

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 578.088: (53.082.5 + 543.4 + 621.375.826)

Б.Г. Агеев¹, А.П. Зотикова², В.А. Капитанов¹, А.В. Клишкин¹, В.М. Клишкин¹,
М.М. Макогон¹, Г.Г. Матвиенко¹, Ю.Н. Пономарев¹, Н.Л. Фатеева¹

Комплексный стенд оптической диагностики биосистем

¹Институт оптики атмосферы СО РАН,

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 13.09.2006 г.

Представлен комплекс аппаратуры для изучения абсорбционных, рассеивающих, флуоресцентных свойств вегетативных структур, процессов обмена малыми газовыми компонентами и аэрозолем между атмосферой и фитосообществом. Приведены некоторые новые результаты, полученные с помощью этого комплекса.

Мониторинг растительных покровов Земли — одна из актуальных проблем прогноза устойчивого развития современной цивилизации. Глобальность объекта исследований диктует применение дистанционных, в первую очередь оптических, средств получения информации о состоянии фитосистем.

Дистанционные методы исследования растительности основаны преимущественно на наблюдениях спектральных и интегральных величин отражения излучения растительными структурами. Наряду с относительной простотой проведения наблюдений следует признать, что пока они малоинформативны из-за недостаточной изученности природы спектров отражения. В последнее время разрабатываются новые методы зондирования, основанные на более полном учете процессов трансформации поглощенной растением энергии, проявляющихся, в частности, в широкополосной флуоресценции пигментов, входящих в фотосинтетический аппарат растений, в видимом и УФ-диапазонах спектра. Характерным примером является флуоресценция хлорофилла в живом листе, наблюдаемая в двух узких полосах при $\lambda = 685$ и 740 нм. Однако следует признать, что связи оптических свойств растительности с состоянием ее жизнедеятельности, маскируемые сезонным характером развития, исследованы крайне недостаточно. В частности, отсутствуют физические модели, связывающие параметры оптических сигналов, формируемых процессами взаимодействия излучения с фитосистемами, с общепринятыми характеристиками их структурно-функциональной организации.

Таким образом, на первый план выдвигается установление корреляционных связей между жизнедеятельностью фитосистем и их оптическими свойствами. Сформулируем наиболее важные задачи:

- изучение спектральных коэффициентов пропускания α , спектральных и интегральных индикаторов рассеяния листьев в отраженном и пропущенном излучении β , разработка методов определения спектров истинного поглощения τ живого листа как целого;
- экспериментальное определение параметров Стокса излучения, взаимодействующего с живым ли-

стом, и матриц переноса, несущих в себе наиболее полную информацию о листе как светорассеивающей среде;

— установление корреляционных связей между состоянием фотосинтетического аппарата растения и флуоресцентными свойствами (спектральным составом, интенсивностью, временами разгорания и тушения излучения и т.д.) крупных молекул, участвующих в процессах фотосинтеза;

— установление корреляционных связей состояния растения с характером его газообмена с атмосферой, в частности с эмиссией и стоком малых газовых компонентов атмосферы, с природой и интенсивностью генерации аэрозольных полей над растительными сообществами.

В Институте оптики атмосферы СО РАН создана аппаратура, составляющая в совокупности уникальную установку для изучения абсорбционных, рассеивающих и флуоресцентных свойств вегетативных структур. Установка позволяет также изучать процессы обмена малыми газовыми компонентами и аэрозолем между атмосферой и фитосообществом. В состав установки входит лидарная система, предназначенная для получения интегральных характеристик оптических сигналов, формируемых растениями, размещенными на местности, и приземным слоем атмосферы над ними. Объектами исследований служили растения, специально выращенные в контролируемых, определяемых целями исследований, условиях, а также взятые на модельных натуральных полигонах естественного роста. Имеющаяся аппаратура позволяет решать многие из указанных выше задач с единообразно полученным биологическим материалом, обрабатывать алгоритмы обработки зарегистрированных сигналов и интерпретацию установленных закономерностей.

Комплексный стенд был задуман и начал создаваться в 1998 г. сотрудниками ИОА СО РАН и биолого-почвенного факультета Томского государственного университета и в последующие годы постоянно развивался. За прошедшее время исследования, выполняемые на стенде, были поддержаны РФФИ (гранты № 96-

04-49150, 98-04-03099, 99-04-49085) и Программой СО РАН «Физика атмосферы и окружающей среды».

Установка включает в себя следующие аппаратные средства:

1) лидарную систему для натурального изучения интегральных по кроне флуоресцентных свойств хвойных и лиственных саженцев, выращенных в искусственных, заданных логикой эксперимента, условиях. Лидарная система позволяет также проводить исследование образцов растений природных фитосистем;

2) лидарную систему для натурального изучения как фоновых, так и созданных воздействием человека на фитосообщество молекулярно-аэрозольных образований (шапок) над выделенными участками растительности, в том числе для исследования изменений состава шапки при контролируемых физико-химических воздействиях на растения;

3) спектрометр с интегрирующей сферой для лабораторного изучения абсорбционных, рассеивающих и флуоресцентных свойств живого растительного материала;

4) лазерные газоанализаторы для исследования газообмена между атмосферой и фитосистемами на субфоновом уровне;

5) стенд-питомник (фитотрон) для подготовки растительного материала по заданным программам, обеспечивающий выращивание растений в контролируемых условиях и их тестирование общепринятыми средствами. Для натуральных работ имеются два лесных полигона.

Стенд как целое и его компоненты используются в настоящее время как по собственным программам, так и в режиме коллективного пользования. В перечисленном выше составе аппаратных средств комплексный стенд вошел составной частью в центр коллективного пользования Томского научного центра СО РАН, работающий на общественных началах.

Ниже представлены наиболее интересные, по мнению авторов, результаты исследований, выполненных в 2005–2006 гг.

1. На основе диодных и CO₂-лазеров разработаны уникальные по чувствительности и селективности оптико-акустические (ОА) анализаторы малых газовых компонентов атмосферы [1]. Высокая концентрационная чувствительность обусловлена использованием ОА-детекторов с резонансными ячейками, в том числе с дифференциальным резонатором Гельмгольца (ДРГ).

Газоанализаторы позволяют в реальном времени наблюдать дыхание растений на всех этапах их развития. Измерения автоматизированы с помощью персонального компьютера. Характеристики газоанализаторов представлены в табл. 1 и 2.

Список газов, детектируемых газоанализаторами такого типа, составляет несколько десятков наименований [2]. В качестве примера в табл. 1 и 2 приведены основные биогенные (CO₂, CH₄, NH₃) и наиболее распространенные загрязняющие газы. Данные по минимальным концентрациям получены при оснащении газоанализаторов однотипными ОА-детекторами (в случае CO₂-лазера — только однопроходным вариантом).

Таблица 1

Концентрации молекулярных газов, детектируемые ОА-газоанализаторами с диодными лазерами ближнего ИК-диапазона

Газ	Длина волны, мкм	Сечение поглощения, 10 ⁻²² см ²	C _{min} ⁽¹⁾ , ppmV	C _{min} ⁽²⁾ , ppmV
HF	1,330	820	0,45	0,03
HBr	1,341	118	3,2	0,2
H ₂ O	1,365	710	0,53	0,03
HI	1,541	10	37,2	2,3
CO	1,579	0,525	710	43
CO ₂	1,579	0,54	690	40
CH ₄	1,651	44,3	8,4	0,5
HCl	1,741	395	0,94	0,06
NO	2,67	36,5	10	0,6

Примечания: 1) Сечения поглощения рассчитаны по данным атласа HITRAN-04 для лоренцевского контура линии. 2) C_{min}⁽¹⁾ и C_{min}⁽²⁾ — минимальные детектируемые концентрации газов с микрофоном фирмы Knowless (тип ЕК1024) при мощности лазера 1 мВт для однопроходной и многоходовой ОА ДРГ ячеек соответственно [1]. 3) При использовании более чувствительного микрофона (например, фирмы Brüel&Kjaer типа ВК4144) значения C_{min}⁽¹⁾ и C_{min}⁽²⁾ могут быть уменьшены приблизительно в 30 раз [1].

Таблица 2

Детектируемые ОА-газоанализаторами концентрации молекулярных газов в области генерации CO₂-лазера

Газ	Волновое число, см ⁻¹	Сечение поглощения, 10 ⁻²⁰ см ²	C _{min} , ppbV · Вт
C ₂ H ₄	949,48	170	0,02
CH ₃ OH	1033,48	104	0,04
C ₂ H ₃ OH	1057,30	31,8	0,12
C ₆ H ₆	1037,43	11,1	0,34
NH ₃	1084,63	319	0,01
C ₂ H ₃ Cl	942,38	27,1	0,14
C ₆ H ₃ Cl	1084,63	12,9	0,30
C ₇ H ₈	1031,47	3,99	0,95
C ₅ H ₈	929,97	3,1	1,20
C ₈ H ₁₀	1031,47	2,25	1,70
C ₃ H ₆ O	920,83	1,26	3,00
C ₂ H ₅ Br	944,19	0,515	7,20
CH ₃ Cl	920,83	0,167	22,3

Для иллюстрации технологии и аналитических возможностей лазерных ОА-газоанализаторов в исследовании газообмена растений на рис. 1 представлены результаты исследования темнового дыхания хвои кедра по спектрам поглощения газовых проб в области генерации CO₂-лазера (источник излучения газоанализатора).

Биогенная газовая проба готовилась из хвои, отделенной от ветвей. Образцы хвои (навеска 10 г) помещались в затененную герметичную емкость объемом 0,5 л, заполненную воздухом. После темновой экспозиции длительностью 3 ч проводились забор газа из емкости и продувка им измерительной ячейки газоанализатора.

На рис. 1 представлены спектр поглощения полученной газовой пробы, а также предварительно зарегистрированные спектры поверочной газовой смеси

CO₂-N₂ (концентрация CO₂ — 5000 ppm) и комнатного воздуха, находившегося в емкости до помещения в нее образцов.

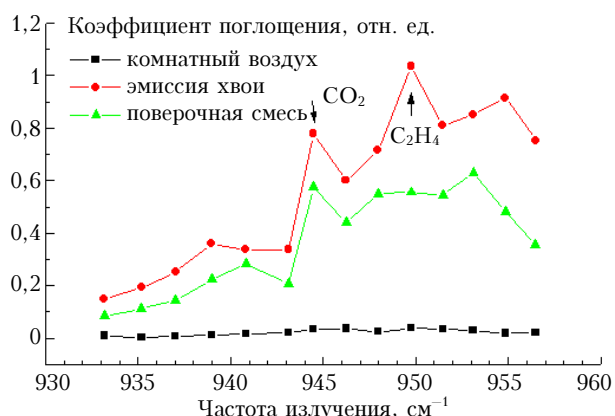


Рис. 1. Спектры поглощения газов в области излучения CO₂-лазера (P-ветвь полосы 10 мкм)

Трактуя наблюдаемые изменения газового состава в емкости как проявления темнового дыхания хвои при условиях проведения эксперимента, отметим, что оно сопровождается эмиссией не только углекислого газа (линия 10P(20); 944,194 см⁻¹), но и значительного количества этилена (этилен имеет характерный, показанный на рис. 1, пик поглощения на линии 10P(14); 949,479 см⁻¹ генерации CO₂-лазера).

2. Влияние такого стрессового фактора, как нарушение минерального питания, на древесную растительность и ее оптические свойства изучалось в следующем эксперименте. Почва, на которой росли пятiletние кедр, подвергалась нефтяному загрязнению, изучались изменение оптических свойств кроны и содержание в хвое хлорофилла как функции этого загрязнения. Содержание хлорофиллов и каротиноидов в фотосинтезирующей клетке является важным показателем реакции растений на изменение условий корневого питания и степени их адаптации к новым условиям [3, 4]. Саженьцы кедр были выращены в специальных полиэтиленовых пакетах с грунтом. Пакеты с растениями разместили на высоте 3,5 м в специально подготовленном коробе на расстоянии 70 м от лидара. Такое размещение позволило обеспечить достаточно высокое усреднение источников лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) по кронам кедров. Измерения ЛИФ проводились с помощью флуоресцентного лидара [5], при этом определялось отношение $f = E(685 \text{ нм}) / E(740 \text{ нм})$ сигналов флуоресценции хвои кедров в двух полосах шириной 2 нм с центрами в соответствии с [6] 685 и 740 нм. Содержание хлорофилла в хвое измерялось спектрофотометрическим методом. Выбор кедр в качестве объекта исследования обусловлен устойчивостью хвойных деревьев к атмосферным и гидрологическим изменениям.

Инструментальные измерения проводились в течение 40 дней (с середины июля до конца августа), визуальные наблюдения велись еще месяц, до конца сентября. Кедр, выращенные на одинаковой почве, в рамках эксперимента были разделены на две груп-

пы по 4 растения. Почва экспериментальной группы подвергалась периодическому (с периодом 10 дней) загрязнению, почва контрольной группы не подвергалась никаким искусственным воздействиям. Измерения ЛИФ хвои обеих групп растений проводились спустя 3 сут после внесения загрязнений в почву растений экспериментальной группы. Содержание хлорофилла в экспериментальных и контрольных образцах хвои измерялось в конце каждого временного периода.

В течение первого периода наблюдений за саженцами обеих групп никаких визуальных различий между ними не наблюдалось. Однако флуоресцентный отклик экспериментальных образцов к концу первого периода увеличился более чем в 1,5 раза (величина f изменилась от 1,82 до 2,94). Это различие, по-видимому, обусловлено первичными нарушениями в электрон-транспортной цепи фотосинтеза у экспериментальных образцов кедр: возрастание квантового выхода флуоресценции в этом случае обусловлено уменьшением эффективности первичных процессов фотосинтеза — поглощенная световая энергия не используется в фотосинтезе, поэтому интенсивность флуоресценции возрастает. В течение второго периода (рис. 2) происходило резкое уменьшение величины f . Это связано с протеканием адапционных процессов у растений в ответ на стрессовое воздействие. При дальнейшем росте объема нефтяного загрязнения (к концу третьего периода) у кедров экспериментальной группы появились визуально наблюдаемые изменения — желтая хвоя в нижнем ярусе кроны. Флуоресцентный отклик от экспериментальных образцов уменьшился, что, с одной стороны, вызвано частичным разрушением хлорофилла, с другой — соответствующей адаптацией растения к новым условиям корневого питания.

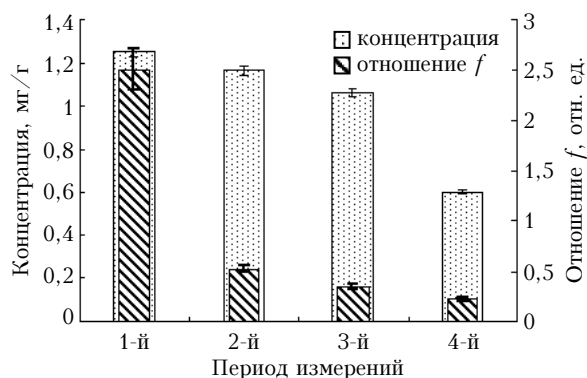


Рис. 2. Отношение сигналов флуоресценции $f = E(685 \text{ нм}) / E(740 \text{ нм})$ и концентрация хлорофилла экспериментальных саженцев кедр в течение 4 периодов после первого внесения нефтяного загрязнения в почву

К концу четвертого периода измерений экспериментальная группа кедр существенно визуально отличалась от растений контрольной группы. По-видимому, уровень воздействующего фактора — нефтяного загрязнения — превысил адапционные возможности кедр, что вызвало необратимый процесс деградации растения [7].

Диапазон изменения отношения сигналов флуоресценции растений в условиях нормального корневого питания соответствовал вегетационному ходу в июле и августе.

Поскольку перспективы развития дистанционных методов ЛИФ связаны с обнаружением предвизуальных стадий нарушений жизнедеятельности растений, то в первом периоде были сняты спектры флуоресценции кроны кедра (рис. 3).

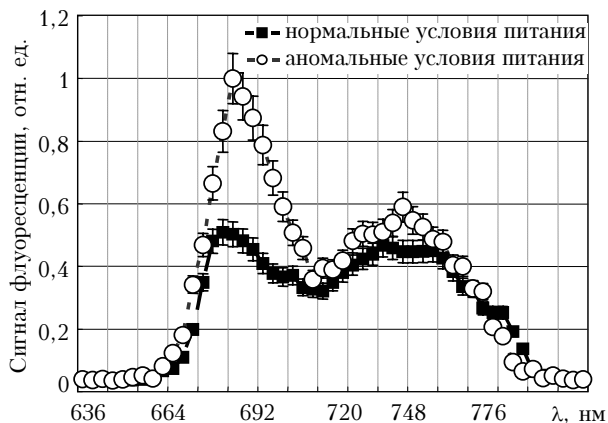


Рис. 3. Спектры флуоресценции контрольных и экспериментальных групп саженцев кедра, подверженных воздействию нефтяного загрязнения

Спектры получены с помощью развертки по длинам волн сигналов флуоресцентного лидара. Анализ полученных спектров свидетельствует о существенных вариациях значений флуоресценции в полосе 685 нм по сравнению со значениями на длине волны 740 нм. Такое перераспределение интенсивности сигнала внутри спектра обусловлено, по-видимому, уменьшением эффективности процессов фотосинтеза.

Экспериментальные данные, описанные в данной статье, согласуются с ранее полученными результатами измерений значений ЛИФ хвойных и лиственных деревьев Западной Сибири при увядании [8].

3. Наряду с модельными экспериментами были проведены исследования пигментного состава и состояния фотосинтетического аппарата растений в натуральных условиях. Объектом служили вечнозеленые растения, произрастающие в природных горных экосистемах Горно-Алтайского региона. Хотя регион в целом имеет очень низкую экологическую напряженность, но и на этой территории есть локальные места с загрязнением атмосферы: урбанизированная территория, автотрассы с большим потоком транспорта, места падения остатков частей ракет, запускаемых с космодрома Байконур, и др. В качестве растений-биоиндикаторов использовали ель сибирскую, сосну обыкновенную и кедр сибирский. Содержание пигментов определяли спектрофотометрически (рис. 4), состояние фотосинтетического аппарата — по времени выхода растений из зимнего покоя.

Содержание как хлорофилла a , так и хлорофилла b у всех исследованных видов растений, находящихся в нормальных условиях, на 25–100% выше, чем в условиях загрязнений (см. рис. 4). Отношение пигментов a/b также не оставалось одинаковым

в контрольных и опытных вариантах (это отчетливо проявлялось и в спектрах флуоресценции, см. п. 2), что свидетельствует о глубоких изменениях в хлорофилл-белковых комплексах мембран хлоропластов под влиянием атмосферного загрязнения.

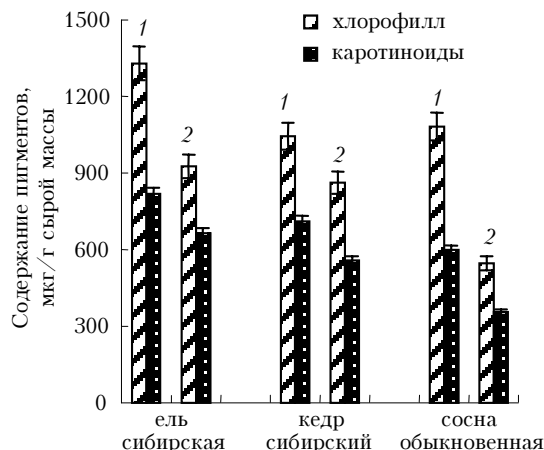


Рис. 4. Влияние воздушного загрязнения на содержание фотосинтетических пигментов в хвое древесных растений: 1 — содержание фотосинтетических пигментов в хвое древесных растений, выросших в нормальной атмосфере; 2 — при наличии в атмосфере примесей (городская среда)

Наряду с зелеными пигментами у деревьев, произрастающих в условиях городской среды, в среднем в 1,4 раза снижен пул каротиноидов. Кроме того, имеет место сильная видоспецифичность в реакции пигментного комплекса хвои к химическому загрязнению атмосферы. Величина отношения суммы зеленых пигментов к сумме желтых у ели и сосны уменьшалась на 15–20%, а у кедр в пределах погрешности измерений оставалась постоянной. В целом сосна оказалась менее устойчивой к воздушному загрязнению, чем ель и кедр. Поэтому представляется интересным провести исследования, описанные в п. 2, также с сосной и елью.

4. Для повышения информативности дистанционных методов наблюдения растительности разработана методика и проведены тестовые измерения спектров отражения ряда живых растительных структур, поскольку тщательное изучение спектров отражения и спектров абсорбции фитоструктур является необходимым этапом разработки оптических дистанционных методов их анализа.

Для измерения спектров абсорбции и диффузного отражения фитоструктур в области 680–750 нм использована технология интегрального фотометра (фотометрический шар). Интегральный фотометр, учитывающий все рассеянное исследуемым образцом излучение, позволяет физически корректно измерять оптические коэффициенты отражения $K_{обр}$, пропускания α и поглощения τ сложных природных структур, таких как листья растений и других светорассеивающих объектов. Приборы такого типа широко используются в биофизических исследованиях [9–11].

Схема установки фотометрического шара для измерения спектров абсорбции и диффузного отражения представлена на рис. 5 (для измерения спектра

абсорбции образец устанавливается на входное отверстие шара). Использовался шар фирмы «Карл Цейс Йена» диаметром 110 мм.

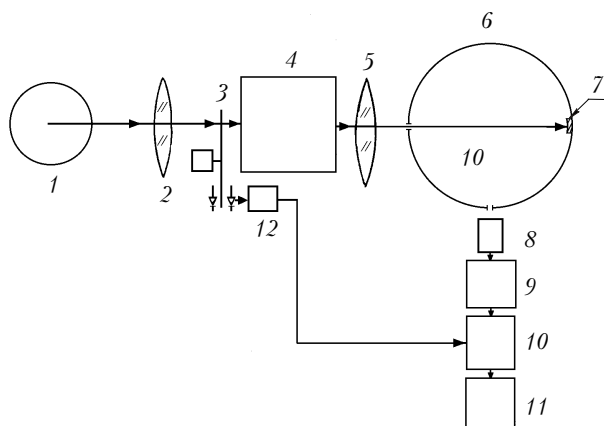


Рис. 5. Схема установки для измерения коэффициентов диффузного отражения: 1 – источник излучения (лампа накаливания); 2 – согласующая оптическая система; 3 – механический модулятор (частота модуляции 800 Гц); 4 – монохроматор МДР-12; 5 – коллимирующий объектив; 6 – фотометрический шар; 7 – образец; 8 – фотоприемник ФЭУ-100; 9 – усилитель переменного тока; 10 – синхронный детектор; 11 – самописец; 12 – датчик синхронизации

Калибровка фотометрического шара в нашем случае осуществлялась при помощи двух эталонных образцов отражателей, которые являлись моделями белого и черного тел. Мы использовали «белый» эталон от прибора СФ-4, сняв предварительно алмазным резцом поверхностный слой материала покрытия эталона (прессованный MgF_2). Мы приняли, что обновленный таким образом эталон имеет коэффициент отражения, близкий к максимальному для этого материала, – 95%. В качестве «черного» эталона был взят эталон фирмы «Карл Цейс Йена» (по внешнему виду – очень черный бархат). Коэффициент отражения этого эталона мы приняли минимальным из известных для «черных» эталонов – 5%.

В качестве образцов зеленых растений были взяты листья березы, сирени, широколистных комнатных растений, а также хвойные растения (кедр, ель, сосна). Они использовались спустя 5–10 мин после отделения от растения.

Была использована последовательность операций измерения, выработанная нами ранее при измерении коэффициентов диффузного отражения природных и искусственных материалов в УФ-диапазоне. Для каждой длины волны из выбранного диапазона последовательно записывались сигналы ФЭУ с «белым» $U_{эт. «бел.»}$ и «черным» $U_{эт. «черн.»}$ эталонами и исследуемым образцом $U_{обр.}$. Коэффициент отражения подсчитывался по очевидной формуле:

$$K_{обр} = K_{эт. «черн.»} + (K_{эт. «бел.»} - K_{эт. «черн.»}) \times \frac{U_{обр} - U_{эт. «черн.»}}{U_{эт. «бел.»} - U_{эт. «черн.»},$$

где $K_{эт. «черн.»}$, $K_{эт. «бел.»}$, $K_{обр}$ – коэффициенты отражения «черного» и «белого» эталонов и образца.

Сигналы U отсчитывались от нулевого уровня сигнала, который соответствует показаниям самописца при перекрытии светового потока от лампы.

Результаты измерений коэффициентов отражения лиственных и хвойных растений в области 600–750 нм представлены на рис. 6.

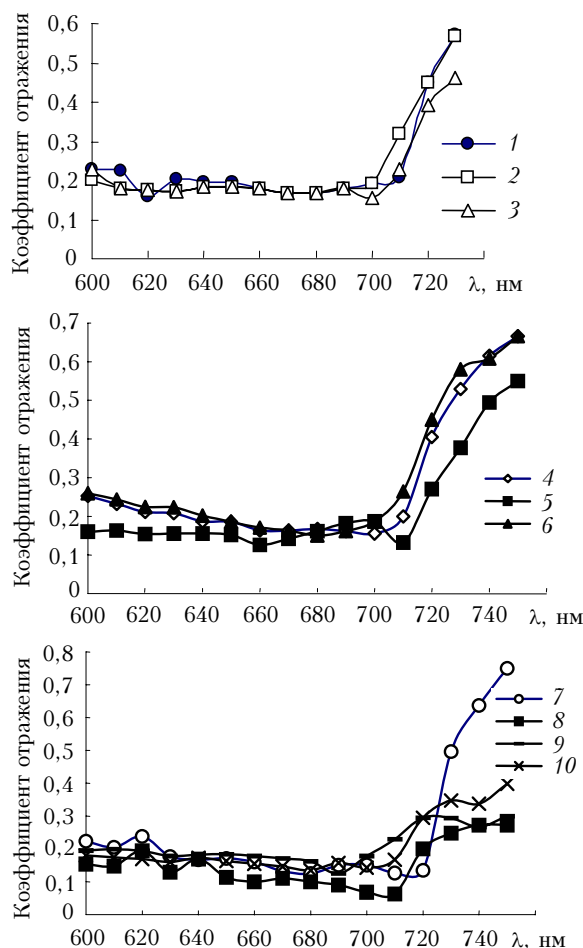


Рис. 6. Спектральный ход коэффициента отражения $K_{обр}$ хвойных и лиственных растений: 1–3 – береза; 4 – сирень; 5 – комнатное растение; 6, 7 – лиственница; 8 – кедр; 9 – ель; 10 – сосна

Из результатов измерений коэффициентов диффузного отражения исследованных листовых материалов следует, что имеет место хорошо заметный сдвиг красной границы поглощения у хвойных растений по отношению к лиственным. Это указывает на зависимость спектра поглощения хлорофилла от молекулярного окружения и, следовательно, положение красной границы поглощения должно нести информацию о плотности и состоянии окружающих молекулярных компонентов фитоструктуры. Для экспериментального обоснования этого вывода необходимо провести исследования красной границы как функции состояния жизнедеятельности растения.

Сопоставление спектров отражения с наблюдаемыми полосами ЛИФ показывает, что излучение ЛИФ при 685 нм испытывает в толще листа поглощение и рассеяние, а ЛИФ при 740 нм – только рассеяние.

Следовательно, ЛИФ при 685 и 740 нм можно рассматривать как уникальную спектроскопическую пару для определения плотности пигментов в листе дифференциальным методом. По аналогии с методом дифференциального поглощения в лазерном зондировании атмосферы данный метод можно назвать методом дифференциального поглощения флуоресценции в лазерном зондировании растительных покровов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Роснауки (контракт № 02.452.11.7087).

1. Ageev B.G., Kapitanov V.A., Ponomarev Yu.N. Оптико-акустические лазерные газоанализаторы // Наука – производству. 2003. № 9. С. 30–31.
2. *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques* / Ed. M.W. Sigrist. New York: John Willey and Sons, Inc. 1994. 532 p.
3. Нестеренко Т.В., Сидько Ф.Я. Индукция флуоресценции листьев пшеницы в их онтогенезе // Физиология растений. 1980. Т. 27. Вып. 2. С. 336–340.
4. Гапоненко В.И. Влияние внешних факторов на метаболизм хлорофилла. Минск: Наука и техника, 1976. 240 с.
5. Fateyeva N.L., Matvienko G.G. Application of the method of laser-induced fluorescence // Proc. SPIE. 2003. V. 5232. P. 652–657.
6. Lichtenthaler H.K., Miehe J.A. Fluorescence imaging as a diagnostic tool for plant stress // Trends in Plant Sci. 1997. N 2. P. 316–320.
7. Гришин А.И., Матвиенко Г.Г., Харченко О.В., Тимофеев В.И. Исследование флуоресценции растений при возбуждении излучением второй гармоники YAG: Nd-лазера // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 7. С. 475–478.
8. Шульгина Л.А., Фатеева Н.Л. Индуцированная лазером флуоресценция древесной растительности // Изв. вузов. Физ. (Приложение). 2005. Вып. 6. С. 151–152.
9. Дадькин В.П., Станко С.А., Беденко В.П. Электронный спектральный прибор для определения оптических свойств листьев // Физиология растений. 1962. Т. 9. С. 385–388.
10. Тагаева С.В., Брандт А.В. Универсальная установка для определения оптических свойств растений // Биофиз. 1959. Т. 6. Вып. 2. С. 232–237.
11. Zarco-Tejada P.I., Miller J.R., Mohammed G.H., Noland T.L. Chlorophyll Fluorescence Effects on Vegetation Apparent Reflectance: I. Leaf-Level Measurements and Model Simulation // Remote Sens. Environ. 2000. V. 74. P. 582–595.

B.G. Ageev, A.P. Zotikova, V.A. Kapitanov, A.V. Klimkin, V.M. Klimkin, M.M. Makogon, G.G. Matvienko, Yu.N. Ponomarev, N.L. Fateeva. Complex stand for optical diagnosis of biosystems.

Instrumentation complex for studies of absorption, scattering, and fluorescence properties of vegetation structures, as well as processes of exchange by minor gas components and aerosol between atmosphere and phytocenotypes is described. Some new results obtained with the help of the complex are presented.