

Оптический журнал

Оптические приборы и методы измерений в физике, технике и природе
Optical devices and measurement methods in physics, engineering and nature

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-10-15-24

УДК 535.3

Лабораторные измерения спектров отражения лесной растительности Европейской части России в диапазоне 1–2,4 мкм

Юрий Викторович Федотов¹, Сергей Евгеньевич Иванов²,
Михаил Леонидович Белов^{3✉}, Виктор Александрович Городничев⁴,
Сергей Иванович Чумаченко⁵

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹fed@bmstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8184-7550>

²ivanov_sergey2@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0000-9840-2267>

³belov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5475-9694>

⁴gorod@bmstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5297-9757>

⁵chumachenkosi@bmstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9766-3083>

Аннотация

Предмет исследования. Проведены измерения и анализ спектров отражения листьев и хвойной древесной растительности в спектральном диапазоне 1–2,4 мкм. **Цель работы.** Анализ возможностей использования гиперспектральных измерений спектров отражения основных видов лесной растительности в диапазоне 1–2,4 мкм для задач лесного хозяйства Российской Федерации. **Метод.** Выполнены лабораторные исследования спектров отражения листьев и хвойных основных видов древесной растительности, характерной для Европейской части Российской Федерации. В состав лабораторного комплекса входил спектрометр для регистрации спектров отражения в диапазоне 1–2,4 мкм. В качестве образцов хвойной и лиственной древесной растительности были использованы зелёная хвоя ели, сосны и зелёные листья берёзы, дуба, клёна, осины, липы. Измерения проводились в летний период (август) на базе филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в Дмитровском районе Московской области. **Основные результаты.** Показано, что спектры отражения лесной растительности в диапазоне 1–2,4 мкм дают возможность разделять хвойные и лиственные породы деревьев и проводить классификацию пород лиственных и хвойных пород лесной растительности. Надёжное разделение спектров хвойных и лиственных пород деревьев происходит в спектральных диапазонах 1,5–1,8 мкм и 2,1–2,4 мкм. Использование спектров отражения в диапазоне 1–2,4 мкм с разрешением 10 нм для берёзы, дуба, клёна, липы, осины, ели и сосны позволяет эффективно проводить их классификацию для 88% (и более) данных измерений для каждой породы. **Практическая значимость.** Проведённые исследования являются первым этапом работ по созданию банка данных спектральной отражательной способности древесной растительности, характерной для лесных массивов Российской Федерации. Использование гиперспектральных данных о лесных массивах в диапазоне 1–2,4 мкм позволит проводить распознавание пород деревьев, здоровых и больных деревьев, сухостоя и т.п. и подойти к разработке методики дистанционной инвентаризации лесных массивов.

Ключевые слова: спектры отражения, оптический мониторинг древесной растительности, банк данных спектральной отражательной способности

Благодарность: работа поддержана Программой стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

Ссылка для цитирования: Федотов Ю.В., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А., Чумаченко С.И. Лабораторные измерения спектров отражения лесной растительности Европейской части России в диапазоне 1–2,4 мкм // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 15–24. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-15-24>

Коды OCIS: 300.6170, 280.1350, 260.3060.

Laboratory measurements of forest vegetation reflection spectra for European part of the Russian Federation in the range of 1–2.4 μm

YURI V. FEDOTOV¹, SERGEY E. IVANOV², MIKHAIL L. BELOV³✉,
VICTOR A. GORODNICHEV⁴, SERGEY I. CHUMACHENKO⁵

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹fed@bmstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8184-7550>

²ivanov_sergey2@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0000-9840-2267>

³belov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5475-9694>

⁴gorod@bmstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5297-9757>

⁵chumachenkosi@bmstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9766-3083>

Abstract

Subject of study. Measurements and analysis of reflection spectra of leaves and needles of woody vegetation in the spectral range of 1–2.4 μm were conducted. **Aim of study.** Analysis of the possibilities of using hyperspectral measurements of the reflection spectra of forest vegetation in the range of 1–2.4 μm for forestry tasks of the Russian Federation. **Method.** Laboratory studies have been carried out on the reflection spectra of leaves and needles of woody vegetation characteristic of the European part of the Russian Federation. The laboratory complex consisted of spectrometer for recording reflection spectra in the range of 1–2.4 μm . Green spruce, pine and green birch, oak, maple, aspen, linden were used as specimens for coniferous and deciduous woody vegetation. Measurements were carried out in the summer period (august) on the basis of the branch of the Bauman Moscow State Technical University in the Dmitrov district of the Moscow region. **Main results.** It is shown that the reflection spectra of forest vegetation in the range of 1–2.4 μm make it possible to separate coniferous and hardwood tree species and to classify hardwoods and conifers of forest vegetation. The reliable separation of the softwood and hardwood spectra occurs in spectral ranges of 1.5 to 1.8 μm and 2.1 to 2.4 μm . The use of reflection spectra in the range of 1–2.4 μm with a resolution of 10 nm for birch, oak, maple, linden, aspen, spruce and pine makes it possible to effectively classify them for 88% (or more) of measurement data for each species. **Practical significance.** The studies are the first step in the development of a data bank on the spectral reflectivity of woody vegetation characteristic of the forest areas of the Russian Federation. The use of hyperspectral data on forest areas in the range of 1–2.4 μm will allow the identification of tree species, healthy and sick trees, drying, etc. and approach the development of methods of remote inventory of forest areas.

Keywords: reflectance spectra, optical monitoring of woody vegetation, spectral reflectivity data bank

Acknowledgment: the work is supported by the Program of strategic academic leadership «Priority 2030».

For citation: Fedotov Yu.V., Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Chumachenko S.I. Laboratory measurements of forest vegetation reflection spectra for European part of the Russian Federation in the range of 1–2.4 μm [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 10. P. 15–24. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-15-24>

OCIS codes: 300.6170, 280.1350, 260.3060.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных экологических проблем современности является глобальное изменение климата нашей планеты, в значительной степени связанное с антропогенными выбросами углерода [1–3]. В связи с этим мониторинг наземных экосистем с высоким потенциалом поглощения и хранения антропогенного углерода представляется важной задачей [4–7]. Лесные массивы РФ обеспечивают значительный природный потенциал для депонирования углерода, который образовывается в результате хозяйственной деятельности человека.

Потенциал лесных массивов, с точки зрения депонирования углерода, определяется, прежде всего, фитомассой леса. Оценка значений фитомассы лесной территории проводится на основании данных о площади лесов (площади здоровых и больных деревьев, вырубок, гарей, сухостоя и т.п.), их породном составе, возрастной структуре и т.п. [8–10].

Точность оценки запасов и депонирования углерода на лесопокрытых площадях определяется качеством исходных данных о состоянии лесных массивов. Поэтому на сегодняшний день актуальной является задача разработки информационного обеспечения для получения объективных данных о лесных массивах в РФ.

Информация по составу растительного сообщества на лесной территории может быть получена по результатам мониторинга лесов. Наиболее перспективным методом контроля лесных территорий на сегодняшний день является дистанционный аэрокосмический гиперспектральный мониторинг [11–16].

Целью работы является анализ возможностей использования измерений спектров отражения лесной растительности в диапазоне 1–2,4 мкм для задач лесного хозяйства Российской Федерации.

Использование аэрокосмических гиперспектральных данных о лесных массивах РФ позволит проводить распознавание пород деревьев, здоровых и больных деревьев, вырубок, гарей, сухостоя и т.п. и подойти к разработке методики решения задачи надёжной оценки фитомассы лесных массивов.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Первым этапом этой работы является создание банка данных спектральной отражатель-

ной способности древесной растительности (характерной для лесных массивов РФ) в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра (аналогичного зарубежным банкам спектральных данных [17, 18]). Такой банк должен содержать гиперспектральные данные об отражательной способности лесной растительности (здоровых и больных лиственных и хвойных деревьев, кустарников, напочвенного покрова и т.п.) в разные периоды вегетации в широком спектральном интервале 0,4–2,4 мкм.

При этом в банке данных должны содержаться величины спектральной отражательной способности лесной растительности, независимые от конкретных условий освещения во время проведения измерений. Методика проведения таких измерений основана на практически одновременном (разделённым коротким интервалом времени, за который условия освещения не изменяются) измерении образца растительности и эталонного отражателя.

Проведение большого объёма таких измерений в натуральных условиях при наземных измерениях или при измерениях с беспилотного летательного аппарата затруднительно по разным причинам.

Наиболее просто такие измерения организовать в лабораторных условиях [19–23], используя, как правило, искусственный источник освещения.

Вопрос о доставке образцов лесной растительности (листьев и хвои) в лабораторию может быть решён с помощью использования специального холодильника с регулируемой температурой [24].

На сегодняшний день основные гиперспектральные данные для древесной растительности в РФ получены для спектрального диапазона до 1 мкм (см., например, [13, 16, 22, 25–29]).

В спектральном диапазоне 1–2,4 мкм имеются лишь немногочисленные репрезентативные данные измерений древесной растительности в РФ (с точки зрения породного состава деревьев, отнесение их к одному периоду вегетации и регистрации спектра отражения с хорошим спектральным разрешением порядка 10 нм и менее). Можно отметить только работы [23, 30–32], в которых для измерения спектров отражения использовался гиперспектрометр «FieldSpec3 Hi-Res» со спектральным разрешением 10 нм в диа-

пазоне 1000–2500 нм. Объектами исследования здесь были подстилающие поверхности и растения Севера. В основном — кустарники, лишайники, мхи, осока, кустарничковые растения, травянистые растения и т.п., из деревьев — берёза и ель.

Из других работ, в которых приводятся спектры отражения в диапазоне 1–2,4 мкм можно отметить только [33]. Но приведённые данные для древесной растительности отрывочные и не могут быть использованы для задач лесного хозяйства. При этом большой спектральный дискрет данных (50 нм) не позволяет решать задачи классификации пород древесной растительности.

Таким образом, имеющиеся на сегодняшний день данные не позволяют оценить возможности спектрального диапазона 1–2,4 мкм для задач мониторинга лесной растительности в РФ.

Конечно, существует большое количество зарубежных публикаций, посвящённых измерениям спектров отражения (в том числе в диапазоне 1–2,4 мкм) хвойных и лиственных пород деревьев в разных странах (см., например, [17, 18, 34–38]). Но для интересов лесного хозяйства РФ они бесполезны: спектры даже одних и тех же деревьев в США и Европе другие, чем в РФ. Отличия спектров можно видеть, сравнивая кривые (для одних и тех же пород) ниже в статье на рис. 2 и 3. Наиболее сильные отличия, например, видны на рис. 2 и 3 для спектров отражения клёна и сосны.

В тоже время, как показывают зарубежные работы, многие задачи мониторинга лесных массивов можно успешно решать, используя данные по спектрам отражения лесной растительности со спектральным разрешением порядка 10 нм в диапазоне 1–2,4 мкм [39–43].

В статье описан лабораторный комплекс для проведения измерений спектров отражения древесной растительности в спектральном диапазоне 1–2,4 мкм. Приведены результаты экспериментальных исследований спектральной отражательной способности образцов древесной растительности (листьев и хвои) из наиболее характерных для Европейской части РФ. Проводится оценка эффективности использования измеренных спектров отражения древесной растительности для задачи распознавания пород деревьев для Европейской части Российской Федерации.

Спектры отражения древесной растительности зависят от многих факторов. Поэтому потенциально анализ экспериментально измеренных спектров отражения древесной растительности позволяет решать широкий круг задач мониторинга лесной растительности (классификация лесных пород, оценка экологического состояния лесов, влажности, распознавание здоровых и больных деревьев, отслеживание динамики процессов, обусловленной естественными и антропогенными факторами и т.д.).

В статье акцент делается на использовании спектров отражения здоровой лесной растительности (в нормальном состоянии, без влияния антропогенных факторов и т.д.) в диапазоне 1–2,4 мкм для разделения хвойных и лиственных деревьев и классификации пород лесной растительности.

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Структурная схема лабораторного комплекса показана на рис. 1.

В состав лабораторного комплекса входит охлаждаемый спектрометр OPTOSKY ATP8000 (КНР) ближнего инфракрасного диапазона, обеспечивающий регистрацию сигнала в диапазоне 900–2600 нм с разрешением 10 нм [47]. Данные измерений выводятся на персональный компьютер через интерфейс USB 2.0 или RS232.

В лабораторном комплексе в качестве источника излучения использовалась галогеновая лампа Zhohlix Instruments GLORIA-T150A. Для калибровки спектрометра ATP8000 по

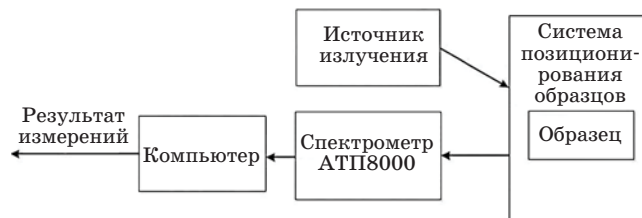


Рис. 1. Структурная схема лабораторного комплекса для измерения спектров отражения в спектральном диапазоне от 1 до 2,4 мкм

Fig. 1. Structural diagram of the laboratory complex for measuring reflection spectra in the spectral range from 1 to 2.4 μm

длине волны применялся лазер на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм с волоконным выходом.

В качестве эталона при измерениях спектров образцов древесной растительности использовался эталон диффузного отражения Edmund Optics Spectralon с коэффициентом диффузного отражения 99%.

При проведении измерений спектров образцы располагались на поверхности, покрашенной чёрной краской Ultra Black с коэффициентом отражения, не превышающим 0,1 в спектральном диапазоне 1–2,4 мкм.

Приёмная оптическая система была ориентирована в направлении, близком к вертикальному, и формировала поле зрения спектрометра в плоскости образца диаметром порядка 5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ОБРАЗЦОВ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

В качестве образцов хвойной и лиственной древесной растительности были использованы зелёная хвоя ели, сосны и зелёные листья берёзы, дуба, клёна, осины, липы. Измерения проводились в летний период (август) на базе филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в Дмитровском районе Московской области. Образцы хвой и листьев срезались в лесной зоне около филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Время между срезанием образцов листьев и хвой (образцы срезались с нескольких деревьев одной породы и нескольких веток) и проведением измерений в лаборатории не превышало 30 мин.

Отражательная способность измеряемых образцов определялась (как и в [25]) как отношение яркости, регистрируемой приёмной системой в данном направлении (в нашем случае близком к вертикальному), к яркости, регистрируемой приёмной системой от эталонного ортотропного (отражающего по закону Ламберта) отражателя.

Во всех случаях при измерении одного образца листа или хвой проводилось усреднение по 100 измерениям спектрометра (для разных точек образца).

Как показывают наши данные измерений [48] вариации коэффициента яркости листьев

с разных веток одного дерева и с разных деревьев (одной породы деревьев) имели относительное среднеквадратическое отклонение порядка единиц процентов. Вариации коэффициента яркости образцов хвой выше и могут достигать 10% и более.

На рис. 2 показаны примеры спектров отражения образцов хвойной и лиственной древесной растительности, полученные при использовании спектрометра АТР8000. На рисунках приведены данные, усреднённые по 10 разным образцам листьев или хвой (после усреднения по 100 измерениям спектрометра для каждого образца).

На рис. 2 для спектров отражения листьев кривая 1 — дуб, 2 — осина, 3 — береза, 4 — клён, 5 — липа. Для спектров отражения хвой — кривая 6 — ель, 7 — сосна.

Рисунок 2 показывает, что надёжное разделение спектров хвойных и лиственных пород деревьев происходит в спектральных диапазонах 1,5–1,8 мкм и 2,1–2,4 мкм.

На рис. 3 показаны примеры измерений спектров отражения образцов хвойной и лиственной древесной растительности (в тех же спектральных диапазонах, как и на рис. 2) по данным зарубежных спектральных библиотек [17, 18].

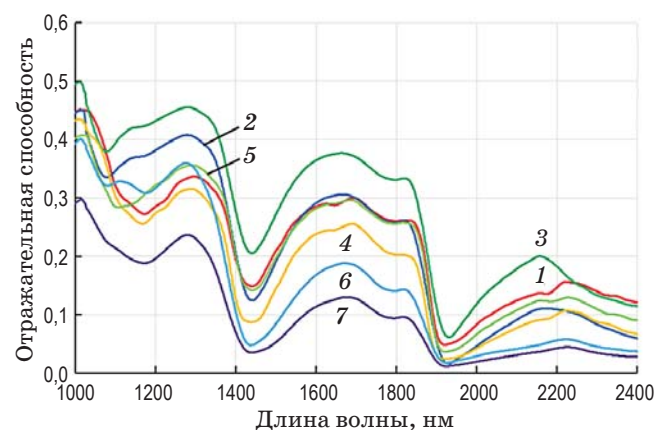


Рис. 2. Примеры измерений спектров отражения образцов хвойной и лиственной древесной растительности, где для спектров отражения листьев кривая 1 — дуб, 2 — осина, 3 — береза, 4 — клён, 5 — липа. Для спектров отражения хвой кривая 6 — ель, 7 — сосна

Fig. 2. Examples of measurements of reflection spectra of conifer and deciduous woody vegetation samples, where for the reflection spectra of the leaves the curve 1 is oak, 2 is aspen, 3 is birch, 4 is maple, 5 is linden. For the reflection spectra of needles, curve 6 is spruce, 7 is pine

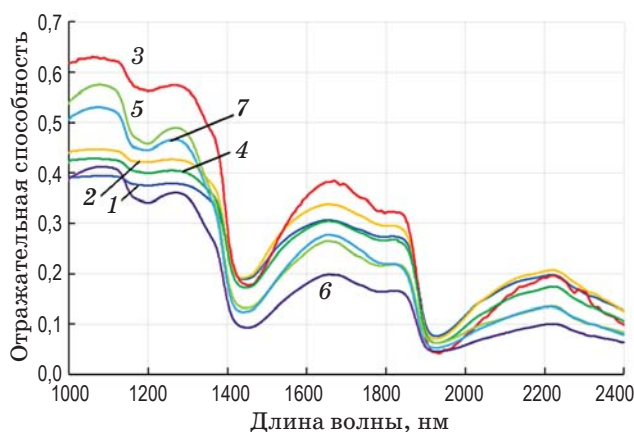


Рис 3. Примеры спектров отражения образцов хвойной и лиственной древесной растительности по данным [17, 18], где для спектров отражения листьев кривая 1 — бук, 2 — берёза, 3 — клён, 4 — дуб. Для спектров отражения хвои кривая 5 — пихта, 6 — кедр, 7 — сосна

Fig. 3. Examples of reflection spectra of coniferous and deciduous woody samples according to [17, 18], where for the reflection spectra of the leaves the curve 1 is beech, 2 is birch, 3 is maple, 4 is oak. For the reflection spectra of needles, curve 5 is fir, 6 is cedar, 7 is pine

На рис. 3 для спектров отражения листьев кривая 1 — бук, 2 — берёза, 3 — клён, 4 — дуб. Для спектров отражения хвои кривая 5 — пихта, 6 — кедр, 7 — сосна.

Рисунок 3 показывает, что надёжное разделение спектров отражения хвойных и лиственных пород деревьев по данным зарубежных спектральных библиотек происходит в спектральных диапазонах 1,5–1,8 мкм и 2,1–2,4 мкм и для лесной растительности, характерной для Северной Америки.

Как показывают данные измерений, приведённые на рис. 2, получение спектров отражения лесной растительности в диапазоне 1–2,4 мкм позволяет ставить вопрос не только о разделении хвойных и лиственных деревьев, но и об определении пород лесной растительности по данным оптического зондирования.

В качестве примера возможностей классификации пород лиственных и хвойных деревьев по спектрам отражения в диапазоне 1–2,4 мкм со спектральным разрешением 10 нм ниже приводятся результаты работы нейронной сети, использующей наши данные измерений.

Для классификации лесных пород лиственных и хвойных деревьев по спектрам отраже-

ния в диапазоне 1–2,4 мкм использовалась перспективная (для задач с большими массивами данных) свёрточная нейронная сеть 1D-AlexNet [44–46].

Нейронная сеть была реализована на языке Python. На вход нейронной сети подавался массив спектральных отсчётов экспериментально измеренных коэффициентов яркости. На выходе нейронной сети формировалась величина N — процент количества спектров в тестовой выборке (для этой породы), для которых была правильно определена порода дерева (т.е. правильно проведена классификация).

При обучении нейронной сети (методом обратного распространения ошибки) использовался оптимизатор модели RMSprop. Количество измеренных образцов листьев и хвои для разных пород (берёза, дуб, клён, липа, осина, ель, сосна), спектры отражения которых были использованы для классификации пород деревьев, приведены в табл. 1.

Для обучения нейронной сети использовалась выборка для обучения (половина измеренных спектров отражения для каждой породы, которая выбиралась случайным образом). Другая половина спектров (тестовая выборка) использовалась для тестирования работы нейронной сети.

В табл. 2 для каждой породы приведена величина N — процент количества спектров в тестовой выборке (для этой породы), для которых была правильно определена порода дерева (т.е. правильно проведена классификация).

Из табл. 2 видно, что использование спектров отражения в диапазоне 1–2,4 мкм с разрешением 10 нм позволяет эффективно про-

Таблица 1. Количество спектров отражения, использованных для классификации лесных пород по спектрам отражения

Table 2. Number of reflection spectra used to classify forest species by reflection spectrum

Порода дерева	Количество спектров
Берёза	223
Дуб	30
Клён	75
Липа	101
Осина	70
Ель	72
Сосна	36

Таблица 2. Результаты классификации пород деревьев по спектрам отражения в диапазоне 1–2,4 мкм

Table 2. Results of classification of tree species by reflection spectrum in the range of 1–2.4 μm

Порода дерева	N, %
Берёза	94
Дуб	99
Клён	94
Липа	92
Осина	88
Ель	91
Сосна	89

водить классификацию основных древесных пород деревьев.

Таким образом, созданный лабораторный комплекс даёт возможность получать большой объём спектральных измерений в диапазоне 1–2,4 мкм, позволяющий решать многие задачи мониторинга лесных массивов.

Показано, что спектры отражения лесной растительности в диапазоне 1–2,4 мкм дают возможность разделять хвойные и лиственные породы деревьев и проводить классификацию пород лесной растительности. Использование спектров отражения в диапазоне 1–2,4 мкм с разрешением 10 нм позволяет для берёзы, дуба, клёна, липы, осины, ели и сосны эффективно проводить их классификацию для 88% (и более) измеренных спектров для каждой породы.

Проведённые исследования являются первым этапом работ по созданию банка данных спектральной отражательной способности древесной растительности, характерной для лесных массивов Российской Федерации.

Одним из необходимых следующих этапов работы является, конечно, сравнение спек-

тров отражения одних и тех же объектов лесной растительности при лабораторных, наземных натурных и натурных дистанционных измерений (в спектральных библиотеках [17, 18] присутствуют данные трёх видов измерений — лабораторные, наземные натурные и натурные дистанционные с самолёта).

Банк данных спектральной отражательной способности древесной растительности будет использован при обработке результатов дистанционных измерений (с БПЛА), позволит проводить распознавание пород деревьев, здоровых и больных деревьев, вырубок, гарей, сухостоя и т.п., создавать тематические карты лесных массивов и подойти к разработке методики дистанционной инвентаризации лесных массивов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан лабораторный комплекс для проведения измерений спектров отражения в спектральном диапазоне 1–2,4 мкм. Приведены результаты экспериментальных исследований спектральной отражательной способности образцов древесной растительности (листьев и хвои) для наиболее характерных пород деревьев Европейской части РФ. Показано, что спектры отражения лесной растительности в диапазоне 1–2,4 мкм дают возможность разделять хвойные и лиственные породы деревьев и проводить классификацию лиственных и хвойных пород лесной растительности. Надёжное разделение спектров хвойных и лиственных пород деревьев происходит в спектральных диапазонах 1,5–1,8 мкм и 2,1–2,4 мкм. Использование спектров отражения в диапазоне 1–2,4 мкм с разрешением 10 нм позволяет для берёзы, дуба, клёна, липы, осины, ели и сосны эффективно проводить их классификацию для 88% (и более) измеренных спектров для каждой породы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. World Energy Outlook 2021 [Electronic resource]. Access mode: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>. Language English (accessed 17/06/2023).
2. Беспалов В.Г., Гришканич А.С., Данилов О.Б., Елизаров В.В., Жевлаков А.П., Завьялов А.К., Ильинский А.А., Кашеев С.В., Конопелько Л.А., Мак А.А. Рамановские гиперспектральные технологии дистанционного зондирования углеводородных геохимических полей // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 1. С. 16–22. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-01-16-22>
Zhevlakov A.P., Bepalov V.G., Grishkanich A.S., Danilov O.B., Elizarov V.V., Zaviyalov A.K., Ilyin-

- skiy A.A., Kashcheev S.V., Konopelko L.A., Mak A.A. Raman hyperspectral technologies for remote probing of hydrocarbon geochemical fields // Journal of Optical Technology. 2020. V. 87. № 1. P. 11–16. •<https://doi.org/10.1364/JOT.87.000011>
3. Садовников С.А., Романовский О.А., Яковлев С.В., Харченко О.В., Кравцова Н.С. Калибровка и полевые испытания мобильного лидара для дистанционного зондирования метана в атмосфере // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 6. С. 15–24. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-06-15-24>
Sadovnikov S.A., Romanovskii O.A., Yakovlev S.V., Kharchenko O.V., Kravtsova N.S. Calibration and field

- test of mobile lidar for remote sensing of atmospheric methane // *Journal of Optical Technology*. 2022. V. 89. № 6. P. 320–326. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000320>
4. Toohey E.C. Carbon sequestration: how much can forestry sequester CO₂? // *Forest Res Eng Int J*. 2018. V. 2(3). P. 148–150. <https://doi.org/10.15406/freij.2018.02.00040>
 5. Mekonnen H.D., Sintayehu W.D. The role of biodiversity and ecosystem services in carbon sequestration and its implication for climate change mitigation // *International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources*. 2018. V. 11(2). P. 1–9. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.10.5558>
 6. Singh J., Khare P., Yadav S., Gupta N., Agarwal A. Carbon sequestration: assessment and application — a review // *European journal of pharmaceutical and medical research*. 2017. V. 4(5). P. 220–222. <https://www.researchgate.net/publication/317692502>
 7. Tan Z.T., Zhang Y.T., Schaefer D., Guirui Yu., Liang N., Song Q. An old growth subtropical Asian evergreen forest as a large carbon sink // *Atmospheric Environment*. 2011. V. 45. P. 1548–1554. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.041>
 8. Kindermann G.E., McCallum I., Fritz S., Obersteiner M. A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics // *Silva Fennica*. 2008. V. 42. P. 387–396. <https://doi.org/10.14214/sf.244>
 9. Meng Q., Cieszewski C.J., Madden B., Borders B. A linear mixed effects model of biomass and volume of trees using Landsat ETM+ images // *Forest Ecology and Management*. 2007. V. 244. № 1. P. 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.056>
 10. Van Tuyl S., Law B.E., Turner D.P., Gitelman A.I. Variability in net primary production and carbon storage in biomass across Oregon forests — an assessment integrating data from forest inventories, intensive sites, and remote sensing // *Forest Ecology and Management*. 2005. V. 209. № 3. P. 273–291. doi:10.1016/j.foreco.2005.02.002
 11. John E., Bunting P., Hardy A., Silayo D.S., Masunga E.A. Forest monitoring system for Tanzania // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. № 3081. P. 1–29. <https://doi.org/10.3390/rs13163081>
 12. Holzwarth S., Thonfeld F., Abdullahi S., Asam A., Da Ponte Canova E., Gessner U., Huth J., Kraus T., Leutner B., Kuenzer C. Earth observation based monitoring of forests in Germany: A review // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. № 3570. P. 1–43. <https://doi.org/10.3390/rs12213570>
 13. Козодеров В.В., Егоров В.Д. Распознавание типов лесной растительности по гиперспектральным самолетным и многоканальным спутниковым данным высокого пространственного разрешения. Сравнение результатов и оценка их точности // *Исследование Земли из космоса*. 2019. № 6. С. 89–102. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019689-102>
Egorov V.D., Kozoderov V.V. Forest vegetation recognition by aircraft hyperspectral data [in Russian] // *Earth Research from Space*. 2016. № 3. P. 47–58. <https://doi.org/10.7868/S0205961416030039>
 14. Егоров В.Д., Козодеров В.В. Распознавание лесной растительности по самолетным гиперспектральным данным // *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 3. С. 47–58. <https://doi.org/10.7868/S0205961416030039>
Egorov V.D., Kozoderov V.V. Forest vegetation recognition by aircraft hyperspectral data [in Russian] // *Earth Research from Space*. 2016. № 3. P. 47–58. <https://doi.org/10.7868/S0205961416030039>
 15. Immitzer M., Vuolo F., Atzberger C. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. P. 1–27. <https://doi.org/10.3390/rs8030166>
 16. Чабан Л.Н., Березина К.В. Анализ информативности спектральных и текстурных признаков при классификации растительности по гиперспектральным аэроснимкам // *Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2018. Т. 62. № 1. С. 85–95. <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2018-62-1-85-95>
Chaban L.N., Beriozina K.V. Analysis of the informativeness of spectral and texture features while classifying the vegetation on hyperspectral airborne imagery [in Russian] // *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. 2018. V. 62 (1): 85–95. <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2018-62-1-85-95>
 17. USGS Digital Spectral Library 06 [Electronic resource]. Access mode: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>. Language English (accessed 17/06/2023).
 18. Johns Hopkins University Spectral Library [Electronic resource]. Access mode: https://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jhu_desc. Language English (accessed 17/06/2023).
 19. Van Tuyl S., Law B.E., Turner D.P., Gitelman A.I. Variability in net primary production and carbon storage in biomass across Oregon forests — an assessment integrating data from forest inventories, intensive sites, and remote sensing // *Forest Ecology and Management*. 2005. V. 209. P. 273–291. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.002>
 20. Woolley J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves // *Plant Physiology*. 1971. V. 47. P. 656–662. <https://doi.org/10.1104/PP.47.5.656>
 21. Stimson H.C., Breshears D.D., Ustin S.L., Kefauver S.C. Spectral sensing of foliar water conditions in two co-occurring conifer species: *Pinus edulis* and *Juniperus monosperma* // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 96. P. 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.007>
 22. Mamelin Yu.V., Kopytov G.F., Buzko V.Yu. Studying optical characteristics of diffused light reflecting from naturally senescing leaves of deciduous trees // *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2020. № 5 (92). P. 72–82. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-5-72-82>
 23. Зимин М.В., Тутубалина О.В., Голубева Е.И., Рис Г.У. Методика наземного спектрометрирования растений Арктики для дешифрирования космических снимков // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2014. № 4. С. 34–41.
Zimin M.V., Tutubalina O.V., Golubeva E.I., Rees G.U. Ground spectrometry of arctic plants for the interpretation of space imagery [in Russian] // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2014. № 4. P. 34–41.
 24. Ivanov S.E., Fedotov Yu.V., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Shkarupilo A.A. An experimental study of the woody vegetation reflectivity temporal dynamics // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2023. V. 1154. № 012071. P. 1–5. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1154/1/012071>
 25. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. АН СССР. Лаборатория аэрометодов. Москва, Ленинград: Изд-во АН СССР, 1947. 272 с.
Krinov E.L. Spectral reflectivity of natural formations. USSR Academy of Sciences. Laboratory of aerometries. Moscow, Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of USSR, 1947. 272 p.
 26. Мамелин Ю.В., Копытов Г.Ф., Бузько В.Ю. Дискриминация хвойных и лиственных листьев деревьев и кустарников от декоративно-искусственных материалов методом оптической спектроскопии диффузно-

- го отражения света // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. Вып. 2. С. 290–294. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.02.48981.288-19>
- Mamelin Y.V., Kopytov G.F., Buz'ko V.Y. Discrimination of coniferous and deciduous leaves of trees and shrubs from decorative and artificial materials by optical diffuse reflectance spectroscopy // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128. P. 280–284. <https://doi.org/10.1134/S0030400X20020150>
27. Сурин В.Г., Моисеев К.Г., Курашвили А.Е. Возможности использования гиперспектрометра «Лептон» для мониторинга состояния почвенно-растительного комплекса // Агрофизика. 2012. № 4(8). С. 34–44. Surin V.G., Moiseyev K.G., Kurashvili A.E. Possibilities of using «Lepton» hyperspectrometer for monitoring the state of the soil and vegetation complex [in Russian] // Agrophysics. 2012. № 4(8). P. 34–44.
28. Козодеров В.В., Егоров В.Д. Распознавание растительности по данным гиперспектрального аэрозондирования // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 40–48. Kozoderov V.V., Egorov V.D. Vegetation pattern recognition using data of hyperspectral airborne remote sensing [in Russian] // Earth Research from Space. 2011. № 3. P. 40–48.
29. Давыдов В.Ф., Батырев Ю.П. Способ определения состава насаждений // Лесной вестник. 2010. № 7. С. 47–52. Davydov V.F., Batyrev Yu.P. Method for determining stand composition [in Russian] // Forest bulletin. 2010. № 7. P. 47–52.
30. Касимов Н.С., Голубева Е.И., Лурье И.К., Зимин М.В., Самсонов Т.Е., Тутубалина О.В., Рис У.Г., Михеева А.И., Аляутдинов А.Р. Библиотека спектральных характеристик географических объектов в структуре геопортала МГУ им. М.В. Ломоносова // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 5. С. 3–8. Kasimov N.S., Golubeva E.I., Lurie I.K., Zimin M.V., Samsonov T.E., Tutubalina O.V., Rees W.G., Mikhееva A.I., Alyautdinov A.R. Library of spectral characteristics of geographical objects within the structure of the Lomonosov Moscow State University geoportal [in Russian] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2015. № 5. P. 3–8.
31. Голубева Е.И., Зимин М.В., Рис У.Г., Тутубалина О.В., Тимохина Ю.И. Дистанционные методы изучения состояния растительности севера (на примере Кольского полуострова) // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2020. № 5. С. 47–51. <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2020-05-4> Golubeva E.I., Zimin M.V., Rees W.G., Tutubalina O.V., Timokhina Yu.I. Remote sensing methods for studying the state of northern vegetation (case study of Kola peninsula) // Environmental and natural resource problems. 2020. № 5. P. 47–51. <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2020-05-4>
32. Голубева Е.И., Тимохина Ю.И., Зимин М.В. Отражение техногенного воздействия в биохимических особенностях и спектральных образах березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh S.L.) (Кольский полуостров) // VII Всероссийская конференция (с международным участием) "Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии", посвящена памяти выдающегося ученого-лесоведа, академика РАН А.С. Исаева. 22–24 апреля 2019. http://cepl.rssi.ru/wp-content/uploads/2019/05/АКС_ГИС_2019_Голубева.pdf. Golubeva E.I., Timokhina Yu.I., Zimin M.V. Reflection of technogenic influence in biochemical features and spectral images of fluffy birch (*Betula pubescens* Ehrh S.L.) (Kola peninsula) // Report at the VII All-Russian Conference (with international participation) "Aerospace methods and geoinformation technologies in forestry, forestry and ecology", dedicated to the memory of the outstanding scientist-forester, academician of the Russian Academy of Sciences A.S. Isaev. 22–24 April 2019. http://cepl.rssi.ru/wp-content/uploads/2019/05/АКС_ГИС_2019_Голубева.pdf.
33. Алтынов А.Е., Малинников В.А., Попов С.М., Стеценко А.Ф. Спектрометрирование ландшафтов. М.: Изд. МИИГАиК, 2010. 120 с. Altynov A.E., Malinnikov V.A., Popov S.M., Stetsenko A.F. Landscape spectrometry [in Russian]. Moscow: MIIGAIK Publ., 2010. 120 p.
34. Hill J., Buddenbaum H., Townsend P.A. Imaging spectroscopy of forest ecosystems: Perspectives for the use of space borne hyperspectral earth observation systems // Surveys in Geophysics. 2019. 40. P. 553–588. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09514-2>
35. Rautiainen M., Lukeš P., Homolová L., Hovi A., Pisek J., Möttöus M. Spectral properties of coniferous forests: A review of in situ and laboratory measurements // Remote Sens. 2018. V. 10(207). P. 1–28. <https://doi.org/10.3390/rs10020207>
36. Yel S.G., Gormus E.T. Exploiting hyperspectral and multispectral images in the detection of tree species: A review // Front. Remote Sens. 2023. V. 4(1136289). P. 1–13. <https://doi.org/10.3389/frsen.2023.1136289>
37. Hejtmánek J., Stejskal J., Čepl J., Lhotáková Z., Korecký J., Krejzková A., Dvůrák J., Gezan S.A. Revealing the complex relationship among hyperspectral reflectance, photosynthetic pigments, and growth in norway spruce ecotypes // Front. Plant Sci. 2022. V. 13(721064). P. 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.721064>
38. Forsstrom P.R., Hovi A., Ghielmetti G., Schaepman M.E., Rautiainen M. Multi-angular reflectance spectra of small single trees // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 255 (112302). P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112302>
39. Shang X., Chisholm L.A. Classification of australian native forest species using hyperspectral remote sensing and machine-learning classification algorithms // IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing. 2014. V. 7 (6). P. 2481–2488. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2282166>
40. Modzelewska A., Fassnacht F.E., Stereńczak K. Tree species identification within an extensive forest area with diverse management regimes using airborne hyperspectral data // Int J Appl Earth Obs Geoinformation. 2020. V. 84. 101960. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101960>
41. Van Aardt J.A.N., Wynne R.H. Spectral separability among six southern tree species // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2001. V. 67(12). P. 1367–1375. <https://www.researchgate.net/publication/216859278>
42. Dabiri Z., Lang S. Comparison of independent component analysis, principal component analysis, and minimum noise fraction transformation for tree species classification using APEX hyperspectral imagery // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2018. V. 7. 488. P. 1–26. <https://doi.org/10.3390/ijgi7120488>
43. Dadon A., Mandelmlach M., Ben-Dor E., Sheffer E. Sequential PCA-based classification of mediterranean forest plants using airborne hyperspectral remote sensing // Remote Sens. 2019. V. 11. 2800. P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs11232800>
44. Zhou W., Tang J., Qian Z., Wang J., Guo H. Deeply-recursive convolutional neural network for Raman

- spectra identification // RSC Adv. 2022. V. 12. P. 5053–5061. <https://doi.org/10.1039/D1RA08804A>
45. Басс Л.П., Кузьмина М.Г., Николаева О.В. Сверточные нейронные сети с глубоким обучением в задачах обработки гиперспектральных спутниковых данных // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 282. 32 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2018-282>
- Bass L.P., Kuzmina M.G., Nikolaeva O.V. Deep convolutional neural networks in hyperspectral remote sensing data processing // Preprints of the IPM named after M.V. Keldysh. 2018. № 282. 32 p. <https://doi.org/10.20948/prepr-2018-282>
46. Xie S., Ren G., Zhu J. Application of a new one-dimensional deep convolutional neural network for intelligent fault diagnosis of rolling bearings // Science Progress. 2020. V. 103(3). P. 1–18. <https://doi.org/10.1177/0036850420951394>
47. Cooled –20 °C NIR512-2.5 Spectrometer [Electronic resource]. Access mode: URL: <https://www.op-tosky.net/atp8000.html>. Language English (accessed 17/06/2023).
48. Fedotov Yu.V., Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichen V.A. Experimental study of variations in the reflection spectra of leaves and needles depending on the conditions for obtaining samples // E3S Web of Conferences. 2024. V. 486. 07016. P. 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448607016>

АВТОРЫ

Юрий Викторович Федотов — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 8616246700; <https://orcid.org/0000-0001-8184-7550>; fed@bmstu.ru

Сергей Евгеньевич Иванов — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 57008667200; <https://orcid.org/0009-0000-9840-2267>; ivanov_sergey2@bmstu.ru

Михаил Леонидович Белов — доктор техн. наук, профессор, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 7005640935; <https://orcid.org/0000-0001-5475-9694>; belov@bmstu.ru

Виктор Александрович Городничев — доктор техн. наук, заведующий кафедрой МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 6506532032; <https://orcid.org/0000-0001-5297-9757>; gorod@bmstu.ru

Сергей Иванович Чумаченко — доктор биол. наук, заведующий кафедрой МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 6603433423; <https://orcid.org/0000-0002-9766-3083>; chumachenkosi@bmstu.ru

AUTHORS

Yuri V. Fedotov — PhD in Engineering Science, Assistant Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 8616246700; <https://orcid.org/0000-0001-8184-7550>; fed@bmstu.ru

Sergey E. Ivanov — PhD in Engineering Science, Assistant Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 57008667200; <https://orcid.org/0009-0000-9840-2267>; ivanov_sergey2@bmstu.ru

Mikhail L. Belov — Doctor of Engineering Science, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 7005640935; <https://orcid.org/0000-0001-5475-9694>; belov@bmstu.ru

Victor A. Gorodnichenov — Doctor of Engineering Science, Head of the Subdepartment, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 6506532032; <https://orcid.org/0000-0001-5297-9757>; gorod@bmstu.ru

Sergey I. Chumachenko — Doctor of Biological Science, Head of the Subdepartment, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 6603433423; <https://orcid.org/0000-0002-9766-3083>; chumachenkosi@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 13.11.2023
Одобрена после рецензирования 16.04.2024
Принята к печати 30.08.2024

The article was submitted to the editorial office 13.11.2023
Approved after review 16.04.2024
Accepted for publication 30.08.2024