Обнаружение усыханий хвойных лесов по авиакосмическим данным

Л. В. Катковский¹, О. О. Силюк¹, Б. И. Беляев¹, М. Ю. Беляев², Э. Э. Сармин², И. И. Бручковский¹, С. И. Гуляева¹, Г. С. Литвинович¹, Ю. С. Давидович¹

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

В статье представлены методики и результаты дистанционного оптического зондирования хвойных насаждений в различных стадиях усыхания с использованием данных лабораторных измерений, авиационной и космической съёмки. Описана спектральная аппаратура, используемая в наземных, авиационных и космических измерениях спектров и изображений образцов хвойных деревьев в различных стадиях усыхания. Один из подходов поиска и классификации усыхающей хвои состоит в различных вариантах генерации и использования изображений вегетационных индексов и классификации на их основе. Определены наиболее информативные вегетационные индексы, имеющие высокие значения коэффициентов корреляции со стадиями усыхания и применимые как для данных высокого спектрального разрешения, так и для мультиспектральных спутниковых снимков. Проводится сравнительный анализ погрешностей классификации при использовании в качестве исходных признаков состояния спектров отражения и вегетационных индексов, а также различных классификаторов (линейного дискриминантного анализа, Random forest и максимального правдоподобия). Показана более высокая точность классификации при использовании векторов вегетационных индексов высокой размерности вместо спектров отражения хвойных деревьев. Другой подход включает преобразование мультиспектральных изображений в исходном спектральном пространстве с целью усиления имеющихся спектральных различий и классификацию преобразованных изображений спектральной яркости. Разработанные методики демонстрируют возможность выявления очагов усыхания в хвойных лесах на основе обработки единовременных космических изображений среднего пространственного разрешения (10-30 м) в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра.

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

Одобрена к печати: 20.06.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-88-102

Введение

Мониторинг хвойных лесов с помощью спутникового дистанционного зондирования важен из-за их большого экологического и экономического значения.

Заметное ухудшение состояния хвойных лесов — одна из важнейших проблем лесоводства в Беларуси, России и многих странах Европы и Северной Америки (Rodman et al., 2021; Stone, Mohammed, 2017; Trumbore et al., 2015). Основными факторами, вызывающими усыхание хвойных лесов, выступают экстремальные климатические условия, загрязнение атмосферы (Mery et al., 2010), водный стресс, поздние весенние заморозки (Kharuk et al., 2015), которые создают предпосылки для массового развития болезней и вредителей. Так, в лесах Центральной и Восточной Европы (Synek et al., 2020), в том числе в Беларуси, в 2019 г. основной причиной усыхания еловых лесов стало заселение ослабленных деревьев короедомтипографом (https://bellesozaschita.by/en/protecting-forests-from-pests-and-diseases/generalcharacteristics-of-the-forest-pathological-situation-in-the-forest-fund-of-the-republic-of-belarus/). В связи с этим представляет интерес аэрокосмический мониторинг лесных территорий, преимуществами которого представляются широта охвата и оперативность получения актуальной информации, что способствует выявлению усыхающих хвойных деревьев на ранних стадиях и минимизации потенциального ущерба (Hlásny et al., 2019).

Дистанционное зондирование усыхания лесов на основе авиационных (Fassnacht et al., 2014; Lausch et al., 2013) и космических (Frolking et al., 2009; Immitzer, Atzberger, 2014; Liang et al., 2014; Meddens et al., 2013; White et al., 2005) сенсоров использует информацию о спектральной отражательной способности, на которую оказывают влияние изменения биофизических и биохимических параметров стрессовых деревьев. Наиболее информативным для анализа ранних стадий усыхания хвои считается спектральный диапазон 450–1050 нм (Fassnacht et al., 2014; Lausch et al., 2013; Wulder et al., 2009). При наличии априорных (наземных) данных спутниковые изображения классифицируются либо на основе яркости в спектральных каналах (Immitzer, Atzberger, 2014; Waser et al., 2014), либо с использованием отдельных вегетационных индексов (Fletcher, 2016; Ortiz et al., 2013; Waser et al., 2014).

Использование классификации с обучением проблематично из-за отсутствия подходящих обучающих (тестовых) выборок, подготовка репрезентативного набора которых сопряжена с проведением сложных и дорогостоящих авиационных или наземных обследований (Pause et al., 2016; Waser et al., 2014; White et al., 2005). Лабораторные спектральные измерения иголок различной степени усыхания применяются обычно для определения биохимических параметров хвои (Cheng et al., 2010) и могут служить опорными данными для анализа изображений дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения.

Согласно приказу Федерального агентства лесного хозяйства России (Рослесхоза) № 90 от 18.05.1992 утверждена шкала из шести категорий (стадий) состояния деревьев, которой до настоящего времени пользуются лесные хозяйства. К 1-й стадии относятся здоровые деревья с густой зелёной кроной и без внешних признаков поражения стволов и корневых лап. У представителей 2-й стадии наблюдается усыхание отдельных ветвей, повреждение отдельных корневых лап, местное повреждение ствола, при этом крона зелёная. З-я стадия характеризуется бледно-зелёной или матовой хвоей, усыханием до 2/3 кроны, наблюдаются местные поселения стволовых вредителей. Деревья с желтоватой или жёлто-зелёной хвоей, усыханием более 2/3 ветвей и признаками заселения стволовыми вредителями относятся к 4-й стадии. Сухостой текущего года и прошлых лет относится к 5-й и 6-й стадиям соответственно. В данной работе будет использоваться указанная шкала состояния деревьев.

В настоящей статье описываются подходы к решению задачи обнаружения патологий хвойных лесов по единовременным данным, что представляется более сложным вопросом в сравнении с использованием временных рядов снимков, например Landsat (Liang et al., 2014; Meddens et al., 2013), Sentinel-2 (Fernandez-Carrillo et al., 2020), WorldView-2 (Immitzer, Atzberger, 2014). Для решения этой задачи использованы лабораторные, наземные, авиационные и космические данные. Некоторые методики и результаты для авиационных и космических данных представлены в работе (Guliaeva et al., 2021), а результаты обработки лабораторных измерений находятся в печати.

Объект исследования и средства измерений

В июне – июле 2020 г. проводились натурные и авиационные измерения, объектом которых стали хвойные леса смешанного состава, расположенные в Минской (53° 39' 14,8" с.ш., 27° 38' 23,4" в.д.) и Гомельской (52° 18' 33,9" с.ш., 31° 5' 59,8" в.д.) областях Республики Беларусь. Высота над уровнем моря участков составляет от 190 до 252 м, возраст деревьев от 20 до 50 лет.

В процессе натурных измерений собирались образцы хвои, стадия состояния которым присваивалась специалистом-лесопатологом. Стоит отметить, что деревья 5-й и 6-й стадии исключены из анализа ввиду того, что к данным стадиям относится сухостой, который при классификации по аэроснимкам однозначно отделяется от представителей первых четырёх стадий. Собранные образцы транспортировались в лабораторию для последующих исследований. Использовались следующие средства измерений:

- Лабораторный гониофотометр CHERRY (*англ.* CHlorophyll Estimation and Reflectance Registration sYstem) (Бручковский и др., 2021) для регистрации спектров отражения собранных образцов хвои.
- Комплекс для наземных съёмок. Солнечный спектрополяриметр ССП-600Н (Катковский и др., 2016), входящий в комплекс, применялся одновременно с полётными измерениями для синхронной наземной регистрации (с частотой два раза в секунду) спектров эталонного экрана (белой диффузной пластины), расположенного в месте проведения съёмок. Эти спектры необходимы для последующего расчёта коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) из спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), зарегистрированной с борта самолётов.
- Комплекс аппаратуры для съёмки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Для установки съёмочной аппаратуры на БПЛА вертолётного типа UVH-25EL был специально изготовлен комплекс КА – БПЛА, в состав которого входят фотоспектрорадиометр ФСР-04 (Катковский и др., 2017), смартфон для управления фотоспектрорадиометром, серийная мультизональная камера Parrot Sequoia (https://mydrone.ru/multispektralnaya-kamera-parrot-sequoia) (спектральные диапазоны 530–570 нм, 640–680, 730–740, 770–810 нм и фотосенсор), блок виброразвязки.
- Комплексы для съёмки с пилотируемых самолётов. В состав комплекса для съёмки с самолёта Diamond DA 40NG входили модульный комплекс мультиспектральной съёмки «Мультискан» (Беляев и др., 2020) и мультиканальный спектральный сенсор МКСС-1 (Бручковский и др., 2020). В последующей обработке будут использованы данные только с МКСС-1, в состав которого входят следующие сенсоры: спектрометр ФСР-02 (аналогичен ФСР-04); обзорная RGB-камера (R англ. red, красный; G англ. green, зелёный; В англ. blue, синий), поле зрения которой «привязано» к полю зрения спектрометра ФСР-02; панхроматическая камера с разрешением 4 Мп; мультизональная камера Parrot Sequoia.

Также в работе использован аэрофотоснимок, полученный 4-канальной камерой ADS-100 Leica (https://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/imaging-sensors/leicaads100-airborne-digital-sensor) с высоты в несколько сотен метров, с пространственным разрешением 5 см, которое для публикации искусственно загрублено до 1 м, и квазисинхронные с наземными и авиационными измерениями данные следующих спутниковых аппаратов: Белорусский космический аппарат (БКА), Landsat-8, Sentinel-2. Ввиду того, что лабораторные измерения и аэросъёмка проводились в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах, на основе которых осуществлён переход к спутниковым данным, в настоящей работе не включались в рассмотрение каналы коротковолнового ИК-диапазона, присутствующие в съёмочных системах спутников Landsat-8 и Sentinel-2.

Классификация данных лабораторных измерений

В процессе лабораторных измерений собранных образцов проводилось исследование информативности измеряемых КСЯ и вегетационных индексов (ВИ) для определения степени усыхания хвойных лесов. При анализе публикаций по теме обнаружения усыханий хвойных деревьев были выбраны ВИ, которые применяются для поставленной цели (Bayat et al., 2016; Dengel et al., 2013; Lausch et al., 2013; Mohammed et al., 2000; Ollinger, 2011; https://www.harrisgeospatial.com/docs/alphabeticallistspectralindices.html). Далее, для каждого КСЯ рассчитывались найденные ВИ. В результате каждому КСЯ в соответствие ставился вектор из рассчитываемых 49 ВИ.

Для классификации по степени усыхания использовалось два метода: линейный дискриминантный анализ (ЛДА) (Kuhn, 2013) и метод Random forest (Hastie et al., 2009) — при подаче на вход каждого классификатора КСЯ или векторов ВИ. Названные методы — это классификаторы с обучением. Для определения точности классификации степени усыхания хвойных деревьев массив данных лабораторных измерений разделялся на обучающую и тестовую выборки. Обучающая выборка состояла из 324 спектров хвои с известными степенями усыхания (присвоенными лесопатологом, всего 4 стадии). Тестовая выборка содержала 36 спектров, каждому из которых соответствовала известная степень усыхания. Точность классификации определялась как процент верного присваивания степени усыхания классификатором от общего числа спектров в тестовой выборке.

Результат работы данного классификатора, когда входными данными были КСЯ, а также когда на вход подаются векторы ВИ, рассчитанные по соответствующим КСЯ, показан на *рис.* 1, где иллюстрируется разделение обучающей выборки в пространстве признаков. По координатным осям под названием «Вектор» отложены значения линейных комбинаций исходных признаков.



Рис. 1. Результат классификации по методу ЛДА: *а* — классификация по КСЯ; *б* — классификация по ВИ; зелёный цвет — 1-я стадия, салатовый — 2-я стадия, оранжевый — 3-я стадия, красный — 4-я стадия

На *рис. 1* можно заметить, что в целом границы областей всех четырёх категорий и обоих вариантов входных данных практически не пресекаются и разделяются достаточно хорошо. В случае, когда на вход классификатора подаются КСЯ, классы и вовсе разнесены в пространстве. Однако точность классификатора на основе КСЯ, рассчитанная с применением тестовой выборки, составляет 75 \pm 9,3 %, а на основе применения ВИ — 80 \pm 6,1 %.

При применении метода классификации Random Forest и использовании КСЯ в качестве входных данных точность классификации довольно низкая и составляет $61\pm9,1$ %, в то время как при подаче на вход классификатора векторов ВИ точность увеличивается до 71 ± 6 %.

Существующие стадии усыхания хвойных деревьев достаточно размыты по своим критериям оценки. Отнесение дерева к одной из стадий порой вызывает сложности даже у специалистов. Грань между двумя соседними степенями усыхания довольно тонкая, в связи с чем было решено уменьшить количество классов с четырёх до трёх путём объединения 2-й и 3-й стадий в одну. Такой класс, объединяющий 2-ю и 3-ю стадии, будет заключать в себе деревья, находящиеся в стрессовом состоянии, однако без визуальных признаков пожелтения хвои и значительного её опадания. Применение такого подхода позволит выделить меньшее число классов с более выраженными характеристиками, что должно сказаться на качестве автоматической классификации. В *табл. 1* приводятся значения точности классификации двумя описанными методами для случая разделения входных данных на три и на четыре стадии усыхания.

Метод	ЛДА (ВИ)	ЛДА (КСЯ)	Random forest (ВИ)	Random forest (KCЯ)
Точность классификации, %				
• при разделении на 4 класса	80±6,1	75±9	71±6	61±9
• при разделении на 3 класса	78±11	79±13	72±9	52±13

Таблица 1. Точность классификации различными методами

Как видно из *табл. 1*, разделение на три класса вместо четырёх не всегда повышает точность классификации для лабораторных данных, однако для данных авиакосмических измерений разбиение на три класса, как правило, дает лучшие результаты. Таким образом, расчёт ВИ показывает себя как самый быстрый и самый простой способ определения состояния растительности, который к тому же учитывает только информативные диапазоны длин волн.

Обработка авиационных данных

Классификация спектров хвойных деревьев, зарегистрированных с беспилотного вертолёта (съёмка в режиме зависания), была проведена на основе использования в качестве входных данных КСЯ и вектора ВИ, состоящего из 49 компонентов. В качестве обучающих выборок для классификаторов использовались лабораторные измерения хвои, описанные в предыдущем разделе и из-за трудности надёжного визуального определения степени усыхания по снимку с беспилотного вертолёта разделённые на два обобщённых класса: здоровые (1–2-я степени усыхания) и больные (3–4-я степени). Классификация проводилась с использованием двух методов: ЛДА и Random Forest.

Как и в случае с лабораторными измерениями, наиболее высокую точность показал метод ЛДА при классификации по векторам ВИ (точность классификации, рассчитанная как отношение правильно классифицированных деревьев к общему их количеству, составила 85 %). Точность классификации по векторам ВИ методом Random Forest составила 60 %. При подаче на вход классификаторов КСЯ точность методов значительно уменьшается и составляет 55 % для метода ЛДА и 45 % для метода Random Forest. Низкую точность при классификации КСЯ можно объяснить влиянием смешанного характера спектра отражения, которое частично нивелируется при расчёте ВИ. Например, для 4-й степени усыхания хвои свойственна редкая прозрачная крона, через которую проступает подлесок, почва и другая растительность, что влияет на вид спектра. Кроме того, использование ВИ типа нормализованной разности в сравнении с использованием спектральной яркости в отдельных каналах может устранить в некоторой степени фоновый шум, влияние различных расстояний до объекта, уменьшить влияние разнообразных атмосферных условий и углов съёмки, систематических ошибок измерений.

Также была проведена классификация объектов лесного участка, зарегистрированных с борта пилотируемого самолёта. На исследуемом участке было установлено присутствие в основном пяти классов объектов: «здоровая растительность», «усыхающая хвоя», «сухостой», «подлесок» и «почвы». Первые три типа объектов относятся к стадиям усыхания хвойных деревьев, причём к классу «здоровая растительность» отнесена «здоровая» хвоя и лиственные деревья. Примеры названных типов объектов иллюстрируются на *рис. 2* (см. с. 93). Классификация проведена для рассчитанных векторов ВИ методом ЛДА с обучением (показавшим более высокую точность). При этом объекты как для обучающей выборки, так и для валидации результатов классификации отбирались визуальным анализом аэрофотоснимков.

Точность классификации составила 74 % для класса «здоровая растительность», 27 % — для «усыхающей хвои» и 48 % — для «сухостоя» (Guliaeva et al., 2021). Визуальный способ верификации результатов может в значительной степени искажать оценку точности классификации из-за невозможности точного определения стадии усыхания по изображению. К указанным погрешностям приводит также использование в качестве обучающих выборок для

авиасъёмки «чистых» лабораторных спектральных данных в противоположность смешанному характеру авиационных спектров, в том числе и из-за движения носителя, хотя за время экспозиции 100 мс при скорости движения 50 м/с самолёт преодолевал расстояние около 5 м, что примерно соответствовало ширине кроны дерева.



Рис. 2. Примеры фотоизображений типов объектов при классификации данных авиационного зондирования: *а* — здоровая растительность; *б* — усыхающая хвоя; *в* — сухостой; *г* — подлесок; *д* — почвы

Методика поиска и применения наиболее информативных вегетационных индексов

В литературе существуют большое количество ВИ, применимых для задачи определения стресса растительности. Для того чтобы установить, какие именно ВИ наиболее информативны для задачи поиска усыхания хвойных деревьев по спутниковым данным аппаратов БКА, Landsat-8, Sentinel-2, была применена методика, описанная ниже.

Вегетационные индексы рассчитываются чаще всего по типовым формулам, таким как простое отношение значений КСЯ (формула (1)) или отношения разности значений КСЯ на двух длинах волн к их сумме (нормированная разность, формула (2)):

$$SR = \frac{KC\Re(\lambda_1)}{KC\Re(\lambda_2)},$$
(1)

$$ND = \frac{KC\Re(\lambda_1) - KC\Re(\lambda_2)}{KC\Re(\lambda_1) + KC\Re(\lambda_2)}.$$
(2)

С целью определения пар длин волн, которые можно использовать в формулах типа (1) и (2) и при этом получать ВИ, отделяющие степени усыхания, были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона между индексами типа SR и ND и степенями усыхания по данным лабораторных измерений с перебором всех возможных пар длин (Lukes et al., 2013). В результате получились значения коэффициентов корреляции, представленные на *рис. 3* (см. с. 94).

Рисунки За и б очень похожи, что объясняется тем, что информативные с точки зрения состояния растительности диапазоны длин волн КСЯ одинаковы вне зависимости от формулы

расчёта индексов. Это диапазоны полос поглощения хлорофилла, ИК-плато, а также зелёный пик КСЯ, где и отмечается высокая корреляция.



Рис. 3. Коэффициент корреляции Пирсона: *а* — между классом состояния и индексом типа (1); *б* — классом состояния и индексом типа (2)

На *рис. 3* наблюдаются достаточно широкие области высокой корреляции ВИ и степеней усыхания. Это приводит к возможности применения некоторых ВИ для мультиспектральных изображений спутниковых сенсоров, имеющих достаточно широкие спектральные каналы. Наложение границы диапазонов каналов спутниковых сенсоров на данные *рис. 3* позволяет определить ВИ, которые можно рассчитать с использованием имеющихся каналов и которые потенциально могут помочь в определении территорий хвойных лесов, находящихся в стрессовом состоянии. Для определения широкополосных ВИ были взяты данные спутниковых аппаратов БКА, Landsat-8 и Sentinel-2.

На *рис.* 4 представлены результаты нанесения на *рис.* 36 положений каналов сенсоров указанных спутниковых аппаратов. Для удобства восприятия на *рис.* 4 выделены цветом только области с высокой корреляцией (антикорреляцией) (R > 0.8; R < -0.8), остальные области закрашены в белый цвет, а также отображаются только области под нижней диагональю координатной плоскости.



Рис. 4. Области высокой корреляции между индексом типа (2) и классом и положения границ каналов спутниковых сенсоров: a - 5KA; $\delta - Landsat-8$; e - Sentinel-2; синий цвет - R > 0,8; красный - R < -0,8

После нанесения по двум осям положений спектральных каналов спутниковых сенсоров выделялись регионы пересечения разных каналов между собой, которые, в свою очередь,

полностью или преимущественно накладывались на область с высокой корреляцией (синюю либо красную). На рис. 4а и б такие области выделены белыми прямоугольниками. Это означает, что при подстановке в формулу (2), например, 3-го и 4-го каналов (формула для NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс)) или 2-го и 4-го каналов БКА получаемые индексы теоретически будут характеризовать состояние хвойных лесов. На рис. 48, где изображены положения каналов мультиспектрального сенсора Sentinel-2, сплошными линиями одного цвета обозначены границы каналов, съёмка в которых ведётся с пространственным разрешением 10 м, а штриховыми линиями — с пространственным разрешением 20 м. Каналы Sentinel-2 с разрешением 60 м здесь не приводятся, так как данные с таким невысоким разрешением уже неинформативны при изучении состояния лесов. Стоит отметить, что имеется возможность конвертации данных с разрешением 10 м к разрешению 20 м для совместного анализа. На рис. 4в регионы пересечения каналов, приходящиеся на области с высокой корреляцией, не обозначены, так как ввиду их большого количества ухудшается восприятие рисунка. Отмечается высокая потенциальная информативность каналов 5, 6 и 7, располагающихся в области красного края поглощения хлорофилла.

Так как области спектра с одинаковыми корреляциями индексов типа (1) и (2) с классом состояния хвои в целом похожи, диаграммы, аналогичные *рис.* 4, для индекса типа (1) здесь не приводятся. Информативные вегетационные индексы, определённые таким образом для трёх сенсоров спутниковых аппаратов, приводятся в *табл.* 2.

Спутниковый сенсор	Индексы					
-	Простое отношение	Нормированная разность				
БКА	ind1=band4/band1	ind4 = (band4 - band1)/(band4 + band1)				
	ind2=band4/band2	ind5 = (band4 - band2)/(band4 + band2)				
	ind3=band4/band3	ind6 = (band4 - band3)/(band4 + band3)				
Landsat-8	ind1=band2/band5	ind4 = (band2 - band5)/(band2 + band5)				
	ind2=band3/band5	ind5 = (band3 - band5)/(band3 + band5)				
	ind3=band4/band5	ind6 = (band4 - band5)/(band4 + band5)				
Sentinel-2 (10 м)	ind1=band2/band8	ind4 = (band2 - band8)/(band2 + band8)				
	ind2=band3/band8	ind5 = (band3 - band8)/(band3 + band8)				
	ind3=band4/band8	ind6 = (band4 - band8)/(band4 + band8)				
Sentinel-2 (20 м)	ind1=band2/band8A	ind11 = (band2 - band8A)/(band2 + band8A)				
	ind2=band3/band8A	ind12 = (band3 - band8A)/(band3 + band8A)				
	ind3=band4/band8A	ind13 = (band4 - band8A)/(band4 + band8A)				
	ind4=band3/band7	ind14 = (band3 - band7)/(band3 + band7)				
	ind5=band4/band7	ind15 = (band4 - band7)/(band4 + band7)				
	ind6=band5/band7	ind16 = (band5 - band7)/(band5 + band7)				
	ind7=band3/band6	ind17 = (band3 - band6)/(band3 + band6)				
	ind8=band4/band6	ind18 = (band4 - band6)/(band4 + band6)				
	ind9=band5/band6	ind19 = (band5 - band6)/(band5 + band6)				
	ind10=band4/band5	ind 20 = (band 4 - band 5)/(band 4 + band 5)				

Таблица 2. Вегетационные индексы для данных спутниковых аппаратов, характеризующие состояние хвойных лесов (вид Ель обыкновенная, или Ель европейская (*лат.* Picea abies))

Некоторые из представленных в *табл. 2* выражений — широко известные ВИ, например NDVI (нормированная разность ближнего ИК и красного каналов), GNDWI (*англ.* Gaussian Normalized Difference Water Index, нормированная разность ближнего ИК и зелёного каналов),

GRVI (*англ*. green-red vegetation index, простое отношение ближнего ИК и зелёного каналов). Этот метод позволяет определить наиболее информативные типовые ВИ, помогая отделить из большого множества ВИ из литературы именно те, которые можно рассчитать по измерениям данного сенсора с конкретными положениями спектральных каналов.

Обработка спутниковых данных

Проведена классификация спутникового изображения Sentinel-2 на территорию Гомельской обл. (Зябровка). Классификация проводилась по следующему алгоритму. Были рассичитаны подходящие для спутникового изображения Sentinel-2 (*puc. 5a*) с разрешением 10 м ВИ из *табл. 2.* По значениям этих индексов был создан классификатор на основе диапазонов значений индексов для разных классов, полученных в лабораторных измерениях. Далее, на спутниковом изображении выделялись регионы лесного массива, остальные пиксели маскировались. Каждому пикселю леса ставился в соответствие вектор рассчитанных индексов и проводилась процедура классификации методом максимального правдоподобия. Результаты классификации, приведённые на *рис. 56*, согласуются с визуальным анализом самолётных съёмок.



Рис. 5. Изображение Sentinel-2 (*a*) и результат классификации (*б*): зелёный цвет — здоровая растительность, жёлтый — стрессовая растительность; красный — сухостой

Поскольку большой интерес представляет использование для обнаружения усыхания лесов мультиспектральных изображений с пространственным разрешением 10-30 м, которые легко доступны и покрывают, как правило, большие по площади территории, вместо дорогостоящих снимков очень высокого (1–10 м) и сверхвысокого (менее 1 м) разрешений сравнительный анализ обнаружения усохшего леса был проведён на мультиспектральных изображениях видимого и ближнего ИК-диапазонов БКА (разрешение 10 м), Landsat-8 OLI (*англ.* Operational Land Imager) (разрешение 30 м) и Sentinel-2 (по каналам с разрешением 10 м). В качестве эталонных (истинных) данных при этом были использованы аэрофотоснимки камеры ADS-100 высокого разрешения (1 м).

На *рис.* 6 представлены результаты определения очагов усыханий хвойных насаждений на юге Беларуси по фрагментам изображений трёх указанных выше спутников и аэрофотоснимка ADS-100. Спутниковые данные для классификации — СПЭЯ на верхней границе атмосферы в 4 каналах, авиационные данные — 4-канальные, в относительных единицах без радиометрической коррекции. Классификация с обучением применялась как к исходным изображениям, так и предварительно преобразованным в 4-мерном пространстве (Katkovsky et al., 2020) с целью усиления имеющихся спектральных различий. Классификация выполнялась методом максимального правдоподобия, который оказался лучшим для данной задачи. В верхней строке *рис.* 6 показаны исходные фрагменты изображений, на которых присутствуют очаги усыханий, хорошо идентифицируемые по аэрофотоснимку высокого пространственного разрешения (верхний левый кадр на *рис. 6*), границы которых были также уточнены наземными обследованиями (нижний левый кадр на *рис. 6*). Данные аэрофотоснимка ADS-100 считались эталонными ввиду хорошего разрешения снимка и возможности достаточно точно визуально определить границы очагов усыхания (точность классификации условно принята за 100 %). Изображения БКА, Sentinel-2, Landsat-8 выглядят размытыми, поскольку ресемплированы к разрешению аэрофотоснимка ADS-100 (1 м) для обеспечения возможности расчёта матрицы ошибок.



Рис. 6. Наложение (нижний ряд) найденного класса «усыхания» (красный цвет) на фрагменты исходных (верхний ряд) изображений

Точность классификации космических снимков относительно классификации по аэрофотоснимку показана в *табл. 3*: общая точность по заданным областям интереса и точность по классу «усыхания» для исходных и преобразованных снимков.

Источник снимка	ADS 100 Leica	БКА	Sentinel-2	Landsat-8 OLI
Точность классификации, %:				
• общая	99,6	88,3	91,6	95,8
 по классу «усыхания» (по исходному снимку/ по преобразованному) 	100	57,8/60,9	56,5/57,5	56,8/57,2

Была также проведена классификация указанных спутниковых изображений после атмосферной коррекции. При этом не было выявлено явного повышения точности, что может быть связано с проводимым ресемплированием (сильным сглаживанием).

Заключение

Проведены исследования применения различных методов классификации с обучением для задачи разделения лабораторных измерений образцов хвои по степеням усыхания. Показано, что использование в качестве исходных данных для классификации векторов ВИ вместо КСЯ увеличивает точность классификации. При этом большую точность показывает метод линейного дискриминантного анализа. Эти выводы подтверждаются и при обработке авиационных измерений.

Проведены классификации полученных данных аэросъёмки лесных территорий. При классификации данных съёмки с БПЛА для класса усыхающих хвойных деревьев метод ЛДА

по ВИ показывает точность 85 %, а метод Random Forest — 60 %. При классификации по КСЯ точности 55 и 45 % соответственно. Точность классификации данных с пилотируемого самолёта (с присутствием пяти классов объектов) несколько ниже: 74 % — для класса «здоровая растительность», 27 % — для «усыхающей хвои» и 48 % — для «сухостоя».

На основе обработки лабораторных спектров хвои в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра для обнаружения территорий усыхающих хвойных лесов на спутниковых данных найдены информативные для задачи поиска патологий хвойных лесов ВИ для данных сенсоров БКА, Landsat-8 и Sentinel-2. Поскольку лабораторные измерения и аэросъёмка проводились в видимом и ближнем ИК-диапазонах, на основе которых осуществлён переход к спутниковым данным, в настоящей работе не включались в рассмотрение каналы коротковолнового ИК-диапазона, присутствующие в съёмочных системах спутников Landsat-8 и Sentinel-2, которые могут быть информативными для задачи усыхания хвойных и которые будут рассмотрены в последующих работах.

Проведена классификация и выделение усыхающих древостоев на спутниковых мультиспектральных изображениях Sentinel-2, БКА, Landsat-8 (по СПЭЯ на верхней границе атмосферы в 4 каналах видимого и ближнего ИК-спектра), в том числе после преобразований, усиливающих исходные спектральные различия. В качестве эталонных данных использовались области усыхания, подтверждённые на аэрофотоснимке очень высокого пространственного разрешения (1 м). На всех указанных снимках точность по классу «усыхания» составила 56–61 %.

Таким образом, продемонстрированы преимущества использования вектор-индексов высокой размерности (вместо значений яркости в каналах) для обнаружения усыханий на авиакосмических снимках при классификации с обучением и возможность обнаружения очагов усыхания по мультиспектральным изображениям среднего пространственного разрешения в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра.

Литература

- 1. *Беляев Ю. В., Чумаков А. В., Попков А. П.* Определение усыхающих ельников по изображениям аппаратуры «Мультискан» // Приборостроение-2020: материалы 13-й Международной научно-техн. конф. 18–20 нояб. 2020, Минск, Республика Беларусь. Минск: БНТУ, 2020. С. 171–173. https://rep. bntu.by/handle/data/86984.
- 2. Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Силюк О.О., Домарацкий А.В. Мультиканальный спектральный сенсор МКСС-1 // Приборостроение-2020: материалы 13-й Международной научно-техн. конф. 18–20 нояб. 2020, Минск, Республика Беларусь. Минск: БНТУ, 2020. С. 355–357. https://rep. bntu.by/handle/data/86863.
- 3. *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.
- Катковский Л. В., Мартинов А. О., Крот Ю. А., Бручковская С. И., Ломако А. А., Силюк О. О., Станчик В. В., Хомицевич А.Д. Солнечный спектрополяриметр ССП 600 // Приборостроение-2016: материалы 9-й Международной научно-техн. конф. 23–25 нояб. 2016 / Белорусский нац. техн. ун-т. Минск, 2016. С. 182–183.
- Катковский Л. В., Беляев Б. И., Сосенко В. А., Абламейко С. В. Аппаратно-программный комплекс «Калибровка» для наземного спектрометрирования подстилающей поверхности и атмосферы // 7-й Белорусский косм. конгресс: материалы конгресса. Минск, 24–26 окт. 2017. В 2-х т. Минск, 2017. Т. 2. С. 36–40.
- Bayat B., Tol C., Verhoef W. Remote Sensing of Grass Response to Drought Stress Using Spectroscopic Techniques and Canopy Reflectance Model Inversion // Remote Sensing. 2016. V. 8. Art. No. 557. 24 p. https://doi.org/10.3390/rs8070557.
- Cheng T., Rivard B., Sanchez-Azofeifa G.A., Feng J., Calvo-Polanco M. Continuous wavelet analysis for the detection of green attack damage due to mountain pine beetle infestation // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114(4). P. 899–910. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.005.
- 8. *Dengel S., Grace J., Aakala T., Hari P., Newberry S. L., Mizunuma T.* Spectral characteristics of pine needles at the limit of tree growth in subarctic Finland // Plant Ecology and Diversity. 2013. V. 6(1). P. 31–44. https://doi.org/10.1080/17550874.2012.754512.

- Fassnacht F., Latifi H., Ghosh A., Joshi P., Koch B. Assessing the potential of hyperspectral imagery to map bark beetle-induced tree mortality // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 140. P. 533–548. https:// doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.014.
- Fernandez-Carrillo A., Patočka Z., Dobrovolný L., Franco-Nieto A., Revilla-Romero B. Monitoring Bark Beetle Forest Damage in Central Europe. A Remote Sensing Approach Validated with Field Data // Remote Sensing. 2020. V. 12(21). Art. No. 3634. https://doi.org/10.3390/rs12213634.
- 11. *Fletcher R*. Using Vegetation Indices as Input into Random Forest for Soybean and Weed Classification // American J. Plant Sciences. 2016. V. 7(15). P. 2186–2198. DOI: 0.4236/ajps.2016.715193.
- Frolking S., Palace M. W., Clark D. B., Chambers J. Q., Shugart H. H., Hurtt G. C. Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure // J. Geophysical Research. 2009. V. 114. G00E02. https://doi. org/10.1029/2008JG000911.
- 13. *Guliaeva S.*, *Bruchkousky I.*, *Katkovsky L*. Determining the Drying Out of Coniferous Trees Using Airborne and Satellite Data // Advances in Remote Sensing. 2021. V. 10. P. 25–46. DOI: 10.4236/ars.2021.102002.
- 14. *Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. N.Y.: Springer, 2009. 2nd ed. 746 p.
- 15. Hlásny T., Krokene P., Liebhold A., Montagné-Huck C., Müller J., Qin H., Raffa K., Schelhaas M.J., Seidl R., Svoboda M., Viiri H. Living with bark beetles: impacts, outlook and management options. From Science to Policy 8 / European Forest Inst. 2019. 52 p. DOI: 10.36333/fs08.
- Immitzer M., Atzberger C. Early Detection of Bark Beetle Infestation in Norway Spruce (Picea abies, L.) using WorldView-2 Data // Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation. 2014. V. 5. P. 351–367. DOI: 10.1127/1432-8364/2014/0229.
- 17. *Katkovsky L., Beliaev B., Siliuk V., Beliaev M., Sarmin E., Davidovich Y.* Remote spectral methods for detecting stress coniferous // E3S Web Conf. 2020. V. 223. 02004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022302004.
- Kharuk V. I., Im S. T., Dvinskaya M. L., Golukov A. S., Ranson K. J. Climate-induced mortality of spruce stands in Belarus // Environmental Research Letters. 2015. V. 10. No. 12. Art. No. 125006. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/125006.
- 19. Kuhn M. Applied Predictive Modeling. N.Y.: Springer, 2013. 600 p.
- Lausch A., Heurich M., Gordalla D., Dobner H.-J., Gwillym-Margianto S., Salbach C. Forecasting potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales // Forest Ecology and Management. 2013. V. 308. P. 76–89. https://doi.org/10.1016/j. foreco.2013.07.043.
- Liang L., Chen Y., Hawbaker T., Zhu Z., Gong P. Mapping Mountain Pine Beetle Mortality through Growth Trend Analysis of Time-Series Landsat Data // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 5696–5716. https:// doi.org/10.3390/rs6065696.
- Lukes P., Stenberg P., Rautiainen M., Mottus M., Vanhatalo K. M. Optical properties of leaves and needles for boreal tree species in Europe // J. Remote Sensing Letters. 2013. V. 4. Iss. 7. P. 667–676. https://doi.org/10. 1080/2150704X.2013.782112.
- Meddens A. J. H., Hicke J. A., Vierling L. A., Hudak A. T. Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 132. P. 49–58. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.002.
- Mery G., Katila P., Galloway G., Alfaro R. I., Kanninen M., Lobovikov M., Varjo J. Forests and Society Responding to Global Drivers of Change // Air pollution impacts on forests in changing climate. Vienna, 2010. IUFRO World Ser. P. 55–74.
- 25. *Mohammed G. H., Noland T. L., Irving D., Sampson P. H., Zarco-Tejada P. J., Miller J. R.* Natural and stressinduced effects on leaf spectral reflectance in Ontario species / Ontario Forest Research Inst. 2000. 42 p.
- Ollinger S. V. Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants // New Phytologist. 2011. V. 189. No. 2. P. 375–394. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03536.x.
- 27. Ortiz S. M., Breidenbach J., Kändler G. Early Detection of Bark Beetle Green Attack Using TerraSAR-X and RapidEye Data // Remote Sensing. 2013. V. 5(4). P. 1912–1931. https://doi.org/10.3390/rs5041912.
- Pause M., Schweitzer C., Rosenthal M., Keuck V., Bumberger J., Dietrich P., Heurich M., Jung A., Lausch A. In Situ/Remote Sensing Integration to Assess Forest Health — A Review // Remote Sensing. 2016. V. 8(6). Art. No. 471. 21 p. https://doi.org/10.3390/rs8060471.
- 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. 18 p. https://doi. org/10.3390/rs13061089.
- 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. http:// dx.doi.org/10.1007/s40725-017-0056-1.

- 31. Synek M., Janda P., Mikoláš M., Nagel T.A., Schurman J.S., Pettit J.L., Trotsiuk V., Morrissey R.C., Bače R., Čada V., Brang P., Bugmann H., Begovič K., Chaskovskyy O., Dušátko M., Frankovič M., Kameniar O., Kníř T., Kozák D., Langbehn T., Málek J., Rodrigo R., Saulnier M., Teodosiu M., Vostarek O., Svoboda M. Contrasting patterns of natural mortality in primary Picea forests of the Carpathian Mountains // Forest Ecology and Management. 2020. V. 457. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117734.
- 32. *Trumbore S., Brando P., Hartmann H.* Forest health and global change // Science. 2015. V. 349(6250). P. 814–818. DOI: 10.1126/science.aac6759.
- 33. *Waser L. T., Küchler M., Jütte K., Stampfer T.* Evaluating the Potential of WorldView-2 Data to Classify Tree Species and Different Levels of Ash Mortality // Remote Sensing. 2014. V. 6(5). P. 4515–4545. https://doi.org/10.3390/rs6054515.
- White J. C., Wulder M.A., Brooks D., Reich R., Wheate R. D. Detection of red attack stage mountain pine beetle infestation with high spatial resolution satellite imagery // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 96. P. 340–351. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.007.
- Wulder M. A., White J. C., Carroll A. L., Coops N. C. Challenges for the operational detection of mountain pine beetle green attack with remote sensing // The Forestry Chronicle. 2009. V. 85(1). P. 32–38. https:// doi.org/10.5558/tfc85032-1.

Detection of drying coniferous forests from aerospace data

L. V. Katkovsky¹, V. A. Siliuk¹, B. I. Belyaev¹, M. Yu. Belyaev², E. E. Sarmin², I. I. Bruchkousky¹, S. I. Guliaeva¹, G. S. Litvinovich¹, Yu. S. Davidovich¹

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

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

The paper presents the methods and the results of remote sensing of conifers in different dryness stages. Laboratory measurements, airborne measurements and satellite data were used. Spectral devices that were used in ground, airborne and satellite measurements are described. One of the approaches to the detection and classification of drying conifers is using vegetation indices. Most informative vegetation indices were determined that show high correlation with dryness stages. The indices can be used for both high spectral resolution data and multispectral satellite data. A comparative analysis of classification accuracy is carried out when using as initial signs reflectance or vegetation indices. Several classifiers are used: linear discriminant analysis, random forest and maximum likelihood. A higher classification accuracy is shown when using vectors of high-dimensional vegetation indices instead of the reflectance of coniferous trees. Another approach is transforming multispectral images in the original spectral space in order to enhance the existing spectral differences and classify the transformed reflectance images. The developed methods demonstrate the possibility of identifying drying coniferous forests areas based on the processing of simultaneous space images of medium spatial resolution (10-30 m) in the visible and near-IR spectral ranges.

Keywords: reflectance, vegetation indices, vegetation dryness, spectra, remote sensing, methods of classification

Accepted: 20.06.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-88-102

References

1. Belyaev Yu. V., Chumakov A. V., Popkov A. P., Determination of drying up spruce forests from the images of the equipment "Multiscan", *Priborostroenie-2020* (Instrumentation-2020, Proc. 13th Intern. Scientific and Technical Conf.), Minsk: BNTU, 2020, pp. 171–173 (in Russian), https://rep.bntu.by/handle/ data/86984.

- Bruchkousky I. I., Litvinovich G. S., Siliuk O. O., Domoratsky A. V., Multichannel spectral sensor MKSS-1, *Priborostroenie-2020* (Instrumentation-2020, Proc. 13th Intern. Scientific and Technical Conf.), Minsk: BNTU, 2020, pp. 355–357 (in Russian), https://rep.bntu.by/handle/data/86863.
- 3. Bruchkouski I. I., Siliuk O. O., Litvinovich G. S., Lamaka A. A., Stanchik V. V., Gulyaeva 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).
- Katkovskii L. V., Martinov A. O., Krot Yu. A., Bruchkovskaya S. I., Lomako A. A., Siliuk O. O., Stanchik V. V., Khomitsevich A. D., Solar spectropolarimeter SSP 600, *Priborostroenie-2016* (Instrumentation-2016, Proc. 9th Intern. Scientific and Technical Conf.), Minsk, 2016, pp. 182–183 (in Russian).
- Katkovskii L. V., Belyaev B. I., Sosenko V.A., Ablameiko S. V., Hardware-software complex "Calibration" for ground-based spectrometry of the underlying surface and atmosphere, 7-i Belorusskii kosmicheskii congress (7th Belarusian Space Congress, Proc.), Minsk, 2017, Vol. 2, pp. 36–40 (in Russian).
- 6. Bayat B., Tol C., Verhoef W., Remote Sensing of Grass Response to Drought Stress Using Spectroscopic Techniques and Canopy Reflectance Model Inversion, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Art. No. 557, 24 p., https://doi.org/10.3390/rs8070557.
- Cheng T., Rivard B., Sanchez-Azofeifa G.A., Feng J., Calvo-Polanco M., Continuous wavelet analysis for the detection of green attack damage due to mountain pine beetle infestation, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114(4), pp. 899–910, https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.005.
- Dengel S., Grace J., Aakala T., Hari P., Newberry S. L., Mizunuma T., Spectral characteristics of pine needles at the limit of tree growth in subarctic Finland, *Plant Ecology and Diversity*, 2013, Vol. 6(1), pp. 31–44, https://doi.org/10.1080/17550874.2012.754512.
- 9. Fassnacht F., Latifi H., Ghosh A., Joshi P., Koch B., Assessing the potential of hyperspectral imagery to map bark beetle-induced tree mortality, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 140, pp. 533–548, https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.014.
- Fernandez-Carrillo A., Patočka Z., Dobrovolný L., Franco-Nieto A., Revilla-Romero B., Monitoring Bark Beetle Forest Damage in Central Europe. A Remote Sensing Approach Validated with Field Data, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12(21), Art. No. 3634, https://doi.org/10.3390/rs12213634.
- 11. Fletcher R., Using Vegetation Indices as Input into Random Forest for Soybean and Weed Classification, *American J. Plant Sciences*, 2016, Vol. 7(15), pp. 2186–2198, DOI: 0.4236/ajps.2016.715193.
- 12. Frolking S., Palace M. W., Clark D. B., Chambers J. Q., Shugart H. H., Hurtt G. C., Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114, G00E02, https://doi.org/10.1029/2008JG000911.
- 13. Guliaeva S., Bruchkousky I., Katkovsky L., Determining the Drying Out of Coniferous Trees Using Airborne and Satellite Data, *Advances in Remote Sensing*, 2021, Vol. 10, pp. 25–46, DOI: 10.4236/ars.2021.102002.
- 14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, New York: Springer, 2009, 2nd ed., 746 p.
- 15. Hlásny T., Krokene P., Liebhold A., Montagné-Huck C., Müller J., Qin H., Raffa K., Schelhaas M.J., Seidl R., Svoboda M., Viiri H., *Living with bark beetles: impacts, outlook and management options. From Science to Policy 8*, European Forest Inst., 2019, 52 p., DOI: 10.36333/fs08.
- 16. Immitzer M., Atzberger C., Early Detection of Bark Beetle Infestation in Norway Spruce (Picea abies, L.) using WorldView-2 Data, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 2014, Vol. 5, pp. 351–367, DOI: 10.1127/1432-8364/2014/0229.
- 17. Katkovsky L., Beliaev B., Siliuk V., Beliaev M., Sarmin E., Davidovich Y., Remote spectral methods for detecting stress coniferous, *E3S Web Conf.*, 2020, Vol. 223, 02004, https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022302004.
- Kharuk V.I., Im S.T., Dvinskaya M.L., Golukov A.S., Ranson K.J., Climate-induced mortality of spruce stands in Belarus, *Environmental Research Letters*, 2015, Vol. 10, No. 12, DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/125006.
- 19. Kuhn M., Applied Predictive Modeling, New York: Springer, 2013, 600 p.
- Lausch A., Heurich M., Gordalla D., Dobner H.-J., Gwillym-Margianto S., Salbach C., Forecasting potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 308, pp. 76–89, https://doi.org/10.1016/j. foreco.2013.07.043.
- Liang L., Chen Y., Hawbaker T., Zhu Z., Gong P., Mapping Mountain Pine Beetle Mortality through Growth Trend Analysis of Time-Series Landsat Data, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 5696–5716, https://doi.org/10.3390/rs6065696.
- Lukes P., Stenberg P., Rautiainen M., Mottus M., Vanhatalo K. M., Optical properties of leaves and needles for boreal tree species in Europe, *J. Remote Sensing Letters*, 2013, Vol. 4, Issue 7, pp. 667–676, https:// doi.org/10.1080/2150704X.2013.782112.

- 23. Meddens A. J. H., Hicke J. A., Vierling L. A., Hudak A. T., Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 132, pp. 49–58, https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.002.
- 24. Mery G., Katila P., Galloway G., Alfaro R. I., Kanninen M., Lobovikov M., Varjo J., Forests and Society Responding to Global Drivers of Change, *Air pollution impacts on forests in changing climate*, Vienna, 2010, IUFRO World Ser., pp. 55–74.
- 25. Mohammed G. H., Noland T. L., Irving D., Sampson P. H., Zarco-Tejada P. J., Miller J. R., *Natural and stress-induced effects on leaf spectral reflectance in Ontario species*, Ontario Forest Research Inst., 2000, 42 p.
- 26. Ollinger S.V., Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants, *New Phytologist*, 2011, Vol. 189, No. 2, pp. 375–394, https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03536.x.
- 27. Ortiz S. M., Breidenbach J., Kändler G., Early Detection of Bark Beetle Green Attack Using TerraSAR-X and RapidEye Data, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5(4), pp. 1912–1931, https://doi.org/10.3390/rs5041912.
- Pause M., Schweitzer C., Rosenthal M., Keuck V., Bumberger J., Dietrich P., Heurich M., Jung A., Lausch A., In Situ/Remote Sensing Integration to Assess Forest Health – A Review, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8(6), Art. No. 471, 21 p., https://doi.org/10.3390/rs8060471.
- 29. 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, 18 p., https://doi. org/10.3390/rs13061089.
- 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, http:// dx.doi.org/10.1007/s40725-017-0056-1.
- Synek M., Janda P., Mikoláš M., Nagel T.A., Schurman J.S., Pettit J.L., Trotsiuk V., Morrissey R.C., Bače R., Čada V., Brang P., Bugmann H., Begovič K., Chaskovskyy O., Dušátko M., Frankovič M., Kameniar O., Kníř T., Kozák D., Langbehn T., Málek J., Rodrigo R., Saulnier M., Teodosiu M., Vostarek O., Svoboda M., Contrasting patterns of natural mortality in primary Picea forests of the Carpathian Mountains, *Forest Ecology and Management*, 2020, Vol. 457, https://doi.org/10.1016/j. foreco.2019.117734.
- 32. Trumbore S., Brando P., Hartmann H., Forest health and global change, *Science*, 2015, Vol. 349(6250), pp. 814–818, DOI: 10.1126/science.aac6759.
- 33. Waser L. T., Küchler M., Jütte K., Stampfer T., Evaluating the Potential of WorldView-2 Data to Classify Tree Species and Different Levels of Ash Mortality, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6(5), pp. 4515–4545, https://doi.org/10.3390/rs6054515.
- 34. White J. C., Wulder M. A., Brooks D., Reich R., Wheate R. D., Detection of red attack stage mountain pine beetle infestation with high spatial resolution satellite imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 96, pp. 340–351, https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.007.
- 35. Wulder M. A., White J. C., Carroll A. L., Coops N. C., Challenges for the operational detection of mountain pine beetle green attack with remote sensing, *The Forestry Chronicle*, 2009, Vol. 85(1), pp. 32–38, https://doi.org/10.5558/tfc85032-1.