Классификация стрессовых состояний ели обыкновенной по спектральным характеристикам при дистанционных измерениях

О.О. Силюк¹, Г.С. Литвинович¹, И.И. Бручковский¹, Л.В. Катковский¹, М.Ю. Беляев², Э.Э. Сармин²

¹ Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ Минск, 220045, Беларусь E-mail: volha.siliuk@gmail.com ² Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва Королёв, 141070, Россия

Работа посвящена исследованиям спектральных характеристик хвои ели обыкновенной (лат. Pícea ábies) и поиску признаков стресса и усыхания хвои в видимом и ближнем ИК-диапазонах коэффициентов спектральной яркости (КСЯ). Приводятся результаты лабораторных измерений КСЯ образцов хвои, принадлежащих разным классам состояния (здоровый, стрессовый, больной). Найдены следующие наиболее информативные вегетационные индексы, позволяющие определять принадлежность хвои к одному из выделяемых классов: TVI, SR800/500, NDVI, SR800/635, ND790/670, SR800/675, SR800/650, ND800/675, ND800/650, ND800/500, SR800/470, ND800/635, ND800/470. Для данных индексов определены диапазоны значений, соответствующие разным классам состояния хвои. Предложенный метод позволяет отделить здоровую хвою от хвои на начальной стадии стресса, когда она ещё является зелёной, что повышает точность метода по сравнению с визуальной оценкой дерева специалистом-лесопатологом. Приводятся результаты применения классификатора, разработанного на основе предлагаемого метода, для данных дистанционного авиационного зондирования хвойных лесов. Неопределённость, рассчитанная как процент от общего числа тех спектров, для которых присвоенные им классы не совпали при классификации по разработанному методу и по альтернативному методу (без обучения), составила 10,1 %.

Ключевые слова: ель обыкновенная, коэффициент спектральной яркости, вегетационные индексы, усыхание растительности, спектры, дистанционное зондирование, авиационные съёмки, методы классификации

> Одобрена к печати: 19.08.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-125-135

Введение

Развитие стресса у хвойных пород деревьев под воздействием различных природных и антропогенных процессов — актуальная проблема лесных хозяйств многих государств (Kharuk et al., 2017; Rodman et al., 2021; Stone, Mohammed, 2017; Trumbore et al., 2015).

Традиционный подход к изучению состояния лесов заключается в проведении полевых обследований, мультиспектральных измерений с авиационных платформ и анализе полученных данных в совокупности с данными геоинформационных систем (Beniušienė et al., 2020, 2021; Lausch et al., 2017; Wulder et al., 2006). В последнее время для мониторинга лесов активно развивается применение спутниковых мультиспектральных и гиперспектральных данных (Abdullaha et al., 2019; Lausch et al., 2017; Varo-Martínez, Navarro-Cerrillo, 2021). Получаемые спутниковые данные позволяют проводить расчёт вегетационных индексов и классификацию типов поверхностей. Однако для решения задач определения патологий леса методы тематической обработки спутниковых данных нуждаются в совершенствовании ввиду небольших различий спектров здоровых и стрессовых деревьев, а также неоднородной структуры лесного покрова, изменений спектральных особенностей деревьев в процессе цикла вегетации, видового разнообразия. Для этого применяется совместный анализ данных разных сенсоров и разных уровней измерений.

Методики обработки спектральных данных, полученных со спутниковых и авиаплатформ, основываются на определении плотности кроны, индекса площади листа (*англ*. Leaf Area Index — LAI), поиске наиболее информативных вегетационных индексов, измерениях содержания фотосинтетических пигментов в хвое с последующим поиском корреляций между данным показателем и спектральными особенностями хвои (Abdullaha et al., 2019; Beniušienė et al., 2020; Foster et al., 2017; Lausch et al., 2017; Varo-Martínez, Navarro-Cerrillo, 2021). Активно используется лазерное сканирование лесных покровов для оценки степени осыпания хвои и таким образом определения здоровых и стрессовых деревьев (Chi et al., 2020; Foster et al., 2017; Lin et al., 2019; Varo-Martínez, Navarro-Cerrillo, 2021). Однако существует необходимость определения развивающегося в хвойных деревьях стресса ещё до осыпания хвои. Раннее обнаружение стресса обеспечивает быстрое реагирование и возможность сохранения близких к очагу заражения лесных массивов.

Цель настоящей работы заключается в определении на основе лабораторных измерений информативных вегетационных индексов, применимых для выявления развития стресса хвои ели обыкновенной (*лат.* Pícea ábies) на ранних этапах, и создании методики применения полученных индексов для данных дистанционного зондирования с высоким спектральных разрешением (авиационных и спутниковых).

С учётом опыта проведённых измерений и анализа применяемых методов (Foster et al., 2017; Huo et al., 2021; Trumbore et al., 2015; Varo-Martínez, Navarro-Cerrillo, 2021; Wulder et al., 2006) считаем, что на достигнутом к настоящему времени уровне обнаружения усыханий хвойных лесов с использованием аэрокосмических данных целесообразным является разделение всего множества состояний хвойных деревьев на следующие три класса:

- 1-й класс здоровое дерево. Хвоя зелёная, не осыпается, ствол дерева не повреждён короедом, нет подтёков смолы;
- 2-й класс дерево в состоянии стресса (известен как green-attack stage (Huo et al., 2021)). Хвоя зелёная, однако наблюдается её частичное осыпание. На стволе дерева возможно присутствие потёков смолы;
- 3-й класс усохшее дерево (red-attack stage и grey-attack stage (Huo et al., 2021)). Хвоя с жёлтым/коричневым подтоном, практически или полностью осыпана.

Визуальных различий между образцами хвои, принадлежащей 1-му и 2-му классу, может не наблюдаться. Ввиду этого в вопросе разделения здоровых и стрессовых хвойных деревьев такая оценка класса состояния растительности в отдельных случаях может быть некорректной и носить субъективный характер.

Поэтому для достижения поставленной цели первоочередной задачей становится разработка объективного и достаточно надёжного критерия, который позволил бы отделять здоровую хвою от хвои в стрессовом состоянии по данным пассивного дистанционного зондирования в спектральном диапазоне 400—900 нм.

Объект исследования и средства измерений

Сбор образцов хвои для лабораторных измерений происходил в июне – октябре 2020 г. на разных участках хвойных и смешанных лесов Минского (53°50'02,5" с.ш., 27°28'16,6" в.д.) и Кайковского (53°39'14,8" с.ш., 27°38'23,4" в.д.) лесничеств Республики Беларусь. Высота участков над уровнем моря составляет от 190 до 252 м, возраст деревьев — от 20 до 50 лет.

При сборе образцов специалистом-лесопатологом оценивалось состояние дерева, определялся его класс и отбирались образцы веток и иголок хвои. Образцы срезались с дерева на уровне 1-2 м от поверхности земли, складывались в зип-пакеты, помещались в морозильную камеру и транспортировались в лабораторию. Примеры образцов, отнесённых к каждому из выделяемых классов, приведены на *рис.* 1 (см. с. 127).

В лаборатории проводилась регистрация спектров отражения собранных образцов на гониофотометре CHERRY (*анел.* CHlorophyll Estimation and Reflectance Registration sYstem)

(Бручковский и др., 2021). Всего в лаборатории было исследовано 11 образцов хвои 1-го класса, 8 образцов хвои 2-го класса и 2 образца хвои 3-го класса.

Методика измерения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) включает в себя процедуру регистрации спектров отражения иголок хвои, которая минимизирует факторы, вносящие неопределённость в рассчитываемое значение КСЯ: пространственное расположение иголок, вклад отражения от подложки и изменение свойств образца вследствие его нагрева источником излучения. Регистрация спектров на гониофотометре CHERRY проводилась в диапазоне 400–2500 нм в надирной геометрии с углом возвышения источника излучения 60°, в качестве подложки использовался нейтральный светофильтр HC10. В рамках настоящей работы анализ полученных КСЯ осуществлялся в диапазоне 400–900 нм с разрешением 1,5–2,9 нм.



Рис. 1. Примеры образцов хвои, отнесённых лесопатологом к выделяемым классам: *a* — 1-й класс; *б* — 2-й класс; *в* — 3-й класс

Наряду с лабораторными измерениями КСЯ проводилась регистрация спектров отражения подстилающей поверхности в надирной геометрии визирования при помощи спектрометра ФСР-02 (двухканальный фурье-спектрометр) (Станчик, Хомицевич, 2017), установленного на борту самолёта Diamond DA40NG, для тестового участка хвойного леса (Guliaeva et al., 2021). Тестовый участок расположен в Кайковском лесничестве (53° 39' 15" с. ш., 27° 38' 25" в.д.), состоит преимущественно из ели обыкновенной и небольшого количества лиственных деревьев. Измерения спектров отражения проводились 10.06.2020 в диапазоне 400–900 нм с разрешением 4,2 нм.

Методы и результаты обработки данных

Методика поиска наиболее информативных вегетационных индексов

Для решения задачи определения объективного критерия разделения здоровой и стрессовой хвои был проведён поиск наиболее информативных для хвои ели обыкновенной вегетационных индексов следующим образом.

- 1. Для измеренных КСЯ образцов рассчитывались 99 вегетационных индексов (https:// www.indexdatabase.de/), которые применяются для определения здоровья зелёной растительности.
- 2. Проводилась классификация без обучения образцов по рассчитанным векторам индексов двумя методами: методом k-средних и методом иерархической кластеризации (https://proglib.io/p/unsupervised-ml-with-python/). При реализации указанных методов количество выделяемых классов задавалось равным трём (в соответствии с названными выше тремя выделяемыми классами состояния хвои). Ввиду отсутствия априорной информации о принадлежности образов к классам (визуальное присвоение к классам полагается субъективным) используются несколько методов классификации. Оба метода дают абсолютно одинаковые результаты; таким образом, полагается, что таковое присвоение классов верное.

- 3. По результатам классификации проводился анализ используемых индексов на информативность. Для каждого из трёх выделенных классов рассчитывались средние значения и среднеквадратические отклонения σ значений индексов по каждому классу. Если средние значения индексов для соседних классов различались более чем на ±2(σ₁ + σ₂), где σ₁, σ₂ — СКО двух соседних классов (1-го и 2-го или 2-го и 3-го), то такие индексы считались информативными. Таким образом было найдено 13 информативных индексов, информация о которых приведена в *таблице*.
- 4. Проводилась повторная классификация образцов по 13-мерным векторам информативных индексов методами k-средних и иерархической кластеризации. Результат повторной классификации аналогичен результатам классификации образцов по 99-мерным векторам индексов, что позволяет сделать заключение о достаточности использования выявленных 13 информативных индексов для определения принадлежности образца хвои ели обыкновенной к одному из выделяемых классов.

На *рис.* 2 приводятся значения информативных индексов для образцов, которые были классифицированы визуальным методом (см. *рис.* 2*a*, *б*) и при помощи предлагаемого метода классификации по 13 информативным индексам (см. *рис.* 2*в*, *г*).

На *рис. 2в*, *г* можно заметить чёткое группирование точек, принадлежащих одному классу, в конкретном диапазоне значений индексов, причём для всех 13 индексов эти диапазоны не пересекаются, что говорит об объективности предложенного критерия классификации в сравнении с методом визуальной оценки.



Рис. 2. Значения информативных индексов для образцов, отнесённых к 1-му (зелёный цвет), 2-му (салатовый цвет) и 3-му (оранжевый цвет) классам состояния хвои, которые были присвоены методом визуальной оценки хвойного дерева (*a*, *б*) и методом классификации образцов по векторам информативных индексов (*в*, *г*)

N⁰	Формула вычисления индекса	Среднее значение индекса для класса $\pm \sigma$		
		1-й класс	2-й класс	3-й класс
1	$TVI = \sqrt{NDVI + 0.5}$	$1,159{\pm}0,008$	1,129±0,005	1,043±0,049
2	$\mathrm{SR800} / 500 = R_{800} / R_{500}$	12,459±0,715	9,149±0,24	5,464±2,548
3	$\text{NDVI} = (R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$	0,843±0,019	0,775±0,011	0,589±0,102
4	$SR800 / 635 = R_{800} / R_{635}$	9,862±0,977	6,914±0,481	3,267±0,578
5	$\mathrm{ND790}/670 = (R_{790} - R_{670})/(R_{790} + R_{670})$	0,846±0,019	0,778±0,011	0,591±0,106
6	$\mathrm{SR800}/\mathrm{675} = R_{\mathrm{800}}/R_{\mathrm{675}}$	12,198±1,69	8,045±0,438	4,156±1,305
7	$\mathrm{SR800} / 650 = R_{800} / R_{650}$	11,073±1,136	7,503±0,452	3,649±0,832
8	$ND800/675 = (R_{800} - R_{675})/(R_{800} + R_{675})$	0,846±0,019	0,779±0,011	0,599±0,102
9	$ND800/650 = (R_{800} - R_{650})/(R_{800} + R_{650})$	0,833±0,015	0,764±0,013	0,563±0,078
10	ND800 / 500 = $(R_{800} - R_{500}) / (R_{800} + R_{500})$	$0,851{\pm}0,008$	0,803±0,005	0,665±0,132
11	$\mathrm{SR800} / 470 = R_{800} / R_{470}$	$13,332\pm0,732$	9,916±0,336	6,302±3,599
12	$ND800/635 = (R_{800} - R_{635})/(R_{800} + R_{635})$	0,815±0,016	0,746±0,017	0,527±0,064
13	$ND800/470 = (R_{800} - R_{470})/(R_{800} + R_{470})$	$0,86{\pm}0,007$	0,817±0,006	0,689±0,153

Информативные индексы для определения состояния хвои ели обыкновенной

Примечание: TVI — *англ*. Transformed Vegetation Index, трансформированный вегетационный индекс; NDVI — *англ*. Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный разностный вегетационный индекс; SR — *англ*. Simple Ratio

Методика классификации для данных авиационного эксперимента

По найденным в процессе анализа лабораторных измерений наиболее информативным 13 вегетационным индексам был построен классификатор для данных авиационного эксперимента. В настоящей работе применялась методика получения КСЯ по данным авиационного эксперимента, представленная в работе (Guliaeva et al., 2021).

Блок-схема алгоритма классификатора иллюстрируется на *puc. 3* (см. с. 130), при этом каждому классу усыхания ставился в соответствие вектор из 13 диапазонов значений для каждого вегетационного индекса. Ввиду того, что количество образцов каждого класса достаточно мало, границы диапазонов вегетационных индексов, найденные в предыдущем разделе, могут быть уточнены. Поэтому границы диапазонов при создании классификатора устанавлись на уровне ±3σ от среднего значения соответствующего индекса.

Предполагается, что неклассифицированные спектры соответствуют другим объектам (не являющимся елью обыкновенной). Таким образом, применённый в работе метод аналогичен известному «методу параллелепипедов» (https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/parallelepiped.html) с тем исключением, что диапазоны значений каждого индекса (компоненты вектора) различны.

На вход описанного классификатора было подано 766 зарегистрированных в ходе авиационного эксперимента 10.06.2020 КСЯ. Результаты классификации следующие: 141 КСЯ отнесён к 1-му классу; 31 — ко 2-му; 213 — к 3-му; 381 КСЯ отмечен как не классифицированный. На *рис. 4* (см. с. 130) приведены примеры КСЯ и соответствующие им изображения (красной рамкой показана область спектрометрирования), отнесённые к каждому из классов.

Как можно заметить по *puc.* 4, предлагаемый метод позволяет идентифицировать и исключить из дальнейшего анализа КСЯ объектов, которые не являются хвойными деревьями. В качестве примера на *puc.* 4*д* показан КСЯ поверхности, не отнесённой ни к одному из трёх выделяемых классов. Как можно заметить из *puc.* 4*г*, неклассифицированная поверхность в самом деле не является хвойным лесом. Также предлагаемый метод способен различать больные деревья с практически осыпавшейся хвоей (см. *рис.* 46).



Рис. З. Блок-схема классификатора для данных авиационного эксперимента



Рис. 4. Примеры классификации авиационных данных: *a* − 1-й класс; *б* − 2-й класс; *в* − 3-й класс; *c* − не классифицировано; *д* − КСЯ соответствующих областей спектрометрирования (цифрами на графике помечен соответствующий класс)

Для оценки неопределённости разработанной методики классификации по данным авиационных измерений применялся метод классификации без обучения *k*-средних. В силу того, что методы классификации без обучения разбивают множество входных данных на заранее известное число классов, такие методы не применяются непосредственно для решения вопроса разделения данных дистанционного зондирования. Поэтому на вход классификатора без обучения по методу *k*-средних подавались только КСЯ, отнесённые при классификации разработанным методом к 1-3-му классам, с целью проверки разделения на классы тех КСЯ, которые априорно принадлежат хвойным. Классификация проводилась по векторам, состоящим из информативных индексов, приведённых в *таблице*. В результате исследования 385 объектов 39 (10,1 %) из них были определены в различные классы в сравнении с классификацией, проведённой при помощи информативных индексов.

Обсуждение результатов

Согласно ряду исследований (Boloorani et al., 2020; Gamon et al., 2016; Rautiainen et al., 2018), с развитием у зелёной растительности стресса КСЯ меняется следующим образом:

- 1. Поднимается уровень КСЯ в зелёном пике КСЯ (~550 нм).
- 2. Поднимается уровень КСЯ в полосе поглощения хлорофилла (~670 нм).
- 3. Красный край сдвигается в более коротковолновую область.
- 4. Опускается уровень инфракрасного (ИК) плато (~800 нм).

На *рис. 5* представлен результат усреднения зарегистрированных в процессе авиационного эксперимента КСЯ, отнесённых к каждому из классов, откуда можно наблюдать все четыре признака развития стресса в хвое (показаны на рисунке стрелками), что является свидетельством корректности проведённых измерений.



Рис. 5. Результат усреднения зарегистрированных в процессе полётных измерений КСЯ, отнесённых к каждому из классов

Расхождение в результатах классификации по разработанной методике и по методу *k*-средних в 10,1 % может возникать по ряду причин. В первую очередь выборка образцов лабораторных измерений, по которым задаются границы диапазонов значений индексов для каждого класса, ограничена, что обуславливает дополнительную неопределённость при работе метода. С увеличением количества лабораторных измерений образцов хвои классификация дистанционных измерений будет уточнятся. Кроме того, важным параметром, вносящим вклад в итоговую неопределённость метода, является состав исследуемого КСЯ. Предлагаемая методика предназначена для случаев, когда в поле зрения спектрометра находится преимущественно хвоя ели обыкновенной. Исследованию особенностей классификации смешанных спектров (с учётом подлеска, лиственных деревьев, веток и т. д.) предполагается уделить внимание в будущем.

Заключение

Проведены лабораторные исследования КСЯ образцов хвои ели обыкновенной (*лат.* Pícea ábies), собранных в летнее время в различных стрессовых состояниях (разбиты на три класса).

Предложен новый метод разделения здоровых и стрессовых образцов хвои на три класса: определён вектор информативных вегетационных индексов, совместный анализ которых позволяет классифицировать КСЯ хвои в соответствии с её состоянием. Согласно представленному в данной работе исследованию, к информативным следует относить индексы: TVI, SR800/500, NDVI, SR800/635, ND790/670, SR800/675, SR800/650, ND800/675, ND800/650, ND800/500, SR800/470, ND800/635, ND800/470. Применение вегетационных индексов при классификации позволяет отсеять неинформативные диапазоны значений КСЯ и тем самым оптимизировать процесс анализа спектральных данных.

Были определены диапазоны значений предложенных информативных индексов для трёх выделяемых классов состояния образцов хвои. Классификатор, построенный с учётом диапазонов значений предложенных индексов, является более надёжным в сравнении с методом визуальной оценки состояния образцов хвои.

Представлены результаты классификации КСЯ хвои, полученных в ходе авиационного эксперимента. Неопределённость классификации, оценённая как доля от общего числа исследованных КСЯ, отнесённых к различным классам согласно разработанному методу и по методу классификации без обучения, составила 10,1 %.

Таким образом, разработанный метод классификации хвои ели обыкновенной может быть использован для обнаружения очагов усыхания хвойного древостоя на самых ранних этапах, а также для анализа дистанционных измерений с высоким спектральным разрешением, выполненных для отдельных хвойных деревьев, когда хвоя является преимущественным объектом в поле зрения спектрометра.

Литература

- 1. *Бручковский И. И., Силюк О. О., Литвинович Г. С., Ломако А. А., Станчик В. В., Гуляева С. И.* Гониофотометр для измерения коэффициентов спектральной яркости и спектров пропускания // Журн. прикладной спектроскопии. 2021. Т. 88. № 2. С 303–310.
- 2. *Станчик В. В., Хомицевич А. Д.* Фотоспектрорадиометр для полевых измерений спектров отражения объектов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы 4-й Международ. научно-практ. конф. Минск, 11–12 мая 2017. Минск: НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ, 2017. С. 145–147.
- 3. *Abdullaha H., Skidmoreab A. K., Darvishzadeha R., Heurich M.* Timing of red-edge and shortwave infrared reflectance critical for early stress detection induced by bark beetle (Ips typographus L.) attack // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. V. 82. Art. No. 101900. DOI: 10.1016/j. jag.2019.101900.
- 4. Beniušienė L., Šilinskas B., Beniušis R., Aleinikovas M., Petrauskas E., Varnagirytė-Kabašinskienė I. Scots Pine Stem Parameters in Sites with Different Stand Densities in Lithuania // Forests. 2020. V. 11(7). Art. No. 716. DOI: 10.3390/f11070716.
- 5. Beniušienė L., Petrauskas E., Aleinikovas M., Varnagirytė-Kabašinskienė I., Beniušis R., Šilinskas B. Norway Spruce Stem Parameters in Sites with Different Stand Densities in Lithuanian Hemiboreal Forest // Forests. 2021. V. 12(2). Art. No. 201. DOI: 10.3390/f12020201.
- 6. *Boloorani A. D., Ranjbareslamloo S., Mirzaie S., Bahramic H.A., Mirzapour F., Tehrani N.A.* Spectral behavior of Persian oak under compound stress of water deficit and dust storm // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. V. 88. Art. No. 102082. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102082.
- Chi D., Degerickx J., Yu K., Somers B. Urban Tree Health Classification Across Tree Species by Combining Airborne Laser Scanning and Imaging Spectroscopy // Remote Sensing. 2020. V. 12(15). Art. No. 2435. DOI: 10.3390/rs12152435.
- 8. *Foster A. C., Walter J. A., Shugart H. H., Sibold J., Negron J.* Spectral evidence of early-stage spruce beetle infestation in Engelmann spruce // Forest Ecology and Management. 2017. V. 384. P. 347–357. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.11.004.
- Gamon J. A., Huemmrich K. F., Wong C. Y. S., Ensminger I., Garrity S., Hollinger D. Y., Noormets A., Peñuelas J. A remotely sensed pigment index reveals photosynthetic phenology in evergreen conifers // Proc. National Academy of Sciences. 2016. V. 113(46). P. 13087–19092. DOI: 10.1073/pnas.1606162113.

- 10. *Guliaeva S. I., Bruchkousky I. I., Katkovsky L. V.* Determining the Drying Out of Coniferous Trees Using Airborne and Satellite Data // Advances in Remote Sensing. 2021. V. 10. No. 2. DOI: 10.4236/ars.2021.102002.
- 11. *Huo L., Persson H.J., Lindberg E.* Early detection of forest stress from European spruce bark beetle attack and a new vegetation index: Normalized distance red and SWIR (NDRS) // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 255. Art. No. 112240. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112240.
- 12. *Kharuk V.I.*, *Im S.T.*, *Ranson K.J.*, *Yagunov M.N.* Climate-Induced Northerly Expansion of Siberian Silkmoth Range // Forests. 2017. V. 8. Art. No. 301. DOI: 10.3390/f8080301.
- Lausch A., Erasmi S., King D., Magdon P., Heurich M. Understanding forest health with remote sensingpart II — A review of approaches and data models // Remote Sensing. 2017. V. 9(2). Art. No. 129. DOI: 10.3390/rs9020129.
- 14. *Lin Q., Huang H., Wang J., Huang K., Liu Y.* Detection of Pine Shoot Beetle (PSB) Stress on Pine Forests at Individual Tree Level using UAV-Based Hyperspectral Imagery and Lidar // Remote Sensing. 2019. V. 11(21). Art. No. 2540. DOI: 10.3390/rs11212540.
- 15. *Rautiainen M., Lukeš P., Homolová L., Hovi A., Pisek J., Mõttus M.* Spectral Properties of Coniferous Forests: A Review of In Situ and Laboratory Measurements // Remote Sensing. 2018. V. 10(2). Art. No. 207. DOI: 10.3390/rs10020207.
- Rodman K. C., Andrus R. A., Butkiewicz C. L., Chapman T. B., Gill N. S., Harvey B. J., Kulakowski D., Tutland N. J., Veblen T. T., Hart S. J. Effects of Bark Beetle Outbreaks on Forest Landscape Pattern in the Southern Rocky Mountains, U.S.A. // Remote Sensing. 2021. V. 13(6). Art. No. 1089. DOI: 10.3390/ rs13061089.
- 17. *Stone C., Mohammed C.* Application of remote sensing technologies for assessing planted forests damaged by insect pests and fungal pathogens: A review // Current Forestry Reports. 2017. V. 3. P. 75–92. DOI: 10.1007/s40725-017-0056-1.
- Trumbore S., Brando P., Hartmann H. Forest health and global change // Science. 2015. V. 349(6250). P. 814–818. DOI: 10.1126/science.aac6759.
- Varo-Martínez M.Á., Navarro-Cerrillo R. M. Stand Delineation of Pinus sylvestris L. Plantations Suffering Decline Processes Based on Biophysical Tree Crown Variables: A Necessary Tool for Adaptive Silviculture // Remote Sensing. 2021. V. 13(3). Art. No. 436. DOI: 10.3390/rs13030436.
- Wulder M. A., Dymond C. C., White J. C., Leckie D. G., Carroll A. L. Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities // Forest Ecology and Management. 2006. V. 221(1–3). P. 27–41. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.09.021.

Pícea ábies stress levels classification by spectral features of remote sensing data

V.A. Siliuk¹, H.S. Litvinovich¹, I.I. Bruchkousky¹, L.V. Katkovsky¹, M. Yu. Belyaev², E. E. Sarmin²

¹ A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belorussian State University Minsk 220045, Belarus E-mail: volha.siliuk@gmail.com

² S. P. Korolev Rocket and Space Corporation "Energia", Korolev 141070, Russia

The work is dedicated to the studies of spectral features of Pícea ábies needles and the search for attributes of stress and dryness of the needles in reflectance spectra in the visible and NIR spectral range. The results of laboratory measurements of needles reflectance spectra for different stress levels (healthy, stressed, ill) are presented, the following vegetation indices are evaluated, which determine whether the needles belong to one of the selected stress levels: TVI, SR800/500, NDVI, SR800/635, ND790/670, SR800/675, SR800/650, ND800/675, ND800/650, ND800/500, SR800/470, ND800/635, ND800/470. For these indices, the ranges of values corresponding to different stress levels of the needles are determined. The proposed method makes it possible to separate healthy needles from needles at the initial stage of stress, when they are still green, which increases the accuracy of the method compared to a visual evaluation of a tree by a forest pathologist. The results of applying the classifier, developed on the basis of the proposed method, to airborne remote sensing data of coniferous forests are presented. The uncertainty evaluated as a percentage of the total number of those spectra for which the assigned stress levels do not match when classified by the proposed method and the alternative method (without training) is 10,1 %.

Keywords: Pícea ábies, reflectance, vegetation indices, vegetation dryness, spectra, remote sensing, airborne measurements, methods of classification

Accepted: 19.08.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-125-135

References

- 1. Bruchkousky I. I., Siliuk O. O., Litvinovich G. S., Lamaka A. A., Stanchik V. V., Guliaeva S. I., Goniophotometer for Measurements of Spectral Reflectance Coefficients and Transmission Spectra, *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*, 2021, Vol. 88, No. 2, pp. 303–310 (in Russian).
- Stanchik V.V., Khomitsevich A.D., Photospectroradiometer for field measurements of objects reflection spectra, *Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya: materialy 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Applied Problems of Optics, Informatics, Radiophysics and Condensed Matter Physics, Proc. 4th Intern. Conf.), Minsk, 11–12 May, 2017, pp. 145–147 (in Russian).
- 3. Abdullaha H., Skidmoreab A.K., Darvishzadeha R., Heurich M., Timing of red-edge and shortwave infrared reflectance critical for early stress detection induced by bark beetle (Ips typographus L.) attack, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, Vol. 82, Art. No. 101900, DOI: 10.1016/j. jag.2019.101900.
- 4. Beniušienė L., Šilinskas B., Beniušis R., Aleinikovas M., Petrauskas E., Varnagirytė-Kabašinskienė I., Scots Pine Stem Parameters in Sites with Different Stand Densities in Lithuania, *Forests*, 2020, Vol. 11(7), Art. No. 716, DOI: 10.3390/f11070716.
- 5. Beniušienė L., Petrauskas E., Aleinikovas M., Varnagirytė-Kabašinskienė I., Beniušis R., Šilinskas B., Norway Spruce Stem Parameters in Sites with Different Stand Densities in Lithuanian Hemiboreal Forest, *Forests*, 2021, Vol. 12(2), Art. No. 201, DOI: 10.3390/f12020201.
- 6. Boloorani A. D., Ranjbareslamloo S., Mirzaie S., Bahramic H. A., Mirzapour F., Tehrani N. A., Spectral behavior of Persian oak under compound stress of water deficit and dust storm, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, Vol. 88, Art. No. 102082, DOI: 10.1016/j.jag.2020.102082.
- 7. Chi D., Degerickx J., Yu K., Somers B., Urban Tree Health Classification Across Tree Species by Combining Airborne Laser Scanning and Imaging Spectroscopy, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12(15), Art. No. 2435, DOI: 10.3390/rs12152435.
- 8. Foster A. C., Walter J. A., Shugart H. H., Sibold J., Negron J., Spectral evidence of early-stage spruce beetle infestation in Engelmann spruce, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 384, pp. 347–357, DOI: 10.1016/j.foreco.2016.11.004.
- 9. Gamon J. A., Huemmrich K. F., Wong C. Y. S., Ensminger I., Garrity S., Hollinger D. Y., Noormets A., Peñuelas J., A remotely sensed pigment index reveals photosynthetic phenology in evergreen conifers, *Proc. National Academy of Sciences*, 2016, Vol. 113(46), pp. 13087–19092, DOI: 10.1073/pnas.1606162113.
- 10. Guliaeva S.I., Bruchkousky I.I., Katkovsky L.V., Determining the Drying Out of Coniferous Trees Using Airborne and Satellite Data, *Advances in Remote Sensing*, 2021, Vol. 10, No. 2, DOI: 10.4236/ars.2021.102002.
- 11. Huo L., Persson H. J., Lindberg E., Early detection of forest stress from European spruce bark beetle attack and a new vegetation index: Normalized distance red and SWIR (NDRS), *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 255, Art. No. 112240, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112240.
- 12. Kharuk V.I., Im S.T., Ranson K.J., Yagunov M.N., Climate-Induced Northerly Expansion of Siberian Silkmoth Range, *Forests*, 2017, Vol. 8, Art. No. 301, DOI: 10.3390/f8080301.
- 13. Lausch A., Erasmi S., King D., Magdon P., Heurich M., Understanding forest health with remote sensing-part II A review of approaches and data models, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9(2), Art. No. 129, DOI: 10.3390/rs9020129.
- Lin Q., Huang H., Wang J., Huang K., Liu Y., Detection of Pine Shoot Beetle (PSB) Stress on Pine Forests at Individual Tree Level using UAV-Based Hyperspectral Imagery and Lidar, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(21), Art. No. 2540, DOI: 10.3390/rs11212540.
- Rautiainen M., Lukeš P., Homolová L., Hovi A., Pisek J., Mõttus M., Spectral Properties of Coniferous Forests: A Review of In Situ and Laboratory Measurements, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10(2), Art. No. 207, DOI: 10.3390/rs10020207.

- Rodman K. C., Andrus R.A., Butkiewicz C. L., Chapman T. B., Gill N.S., Harvey B.J., Kulakowski D., Tutland N.J., Veblen T.T., Hart S.J., Effects of Bark Beetle Outbreaks on Forest Landscape Pattern in the Southern Rocky Mountains, U.S.A., *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13(6), Art. No. 1089, DOI: 10.3390/ rs13061089.
- 17. Stone C., Mohammed C., Application of remote sensing technologies for assessing planted forests damaged by insect pests and fungal pathogens: A review, *Current Forestry Reports*, 2017, Vol. 3, pp. 75–92, DOI: 10.1007/s40725-017-0056-1.
- 18. Trumbore S., Brando P., Hartmann H., Forest health and global change, *Science*, 2015, Vol. 349(6250), pp. 814–818, DOI: 10.1126/science.aac6759.
- Varo-Martínez M. Á., Navarro-Cerrillo R. M., Stand Delineation of Pinus sylvestris L. Plantations Suffering Decline Processes Based on Biophysical Tree Crown Variables: A Necessary Tool for Adaptive Silviculture, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13(3), Art. No. 436, DOI: 10.3390/rs13030436.
- Wulder M.A., Dymond C.C., White J.C., Leckie D.G., Carroll A.L., Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities, *Forest Ecology and Management*, 2006, Vol. 221(1–3), pp. 27–41, DOI: 10.1016/j.foreco.2005.09.021.