрии освещения для измерения КСЯ(λ), которая соответствует освещению прямым солнечным излучением, для зенитных углов солнца 80—16°.

Имитатор неба состоит из 28 белых светодиодов, зеркального отражателя и диффузного рассеивателя, выполненного в качестве сегмента сферической поверхности, равномерно окружающей исследуемый образец. Назначение имитатора неба — создание геометрии освещенности, приближенной к естественным условиям в области 400—800 нм, для измерения КСЯ(λ), что соответствует геометрии освещения при сплошной облачности. В качестве белых светодиодов применены STW9C2SB-S (Seoul Semiconductor Co., Ltd., Корея) с цветовой температурой 5650 K, так как их спектр излучения приближен к спектру солнца.

На рис. 1 представлены спектральные плотности энергетической яркости (СПЭЯ) излучения, получаемого с помощью вышеописанных источников на гониофотометре, в сравнении с естественными условиями освещения на белой диффузной пластинке. Регистрация СПЭЯ проводилась с использованием малогабаритного спектрометра ССП-600Н [7]. Как видно, СПЭЯ, получаемые с помощью источников излучения гониофотометра, в ~ 2 — 10 раз меньше, чем СПЭЯ диффузной пластины, измеренные в естественных условиях в летний день, что обеспечивает щадящий тепловой режим для спектрометрирования исследуемых объектов.

Общая схема гониофотометра представлена на рис. 2. Исследуемый образец, расположенный на вращающейся платформе 5, освещается или имитатором солнца 18—20, или имитатором неба 7—9. Отраженный от образца оптический сигнал направляется плоским зеркалом 15 в систему освещения входной щели 14 (представляет собой объектив диаметром 45 мм с фокусным расстоянием 170 мм) спектрометра 10 так, что реализуется надириная геометрия измерений спектров отражения образца с углами поля зрения спектрометра $3.30 \times 0.23^\circ$ (вдоль и поперек щели спектрометра). Система освещения входной щели также имеет барабан, содержащий четыре светофильтра 14, которые устанавливаются в зависимости от регистрируемого интервала длин волн и служат для подавления сигналов высших порядков дифракции. Перед системой освещения входной щели может быть установлен поляризатор 6 (Edmund Optics Inc., США). Далее излучение попадает в спектрометр Solar M150 (СОЛАР ЛС, Беларусь), построенный по схеме Черни—Тернера, где осуществляется его разложение в спектр с помощью одной из трех плоских дифракционных решеток (1200, 600 и 300 штр/мм), после этого спектр направляется на одну из двух ПЗС-матриц для работы в видимом (400—1050 нм) или ИК (1—2.5 мкм) диапазонах с помощью автоматизированного плоского зеркала 12.

Для работы в диапазоне 400—1050 нм применяется охлаждаемая ПЗС-матрица 11 (Hamamatsu S7031-1006S (размер пикселя 24 мкм, количество пикселей 1024×58 , разрядность 16 бит), что позволяет регистрировать спектр с разрешением 1.5—2.9 нм. Для измерения спектра в диапазоне 400—1050 нм используются семь различных положений двух решеток (1200 и 600 штр/мм), каждое из которых характеризуется длиной волны λ_c , приходящейся на центральный пиксель детектора, и регистрируемым диапазоном $\Delta\lambda$. Для дальнейшей обработки выбираются участки спектра из поддиапазона $\Delta\lambda'$. Центральные длины волн λ_c и $\Delta\lambda'$ подобраны экспериментально и приведены в табл. 1.

Для измерения спектров в диапазоне 1—2.5 мкм применяется метод попиксельной регистрации, т. е. спектрометр работает в режиме сканирующего монохроматора, а в качестве детектора используются три пикселя детектора 13 (охлаждаемая ПЗС-матрица Hamamatsu G9208-256, размер пикселя 50×250 мкм, 256 пикселей, разрядность 16 бит), что позволяет регистрировать спектр с разрешением 10 нм. Для юстировки оптической схемы гониофотометра и привязки поля зрения спектрометра 10 к положению образца используются камера 16 и юстируемый полупроводниковый лазер 17, что позволяет провести обрисовку границ поля зрения спектрометра на изображении образца. Положение имитатора солнца контролируется с помощью моторизованной поворотной оптической платформы, как и введение образца 5 в поле зрения спектрометра. Переключение детекторов с помощью зеркала 12, управление спектрометром (ширина входной щели, выбор дифракционной решетки, центральной длины волны, установка полосового фильтра) и детекторами осуществляются в автоматическом режиме.

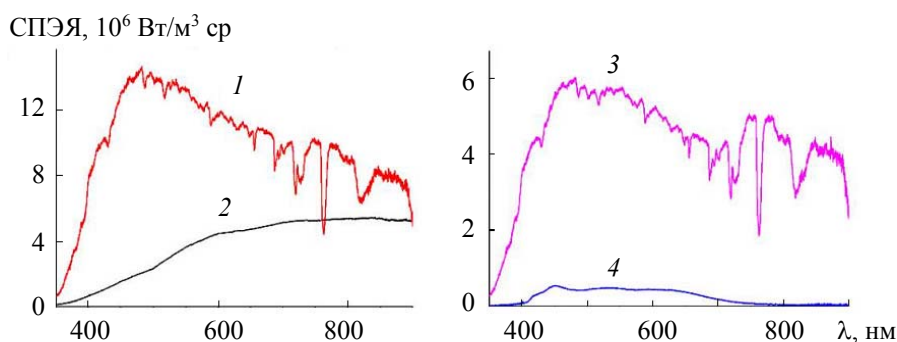


Рис. 1. СПЭЯ в солнечный (1) и в пасмурный (3) день, получаемая с помощью имитатора солнца (2) и имитатора неба (4)

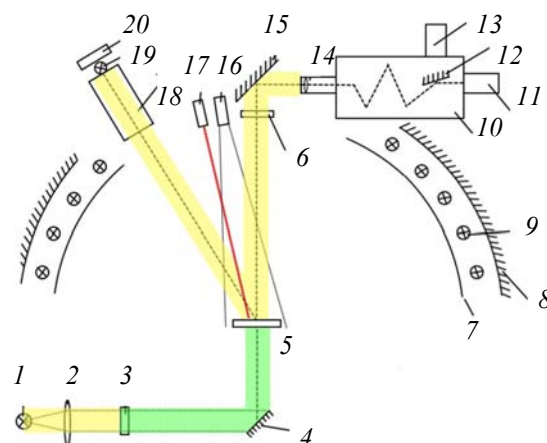


Рис. 2. Схема гониофотометра CHERRY: 1, 19 — источники излучения; 2 — собирающая линза; 3 — кювета с раствором пигментов; 4, 15 — плоское зеркало; 5 — вращающаяся платформа; 6 — поляриод; 7 — диффузный рассеиватель; 8 — зеркальный отражатель; 9 — светодиод белый; 10 — спектрометр M150; 11 — детектор на диапазон 0.4—1.0 мкм; 12 — зеркало выбора детектора; 13 — детектор на диапазон 1.0—2.5 мкм; 14 — система освещения входной щели спектрометра; 16 — камера; 17 — красный лазер; 18 — коллиimator; 20 — вогнутое зеркало

Т а б л и ц а 1. Настройки спектрометра Solar M150

Спектр отражения образца и диффузной пластинки							
λ_c , нм	460	480	515	560	660	770	890
$\Delta\lambda'$, нм	400—437	420—461	457—570	503—614	606—711	647—888	770—1005
$\Delta\lambda$, нм	400—517	420—536	457—570	503—614	606—711	647—888	770—1005
Спектр пропускания (ацетон и вытяжка)							
λ_c , нм	460		560		660		770
$\Delta\lambda'$, нм	400—517		503—614		606—711		720—816

Таким образом, гониофотометр CHERRY позволяет проводить измерения КСЯ(λ) природных объектов в надирной геометрии визирования для условий освещения как имитатором прямого солнечного излучения, так и протяженным источником, имитирующим излучение небесной сферы, в диапазоне 0.4—2.5 мкм для зенитных углов солнца 80—16°. Наличие съемного поляроида 6 позволяет исследовать вариации коэффициента деполаризации отраженного от объекта излучения.

Фотометрическая часть установки CHERRY предназначена для регистрации спектров пропускания в диапазоне 400—750 нм раствора вытяжки игл, находящегося в кювете, и состоит из элементов 1—4 (рис. 2). Излучение квазиточечного источника 1 размером 0.5×0.5 мм коллимируется в квазипараллельный пучок с помощью собирающей линзы 2, проходит через кварцевую кювету с раствором пигментов 3, после чего зеркалами 4 и 15 направляется в спектрометр 10. В качестве источника излучения 1 выбран светодиод STW9C2SB-S, так как в отличие от лампы накаливания он не оказывает теплового воздействия на кювету с раствором, вследствие которого конвективные потоки в кювете с исследуемыми пигментами 3 создают изменяющийся во времени оптический сигнал.

Для перевода гониофотометра в режим фотометра необходимо сместить вращающуюся платформу 5 в сторону и включить источник 1, после чего появляется возможность регистрировать спектры пропускания кюветы 3.

Методики измерений и расчетов. Для измерения КСЯ(λ) исследуемых объектов помимо регистрации спектра объекта используется опорный спектр белой диффузной пластинки. Опорный спектр регистрируется для каждого спектра отражения объекта путем замены объекта белой диффузной пластинкой, что реализовано с помощью моторизованной платформы. Рассчитываются КСЯ(λ) для видимого и ИК-диапазонов:

$$КСЯ(\lambda) = \frac{\text{Spec}_{\lambda}^{\text{obj}} k_1}{\text{Spec}_{\lambda}^{\text{ref}} k_2}, \quad (1)$$

где $\text{Spec}_{\lambda}^{\text{obj}}$ — спектр отражения объекта, ед. АЦП; $\text{Spec}_{\lambda}^{\text{ref}}$ — опорный спектр, ед. АЦП; k_1, k_2 — поправки к линейности по экспозициям для спектра отражения объекта, которые найдены для обоих детекторов спектрометра Solar M150 в ходе отдельной калибровочной процедуры и считаются известными.

В качестве образцов выбраны иглы ели обыкновенной, для которых определялись КСЯ(λ). Иглы отделялись от еловой лапки и по возможности изотропно насыпались на платформу 5 (рис. 2) размерами 90×90 мм слоем 6—8 мм. При исследовании растительных объектов оптическими дистанционными методами используют также вегетационные индексы, рассчитываемые как комбинации КСЯ(λ) на определенных длинах волн, описано более 300 индексов [8]. Для сравнительного анализа влияния поляризации и способов расположения образца рассчитан индекс Фогельмана для красной границы [9] как одна из оптических характеристик, пригодная для оценки состояния растительности:

$$\text{Vog2} = \frac{\text{КСЯ}_{734\text{нм}} - \text{КСЯ}_{747\text{нм}}}{\text{КСЯ}_{715\text{нм}} + \text{КСЯ}_{726\text{нм}}}. \quad (2)$$

Поскольку поверхность хвои покрыта тонким слоем фотоактивного воска [2], который влияет на оптические свойства исследуемого объекта, важно не изменить его характеристики в процессе измерений. Например, тепловое воздействие искусственного источника излучения может влиять на оптические свойства объекта вследствие возможного повреждения поверхностной структуры воска и потери объектом влаги.

В естественных условиях оптические свойства игл здорового дерева могут изменяться по совокупности причин: время года, возраст дерева, тип и увлажненность почвы, особенности питания и режима освещения, усыхание вследствие различных заболеваний (корневые гнили, вершинный короед и т. д.). Отделенные от дерева иглы постепенно изменяют свои оптические свойства из-за распада находящихся в них пигментов, что особенно интенсивно происходит при повышении температуры и экспозиции освещением, поэтому время транспортировки и хранения образцов сводилось к минимуму, а также уменьшалась мощность источника с сохранением возможности регистрации слабого отраженного сигнала. Для изучения распада пигментов внутри образца зарегистрированы спектры отражения в диапазонах 410—527 и 647—888 нм (с шагом 0.11 и 0.23 нм) в течение 2 ч без изменения положения образца и определены функции $\varepsilon(t)$:

$$\varepsilon(t) = \left| \frac{\text{КСЯ}(\lambda, t=0) - \text{КСЯ}(\lambda, t)}{\text{КСЯ}(\lambda, t=0)} \right| 100\%, \quad (3)$$

где $\varepsilon(t)$ — отклонения КСЯ(λ, t) в момент времени t от КСЯ($\lambda, t=0$) в начальный момент времени $t=0$.

Эксперименты по количественному определению содержания цветных пигментов в образцах хвои проведены по стандартной методике [10]. Для приготовления вытяжки, содержащей цветные пигменты, в качестве растворителя использован ацетон; небольшое количество хвои взвешивалось, измельчалось и настаивалось в течение нескольких часов, полученный раствор фильтровался и регистрировались спектры пропускания вытяжки. Нормировка оптической плотности раствора проведена по соответствующей плотности, рассчитанной как отношение массы измельченной хвои к объему растворителя.

Как для измерений КСЯ(λ), так и для регистрации спектров пропускания вытяжки пигментов использованы экспериментально подобранные настройки (табл. 1) параметров работы спектрометра M150 для обеспечения минимального разброса КСЯ(λ) на границах используемых интервалов. Для регистрации спектров отражения взята ширина входной щели 250 мкм, для пропускания 40 мкм. Время экспозиции 8—1500 мс в зависимости от центральной длины волны, типа и состояния изучаемого объекта. Для диапазона 1—2.5 мкм время экспозиции 100 мс.

Результаты и их обсуждение. На рис. 3, а представлены КСЯ(λ) хвои для видимого диапазона, полученные при различных способах освещения образца. Как видно, КСЯ(λ), полученные при освещении только протяженным источником (аналог облачности), значительно отличаются от полученных при освещении квазипараллельным источником (аналог прямого солнечного излучения), причем отличие может достигать 15 %.

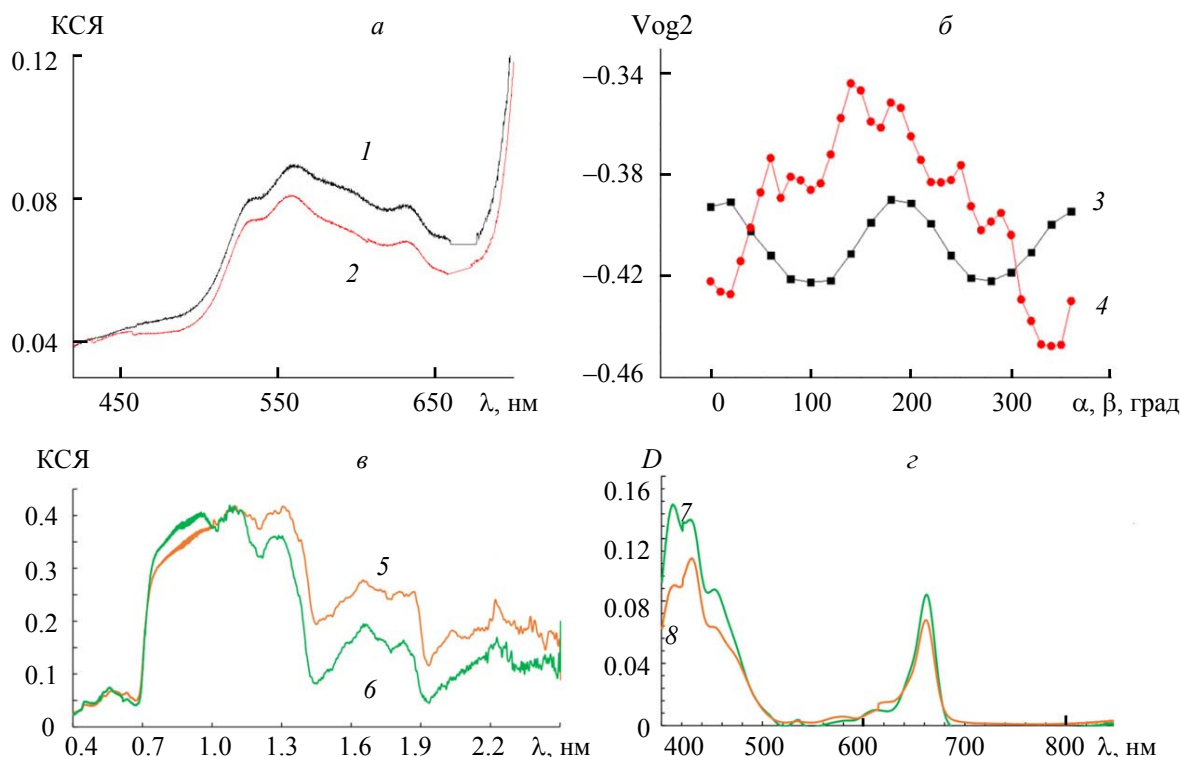


Рис. 3. Результаты измерений оптических свойств игл ели: *а* — КСЯ(λ) хвои при освещении образца протяженным (1) и квазипараллельным источниками (2); *б* — зависимость индекса Vog2 от ориентации поляроида α для фиксированного положения образца (3) и для различных угловых положений образца β без поляроида (4); *в* — спектры КСЯ(λ) большой (5) и здоровой хвои (6); *г* — нормированная оптическая плотность D здоровой (7) и больной хвои (8)

Отраженное от образца излучение частично поляризовано и может нести информацию как о микрофизическом состоянии, так и о степени и направлении преимущественной ориентации игл. Для изучения степени изменчивости КСЯ(λ) при различных положениях поляроида зарегистрированы спектры отражения для различных образцов хвои, которые располагались на вращающейся платформе 5 (рис. 2). Даже при изотропном способе расположения образца имеются вариации КСЯ(λ) в зависимости от поворота площадки. На рис. 3, б представлены значения Vog2 при различных положениях образца и поляроида (всего изучалось 36 положений с шагом 10° поворота β образца вокруг своей оси), а также в зависимости от ориентации поляроида α для одного положения образца.

В частности, индекс Vog2, рассчитанный для излучения, линейно поляризованного в плоскости входной щели спектрометра, на 8 % отличается от рассчитанного для излучения, линейно поляризованного в плоскости, перпендикулярной входной щели спектрометра (рис. 3, б, кривая 3). Способ ориентирования образца также оказывает влияние на индекс, разброс значений может достигать 25 % (рис. 3, б кривая 4). Поэтому для усреднения разброса регистрируемых значений из-за положения образца использован метод регистрации спектров отражения вращающегося вокруг вертикальной оси образца, усреднение проводилось по 40 измерениям (количество определялось опытным путем). Зависимости усредненных по азимуту КСЯ(λ) для образцов большой и здоровой хвои представлены на рис. 3, в, экспериментальные данные нормированной оптической плотности растворов вытяжки здоровой хвои и хвои в состоянии стресса — на рис. 3, г, где можно идентифицировать линии поглощения хлорофиллов в красной области (645—662 нм). Под нормированной оптической плотностью $D(\lambda)$ понимается сумма произведений сечения поглощения пигментов $\sigma_i(\lambda)$ и их концентрации c_i , отнесенной к единице массы игл m , использованных для получения вытяжки:

$$D(\lambda) = \frac{1}{m} \sum_i \sigma_i(\lambda) c_i l, \quad (4)$$

где l — длина кюветы. В табл. 2 представлены восстановленные концентрации хлорофилла a , хлорофилла b и каротиноидов по методике [10] для вышеприведенных значений оптической плотности. Видно ожидаемо большее количественное содержание пигментов в образце здоровой хвои по сравнению с их содержанием в образце хвои дерева в состоянии стресса (больной), относительная разница 30 %. Результаты эксперимента по определению теплового воздействия имитатора солнца на свежие еловые иглы в зависимости от длины волны, а также относительные отклонения $\varepsilon(t)$, рассчитанные по формуле (3), представлены на рис. 4.

Т а б л и ц а 2. Концентрации (мкг/г) цветных пигментов в различных образцах хвои

Хвоя	Хлорофилл a	Хлорофилл b	Каротиноиды
Здорового дерева	1.13	0.432	0.316
Дерева в состоянии стресса	0.716	0.246	0.199

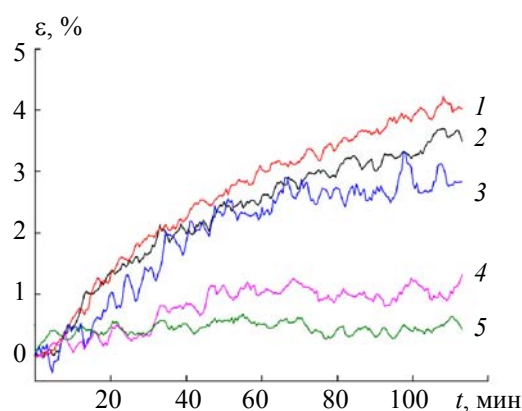


Рис. 4. Зависимости отклонений ε значений КСЯ на длинах волн от времени нагрева t 500 (1), 470 (2), 690 (3), 720 (4) и 770 нм (5)

Таким образом, для проведения корректных измерений характеристических вегетационных индексов образцов хвои рекомендуется использовать методику, принимающую во внимание следующие эффекты: влияние частичной поляризации, положение образца и длительность теплового воздействия. При работе с гониофотометром CHERRY хорошо зарекомендовала себя методика, в основе которой лежит непрерывное вращение образца вокруг своей оси во время регистрации спектров отражения, усреднение и минимизация теплового воздействия имитатора солнца на образец. Измерения в таком случае совершаются при различных случайных положениях вращающегося образца.

Заключение. Описаны конструктивные особенности гониофотометра CHERRY, предназначенного для измерений коэффициентов спектрального отражения природных объектов и содержания в них цветных пигментов. Отличительные особенности гониофотометра CHERRY по сравнению с некоторыми аналогичными устройствами: регистрация спектров исследуемого образца в видимом и ближнем ИК-диапазонах осуществляется через одну и ту же систему освещения входной щели, поэтому геометрия визирования для каждого из спектральных диапазонов остается неизменной, что обеспечивает непрерывность коэффициента спектральной яркости на стыке диапазонов; существует возможность прецизионной юстировки поля зрения спектрометра за счет поворота плоского зеркала в схеме гониометра в двух плоскостях; для отвода тепла от лампы накаливания, используемой в качестве имитатора солнца в схеме гониометра, применяется система водяного охлаждения, что позволяет проводить измерения при лучшей стабильности источника в сравнении с технологией воздушного охлаждения; наличие лазера и фотокамеры позволяет осуществлять привязку поля зрения спектрометра к расположению исследуемого объекта, что имеет значение после изменения ширины входной щели спектрометра или положения зеркала; наличие вращающейся платформы, на которой размещается исследуемый образец, предоставляет возможность получения усредненного коэффициента спектральной яркости образца; регистрация спектров, изменение положения объекта исследования и вращение вокруг своей оси, изменение угла возвышения имитатора солнца, введение в поле зрения

спектрометра иного объекта исследования, а также измерение коэффициента спектральной яркости проводятся в автоматическом режиме.

Из анализа результатов измерения коэффициента спектральной яркости игл ели следует, что для данного типа объекта имеет значение геометрия источника излучения: различия восстанавливаемых коэффициентов спектральной яркости для квазипараллельного или протяженного источника могут составлять до 15 %. Применяемая геометрия освещения в лабораторных условиях должна соответствовать решаемой задаче. Влияние лабораторного источника излучения на коэффициент спектральной яркости игл хвой показывает относительное отклонение измеряемых коэффициентов спектральной яркости до 5 % за 2 ч измерений для отдельных длин волн.

Количественные измерения цветных пигментов в различных образцах хвой свидетельствуют о том, что в образце здоровой хвой хлорофиллов и каротиноидов содержится на 30 % больше, чем в образце хвой дерева в состоянии стресса. Вариации вегетационного индекса *Vog2* по результатам измерений для здоровой хвой составили от -0.45 до -0.34 при разных способах размещения образца и от -0.42 до -0.39 при различных углах ориентации поляроида для выбранного способа размещения образца.

- [1] **A. Richardson, G. Berlyn, S. Duigan.** *Tree Physiology*, **23** (2003) 537—544
- [2] **Е. Р. Буханов, А. В. Шабанов, М. Н. Крахалев, М. Н. Волочаев, Ю. Л. Гуревич.** *Уч. зап. физ. факультета Москов. ун-та*, **5** (2019) 1—6
- [3] **S. Sandmeier, D. Deering.** *Remote Sens. Environ.*, **69** (1999) 281—295
- [4] **D. Combes, L. Bousquet, S. Jacquemoud, H. Sinoquet, C. Varlet-Grancher, I. Moyad.** *Remote Sens. Environ.*, **109** (2007) 107—117
- [5] **Y. Boucher.** *Proc. SPIE*, **3699** (1999) 16—26
- [6] **B. Hosgood.** *Goniometers, Encyclopedia of Electronical and Electronics Engineering*, New York, Wiley & Sons (1999) 424—433
- [7] **С. И. Бручковская, Г. С. Литвинович, И. И. Бручковский, Л. В. Катковский.** *Журн. прикл. спектр.*, **86**, № 4 (2019) 620—626 [**S. I. Bruchkouskaya, G. S. Litvinovich, I. I. Bruchkousky, L. V. Katkovsky.** *J. Appl. Spectr.*, **86** (2019) 671—677]
- [8] <https://www.indexdatabase.de/db/i.php>
- [9] **J. E. Vogelmann, B. N. Rock, D. M. Moss.** *Int. J. Remote Sens.*, **14**, N 8 (1993) 1563—1575
- [10] **H. K. Lichtenthaler, C. Buschmann.** *Chlorophylls and Carotenoids – Measurement and Characterization by UV-Vis/Current Protocols in Food Analytical Chemistry* (2001) F4.3.1–F 4.3.8