

Оценка усыхания темнохвойных лесов, вызванного распространением уссурийского полиграфа, на территории Пермского края по спутниковым и полевым наблюдениям

Л. А. Иванчина, Л. А. Шилоносков, А. Н. Шихов

*Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, 614990, Россия
E-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru*

Рассматриваются признаки усыхания темнохвойных насаждений в центральной части Пермского края, вызванного распространением уссурийского полиграфа, по спутниковым снимкам Sentinel-2 сенсора MSI (*англ.* Multispectral Instrument). Полевые обследования выполнены на 51 пробной площади, в пределах которых определены доли живых, погибших, буреломных и ветровальных темнохвойных деревьев, а также некоторые таксационные характеристики. По спутниковым снимкам Sentinel-2, полученным в июне и июле 2024 г., рассчитаны 28 вегетационных индексов, а также коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) в отдельных каналах. Вычислены коэффициенты корреляции показателей санитарного состояния насаждений с вегетационными индексами и КСЯ по снимкам Sentinel-2. Для ряда индексов выявлена статистически значимая корреляция с показателями санитарного состояния, но по обоим снимкам подтверждена значимость лишь для корреляции между долей живых деревьев и значениями индексов водного стресса LWI (*англ.* Leaf Water Index) и NDMI (*англ.* Normalized Difference Moisture Index). Ранее информативность этих индексов была также показана на примере снимков Landsat. Значения индексов на исследуемых участках примерно в равной степени определяются как долей живых или погибших темнохвойных деревьев, так и таксационными показателями, прежде всего долей темнохвойных пород, полнотой насаждения, долей бурелома и ветровала. Для уточнения зависимости между вегетационными индексами и показателями санитарного состояния древостоев выборка пробных площадей должна включать более однородные насаждения по таксационным показателям.

Ключевые слова: темнохвойные леса, усыхание, уссурийский полиграф, снимки Sentinel-2, коэффициент спектральной яркости, вегетационные индексы, корреляция

Одобрена к печати: 19.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-149-160

Введение

Нарушения лесного покрова, вызванные природными факторами, являются важнейшим элементом динамики лесных экосистем (Seidl et al., 2017). В различных регионах преобладают разные виды нарушений лесного покрова. Так, в Европе 46 % потерь лесов от природных факторов приходится на ветровалы, 24 % — на пожары и 17 % — на вспышки размножения вредителей, главным образом короедов (Patacca et al., 2023). В России ведущую роль играют пожары, потери лесов от которых в два раза превышают даже потери от лесозаготовки и в несколько раз — потери от прочих природных факторов (Curtis et al., 2018; Krylov et al., 2014). Однако в последние десятилетия на фоне изменения климата леса теряют устойчивость к воздействию вредителей и болезней, и связанные с ними потери увеличиваются наиболее интенсивно (Forzieri et al., 2022; Kautz et al., 2017; Kharuk et al., 2021). Так, масштабное усыхание еловых лесов вследствие вспышек короеда-типографа и других вредителей наблюдалось в странах Европы (Hlásny et al., 2021), на Европейской территории России (Крылов и др., 2011) и в Сибири (Kharuk et al., 2021). В Европе площадь потерь лесов вследствие вспышек вредителей удвоилась за 20 лет (Patacca et al., 2023). Для таких регионов, как Россия и страны Центральной и Восточной Азии, аналогичные данные отсутствуют, поскольку мониторинг здесь ведётся менее детально, соответствует менее строгим стандартам, а материалы не всегда публикуются (Malysheva et al., 2000; Yang et al., 2015). Также важно отметить, что гибель лесов от абиотических и биотических факторов часто взаимосвязана — ветровалы, пожары или

водный стресс (засухи) ухудшают санитарное состояние древостоев, что создаёт благоприятные условия для заселения насекомых-вредителей и усиливает негативные последствия от их воздействия (Крылов и др., 2011; Kharuk et al., 2021; Seidl et al., 2017).

Мониторинг повреждений лесного покрова вредителями и болезнями ведётся на основе наземных и дистанционных методов — съёмки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и со спутников. Преимуществами дистанционных методов являются широта охвата и оперативность получения информации, что способствует выявлению усыхающих деревьев на ранних стадиях и минимизации ущерба (Gao et al., 2020; Senf et al., 2017), а для космической съёмки — также и бесплатный доступ к данным. Наиболее информативным для установления ранних стадий усыхания хвои считается спектральный диапазон 450–1050 нм (Lausch et al., 2013; Wulder et al., 2009), а для определения уже сформировавшихся куртин усыхания — средний инфракрасный (Крылов и др., 2011). При этом основной проблемой выявления усыхания древостоев по снимкам Landsat и Sentinel-2 остаётся их относительно низкое пространственное разрешение, поскольку в пределы одного пикселя попадают как усыхающие, так и здоровые деревья (Крылов и др., 2011).

В последние годы актуальной проблемой лесного хозяйства России является распространение уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford), вызывающего усыхание пихтовых древостоев (Кривец и др., 2024). Изначально он был выявлен в Сибири, например, в Восточном Саяне отмечена гибель 75 % площади пихтовых лесов (Харук и др., 2019). В лесах Пермского края к 2024 г. усыхание пихтарников зафиксировано в 13 лесничествах региона и в городских лесах Перми (Кривец и др., 2024). Поскольку участки усыхания деревьев зачастую локальны, основным инструментом их мониторинга становятся БПЛА. Алгоритмы распознавания усыхающих деревьев по снимкам с БПЛА достаточно хорошо развиты (Керчев и др., 2021; Safonova et al., 2019). Спутниковые снимки среднего разрешения применяются для решения этой задачи реже, за исключением тех случаев, когда усыхание представлено достаточно большими группами деревьев. Точность распознавания участков усыхания по снимкам Landsat и Sentinel-2 находится в пределах 56–66 % (Катковский и др., 2022; Крылов и др., 2011).

Цель настоящей работы — выявление информативных признаков усыхания пихтовых древостоев по спутниковым снимкам Sentinel-2 на основе сопоставления с данными полевых наблюдений на пробных площадях (ПП) на территории Пермского края.

Материалы и методы

Объектом исследований служат темнохвойные насаждения, произрастающие на территории трёх лесничеств центральной и западной части Пермского края (рис. 1, см. с. 151). В составе темнохвойных пород на данной территории произрастают пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) и ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) (Овеснов, 2009). Все указанные лесничества расположены на территории Южно-таёжного района европейской части Российской Федерации (Приказ..., 2014). Здесь представлены как здоровые, так и подвергшиеся усыханию в последние годы насаждения, что позволяет получить репрезентативные данные для анализа состояния лесного покрова.

Полевые данные были собраны в пределах 51 ПП в летний период 2024 г. Из них 15 ПП заложены авторами в рамках настоящего исследования. Данные с остальных 36 ПП были получены из актов лесопатологических обследований, предоставленных Министерством природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края. Этим объясняется разный размер ПП: площадь варьирует от 0,24 до 46,15 га. Участки для исследования подбирались в зонах с разной степенью деградации лесных массивов, с наличием свежего сухостоя темнохвойных древостоев. В пределах лесных выделов закладывались два вида ПП: в границах 14 лесных участков — ПП прямоугольной формы, а в границах остальных 37 выделов — круговые реласкопические ПП, которые заложены равномерно по территории лесного выдела с последующим определением средних таксационных показателей (Бунькова и др., 2020).

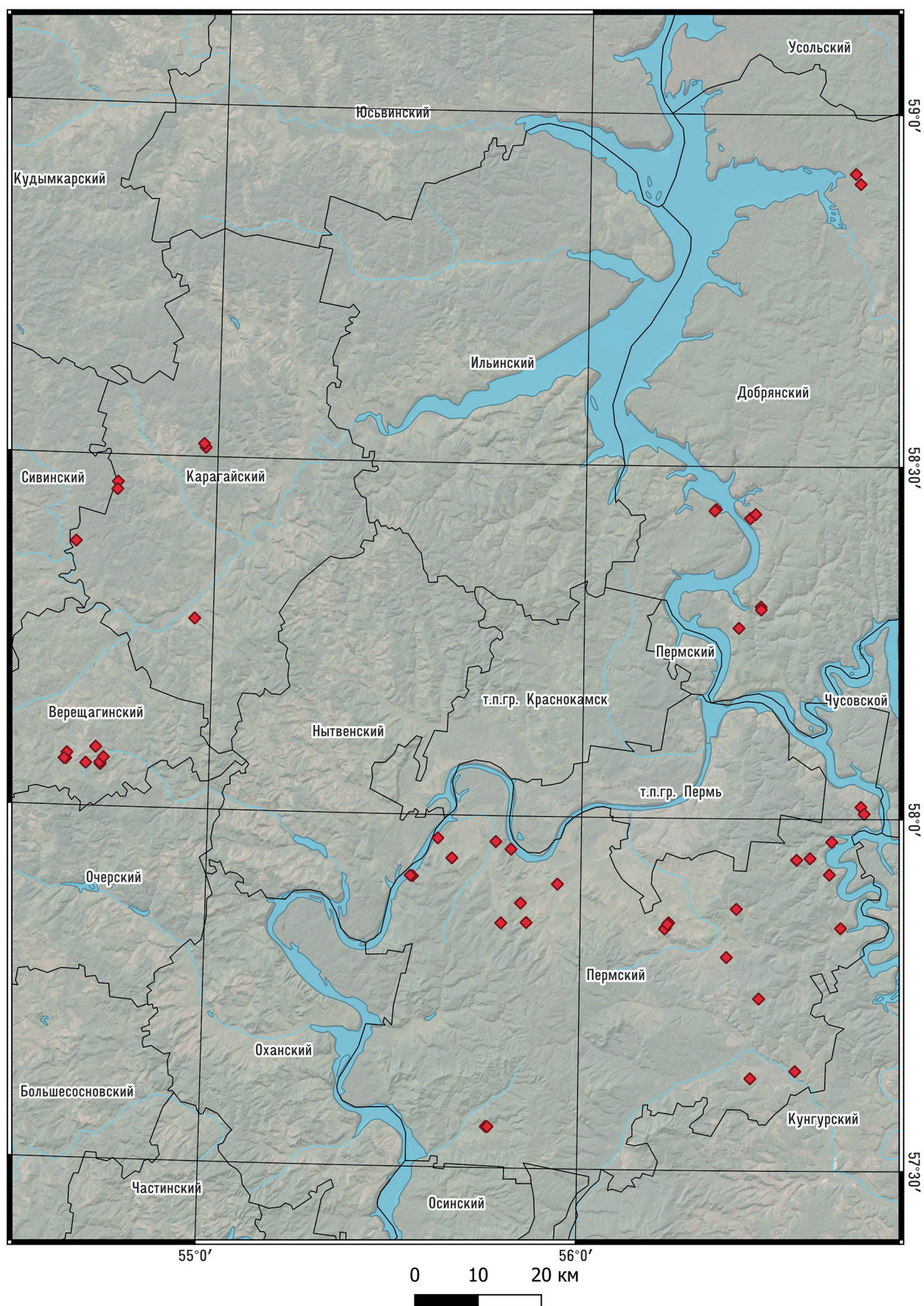


Рис. 1. Схема расположения обследованных лесных участков

Схема расположения обследованных лесных участков представлена на *рис. 1*. В пределах прямоугольных ПП запас и полнота определены путём сплошного перечёта деревьев с измерением диаметра каждого дерева с помощью мерной вилки, а в границах круговых реласкопических площадок — с использованием реласкопа. Также для оценки запаса необходимы были данные по высоте древостоев. С этой целью на каждой ПП у модельных деревьев измерялась высота с помощью высотомера Suunto PM-5/1520. Средняя высота древостоев получена в результате построения графика высот. У каждого дерева ели или пихты на ПП визуально определена категория санитарного состояния в соответствии со шкалой, представленной в действующих Правилах санитарной безопасности в лесах (Постановление..., 2020). При распределении категорий санитарного состояния к живым относили деревья, имеющие следующие категории санитарного состояния: «без признаков ослабления», «ослабленные» и «сильно ослабленные», а к погибшим — «усыхающие», «свежий сухостой» и «старый сухостой». Также оценивалась доля ветровалов и буреломов. В качестве ветровала рассматривались поваленные или наклонённые деревья с обрывом более трети корней, а в качестве бурелома — деревья со сломом ствола ниже одной трети протяжённости кроны, считая от вершины, в соответствии со стандартом ГОСТ Р 57973-2017 (ГОСТ..., 2017). Ветровалы и буреломы рассматривались отдельно, поскольку для ветровалов характерно появление участков открытой почвы там, где деревья вырваны с корнями, что способствует более существенному снижению вегетационных индексов (ВИ), чем на буреломах, для которых такие участки не характерны.

Таким образом, каждое темнохвойное дерево на ПП было отнесено к одной из четырёх категорий: живое, погибшее, бурелом или ветровал, сумма которых составляет 100 %. Доля деревьев каждой категории оценивалась по запасу. На каждой ПП общий запас древостоя складывался из запасов деревьев каждой категории состояния.

В *табл. 1* приведены основные характеристики исследуемых насаждений, рассчитанные для 51 ПП. Доля темнохвойных пород в составе варьирует от 30 до 100 %, в среднем 81 %, причём на 14 участках она составляет 100 %. Преобладают среднеполнотные древостои (среднее значение полноты — 0,5). Доля живых темнохвойных пород деревьев в насаждениях в среднем выше, чем доля погибших (64,7 и 26,8 % соответственно). При этом доля живых деревьев по отдельным ПП составляет от 36,3 до 93,4 %, а доля погибших — от 0 до 59,8 %.

Таблица 1. Основные таксационные характеристики древостоев на пробных площадях

Таксационные показатели	Среднее значение	Максимум	Минимум	Интервал	Медиана	Коэффициент вариации, %
Площадь, га	6,78	46,15	0,24	45,91	3,45	136,1
Доля темнохвойных в породном составе древостоев, %	81	100	30	70	80	22,1
Полнота	0,5	0,8	0,22	0,58	0,5	29,5
Доля живых деревьев от общего запаса древостоя, %	64,7	94,0	36,4	57,6	64,7	23,7
Доля погибших деревьев от общего запаса древостоя, %	26,8	59,8	0	59,8	24,0	54,6
Доля захламлённости от общего запаса древостоя, %, в том числе:	8,5	44,4		44,38	6	108,3
— доля ветровала от общего запаса, %	1,78	30,58		30,58	1,0	244,0
— доля бурелома от общего запаса, %	6,7	34,68		34,68	4,25	105,7

Доля ветровала и бурелома на ПП составляет от 0 до 44 %, в среднем 8,5 %. При этом доля бурелома в насаждениях выше, чем доля ветровала.

Спектральные характеристики исследуемых участков оценивались по спутниковым снимкам Sentinel-2 сенсора MSI (англ. Multispectral Instrument) уровня обработки Level 2A (с выполненной атмосферной коррекцией). Выбор данных Sentinel-2 обусловлен бесплатным доступом к ним, наличием необходимых спектральных каналов (в том числе красного крайнего диапазона спектра, которого нет у данных Landsat), достаточным пространственным разрешением для выявления куртин усыхания, а также высокой повторяемостью съёмки. Снимки получены за 01.06.2024 и 06.07.2024, даты съёмки выбраны по причине отсутствия облачности. Снимок за 06.07.2024 соответствует периоду, когда биохимические характеристики хвои (в частности, содержание хлорофилла) достигают устойчивых значений, типичных для середины лета. Снимок за 01.06.2024 даёт представление о ситуации для поздней весны, учитывая холодную погоду в мае 2024 г. Снимок одного из исследованных участков (Sentinel-2 за 06.07.2024) и фрагмент снимка этого же участка с БПЛА приведены на рис. 2.

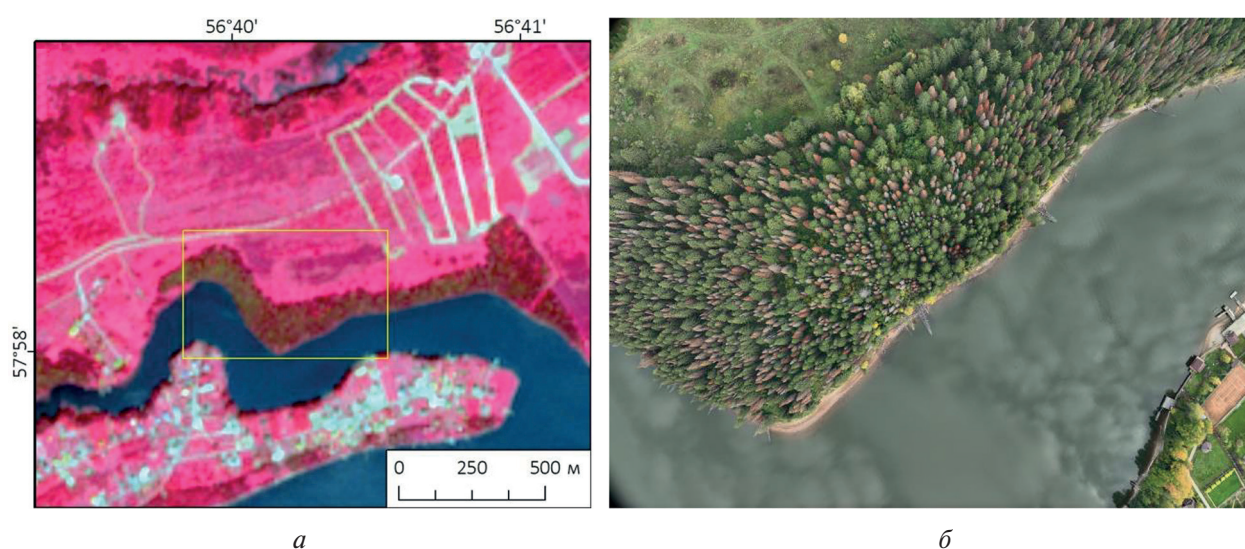


Рис. 2. Участок усыхающего елово-пихтового насаждения в Пермском муниципальном округе Пермского края: а — космический снимок Sentinel-2 за 06.07.2024 в спектральном синтезе «ближний инфракрасный — красный — зелёный»; б — снимок с БПЛА за 26.09.2024. Жёлтым прямоугольником выделена область, показанная на аэрофотоснимке

По двум снимкам Sentinel-2 был выполнен расчёт 26 различных ВИ с последующим определением средних значений в пределах ПП (табл. 2). Также в пределах ПП вычислены средние значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в спектральных каналах MSI с пространственным разрешением 10 и 20 м (всего 10 каналов). Таким образом, оценивалась корреляция между характеристиками насаждений и 36 независимыми переменными (26 различных ВИ и 10 КСЯ). Расчёты выполнены средствами языка Python в программном обеспечении QGIS. На следующем этапе проведены вычисления коэффициентов корреляции (R) — линейного R Спирмена и рангового R Пирсона — между характеристиками состояния насаждений на ПП (долей живых, погибших, ветровальных и буреломных деревьев) и значениями перечисленных ВИ, а также КСЯ в отдельных каналах снимков. Объём выборки соответствует числу ПП (51 объект). Значимость коэффициентов корреляции оценивалась при уровне значимости $p = 0,05$. Также оценивалась степень согласованности между выявленными корреляциями за 01.06.2024 и 06.07.2024, чтобы определить возможное влияние фазы вегетации на полученный результат и устойчивость выявленных зависимостей во времени.

Таблица 2. Названия и расчётные формулы вегетационных индексов

Название индекса		Формула
Полное	Сокращённое	
Enhanced Vegetation Index	EVI	$2,5(B8 - B4)/(B8 + 6B4 - 7,5B2 + 1)$
Normalized Burn Ratio	NBR	$(B8 - B12)/(B8 + B12)$
Normalized Difference Moisture Index	NDMI	$(B8 - B11)/(B8 + B11)$
Moisture Stress Index	MSI	$B11/B8$
Photochemical Reflectance Index	PRI	$(B3 - B4)/(B3 + B4)$
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(B8 - B4)/(B8 + B4)$
Soil-Adjusted Vegetation Index	SAVI	$(B8 - B4)/((B8 + B4 + 0,5) \cdot (1 + 0,5))$
Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI	$(B8 - B3)/(B8 + B3)$
Atmospherically Resistant Vegetation Index	ARVI	$(B8 - (B4 - 1) \cdot (B2 - B4))/(B8 + (B4 - 1) \cdot (B2 - B4))$
Normalized Difference Red Edge Index	NDRE	$(B8A - B5)/(B8A + B5)$
Enhanced Vegetation Index 2	EVI2	$2,5(B8 - B4)/(B8 + B4 + 1)$
Visible Atmospherically Resistant Index	VARI	$(B3 - B4)/(B3 + B4 - B2)$
Normalized Green-Red Difference Index	NGRDI	$(B3 - B4)/(B3 + B4)$
Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index	TCARI	$3((B5 - B4)/(B5 + B4)) - 0,2((B5 - B3)/(B5 + B3))$
Inverted Red-Edge Chlorophyll Index	IRECI	$(B7 - B4)/(B5/B6)$
Simple Ratio	SR	$B8/B4$
Difference Vegetation Index	DVI	$B8 - B4$
Chlorophyll Green Index	CIGreen	$B3/B4$
Chlorophyll Index Green	CIG	$(B8/B3) - 1$
MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	MTCI	$(B8A - B5)/(B5 - B4)$
Red Edge Normalized Difference Vegetation Index	RENDVI	$(B8A - B5)/(B8A + B5)$
Plant Senescence Reflectance Index	PSRI	$(B4 - B2)/B5$
Wide Dynamic Range Vegetation Index	WDRVI	$(0,2B8 - B4)/(0,2B8 + B4)$
Angular Vegetation Index	AVI	$\text{atan}((B8 - B4)/(B8 + B4))$
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	OSAVI	$(B8 - B4)/(B8 + B4 + 0,16)$
Leaf Water Index (возможна неточность)	LWI	$(B8 - B11)/(B8 + B11)$
Red Edge Inflection Point	REIP	$700 + 40(((B4 + B7)/2 - B5)/(B6 - B5))$
Simple Ratio (Bands 4/3)	SR4,3	$B4/B3$
Simple Ratio (Bands 8/4)	SR8,4	$B8/B4$

Примечание: B2 — синий диапазон (490 нм, разрешение 10 м); B3 — зелёный диапазон (560 нм, разрешение 10 м); B4 — красный диапазон (665 нм, разрешение 10 м); B5 — видимый и ближний инфракрасный диапазон (VNIR (*англ.* visible and near-infrared), 705 нм, разрешение 20 м); B6 — VNIR (740 нм, разрешение 20 м); B7 — VNIR (783 нм, разрешение 20 м); B8 — VNIR (842 нм, разрешение 10 м); B8A — VNIR (865 нм, разрешение 20 м); B11 — коротковолновый инфракрасный диапазон (SWIR (*англ.* short wave infrared), 1610 нм, разрешение 20 м); B12 — SWIR (2190 нм, разрешение 20 м).

Результаты

В табл. 3 приведены ВИ, для которых выявлена значимая корреляция с показателями санитарного состояния насаждений. По снимку за 06.07.2024 определено больше значимых корреляций, чем по снимку за 01.06.2024. При этом все значения R не превышают 0,5, т. е. не выявлено ни одного ВИ, который объясняет значительную часть различий по показателям санитарного состояния между ПП.

Доля живых деревьев имеет значимую положительную корреляцию с индексами водного стресса LWI, NDMI и NBR (табл. 3). Для LWI и NDMI значимые R выявлены по снимкам за обе рассматриваемые даты, что указывает на устойчивость зависимостей во времени. Эти индексы основаны на нормализованной разности яркости в ближней и средней инфракрасной зоне спектра (табл. 2) и чувствительны к содержанию воды в листьях и хвое, которое снижается при всех видах повреждений древостоя — как при усыхании, так и при ветровале. Их информативность для выявления усыхания темнохвойных лесов хорошо известна (Крылов и др., 2011).

Таблица 3. Статистически значимые корреляции между характеристиками насаждений и спектральными характеристиками (КСЯ и ВИ) по спутниковым снимкам Sentinel-2

Дата съёмки	Коэффициент корреляции	Статистически значимые R	Доля живых деревьев	Доля погибших деревьев	Доля бурелома	Доля ветровала
06.07.2024	Спирмена	Положительные	NBR, LWI, NDMI	PSRI, MSI, SR4,3, B4	B3, B2	B2
		Отрицательные	B4, MSI, B12, B11, B5	VARI, LWI, NDMI, NGRDI, PRI, CiGreen, NBR, ARVI	PSRI	—
	Пирсона	Положительные	NBR, LWI, NDMI, VARI, ARVI, NGRDI, CiGreen	PSRI, SR4,3, MSI	B2, B3, B5, B4, B12, B11	B2, B4, B3, B12, B5, B11, MSI
		Отрицательные	B4, B12, MSI, B11, B5, B3, PSRI, SR4,3	VARI, NGRDI, PRI, ARVI, CiGreen, NBR, LWI, NDMI	REIP	REIP, NBR, NDMI, LWI
01.06.2024	Спирмена	Положительные	—	—	—	—
		Отрицательные	B11		—	—
	Пирсона	Положительные	LWI, NDMI		B2, B11, B12, B4	MSI, B2, B4, B12, B11, SR4,3, B3
		Отрицательные	B11, B12, B5, B8A, B4, B8, MSI, B3, B6, B7		—	GNDVI, NDMI, LWI, AVI, NBR, NDVI, NDRE, CIG, WDRVI, ARVI, REIP, SR5,4, SR, MTCL, TCAR

Наиболее сильная отрицательная корреляция с долей живых деревьев выявлена для КСЯ в спектральных каналах B4, B11, B12 и индекса MSI, который также относится к индексам водного стресса. Отметим, что КСЯ в каналах B4, B11, B12 имеет также выраженную корреляцию с полнотой насаждения и реагирует на изменение полноты сильнее, чем на усыхание. Это не позволяет использовать его для выявления усыхания. Доля погибших деревьев имеет значимую корреляцию с индексами PSRI и MSI, однако значения R для этих индексов не превышают 0,4. Это указывает на сложность отделения усыхания от других типов повреждения (в данном случае — буреломов и ветровалов). Значимые отрицательные R выявлены для множества индексов, среди которых индексы водного стресса LWI, NDMI, NBR. Но значения R также не превышают 0,4. При этом по снимку за 01.06.2024 все корреляции оказались статистически незначимыми, что указывает на неустойчивость зависимости во времени.

Доля бурелома и ветровала имеет значимые положительные R с КСЯ в каналах видимого диапазона, но их значения достаточно низкие (около 0,3 по обоим снимкам). Положительная корреляция объясняется тем, что по мере увеличения доли бурелома и ветровала растёт доля

открытых пространств в насаждении, и, следовательно, становится выше КСЯ в видимом диапазоне. Отрицательные значимые R для доли ветровала выявлены со многими индексами, однако в основном это коэффициенты Пирсона, неинформативные в связи с тем, что распределение в данных отличается от нормального. Отметим, что доля ветровала и бурелома не имеет значимой корреляции с полнотой древостоя, что может быть обусловлено тем, что на большинстве участков она не превышает 10 %.

На рис. 3 показаны зависимости p -значений, рассчитанных для вышеописанных корреляций за разные даты съёмки (01.06.2024 и 06.07.2024), что позволяет оценивать устойчивость зависимостей во времени; p -значение показывает уровень значимости коэффициента корреляции: чем оно ближе к нулю, тем корреляция более значима.

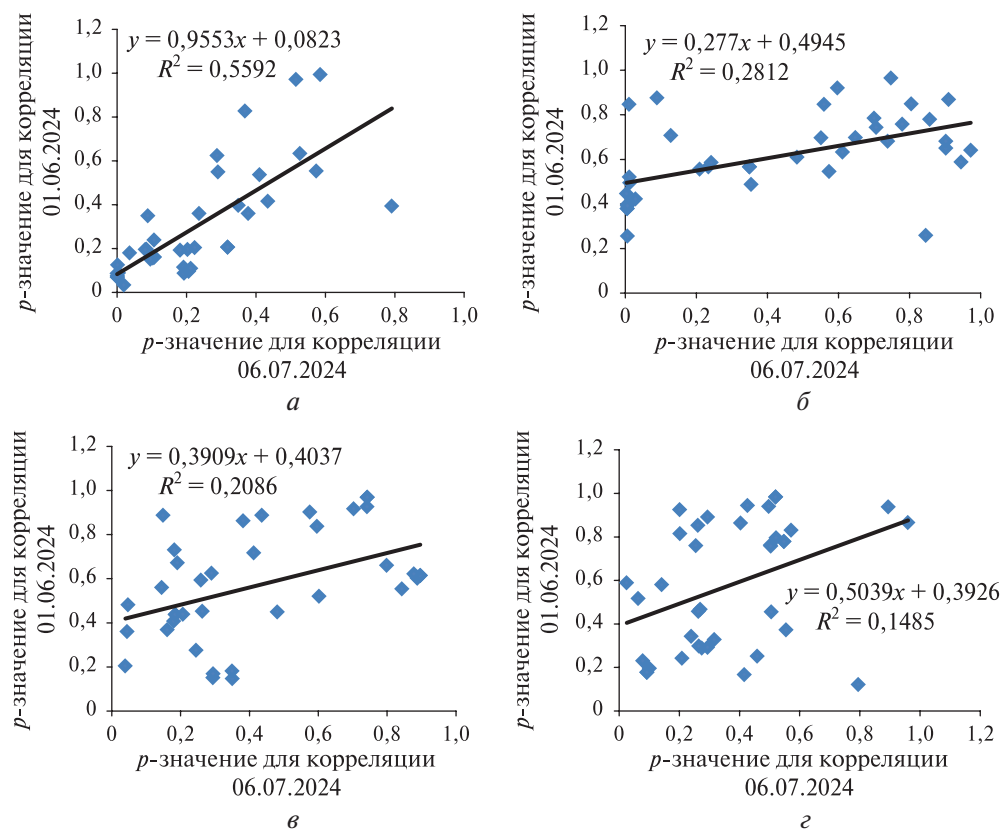


Рис. 3. Зависимость между p -значениями коэффициентов корреляции характеристик санитарного состояния насаждений и ВИ, рассчитанных по снимкам за 01.06.2024 и 06.07.2024: а — доля живых деревьев; б — доля погибших деревьев; в — доля бурелома; г — доля ветровала

Корреляции между долей живых деревьев и значениями ВИ в целом сохраняются по обоим снимкам (см. рис. 3а), а статистически значимыми остаются одни и те же зависимости с индексами водного стресса. Для доли погибших деревьев (см. рис. 3б), доли буреломов и ветровалов (см. рис. 3в, г) зависимость выражена слабо, т. е. корреляции между значениями ВИ и этими показателями по снимкам, полученным в разные даты, не согласуются между собой. Это показывает, что доля живых деревьев является единственной характеристикой насаждений, которая имеет статистически значимые и устойчивые зависимости со значениями ВИ, рассчитанными по данным Sentinel-2.

Вегетационные индексы, которые имеют значимые корреляции с показателями санитарного состояния древостоя, сильно коррелированы друг с другом (для некоторых пар индексов значение R превышает 0,9). Это препятствует построению адекватной модели множественной регрессии на основе ВИ для оценки показателей санитарного состояния. Так, значение множественного R^2 при оценке доли живых деревьев на основе совокупности рассчитанных ВИ и КСЯ составляет всего 0,39, т. е. значения ВИ позволяют объяснить менее 40 % измен-

чивости доли живых деревьев между участками. Но при добавлении в регрессионную модель дополнительных характеристик насаждений (доли бурелома и ветровала, полноты и доли темнохвойных деревьев) множественный R^2 увеличивается до 0,68. Таким образом, для уточнения зависимостей между ВИ и показателями санитарного состояния древостоев выборка ПП должна включать более однородные насаждения по таким показателям, как доля темнохвойных пород, полнота, доля ветровальных и буреломных деревьев.

Заключение

Основным результатом проведённого исследования можно считать, что вегетационные индексы, рассчитанные по спутниковым снимкам Sentinel-2 за июнь и июль 2024 г., объясняют меньше половины различий по показателям санитарного состояния между пробными площадями. Выявлен ряд статистически значимых корреляций между ВИ (или КСЯ в отдельных каналах) и показателями санитарного состояния насаждений. По снимку за 06.07.2024 определено больше значимых корреляций, чем за 01.06.2024. Однако из них устойчивой во времени является только зависимость между индексами водного стресса LWI, NDMI и долей живых деревьев на участке. Она подтверждается ранее опубликованными работами на основе данных Landsat (Крылов и др., 2011). Остальные корреляции хотя и статистически значимы по снимку за июль, но не подтверждаются по второму снимку. На основе ВИ не представляется возможным однозначно отделить усыхание, вызванное вредителями, от других типов повреждений лесов без использования дополнительных данных. Аналогичные выводы приведены и в работе (Крылов и др., 2011).

Индексы, которые имеют значимые корреляции с показателями санитарного состояния древостоя, сильно коррелированы друг с другом (для некоторых пар индексов значение R превышает 0,9). Это препятствует построению адекватной модели множественной регрессии на основе ВИ для оценки показателей санитарного состояния. Значения ВИ на исследуемых участках примерно в равной степени определяются как долей живых или погибших деревьев, так и прочими таксационными показателями, прежде всего долей темнохвойных пород, полнотой насаждения, долей бурелома и ветровала. Для уточнения зависимости между ВИ и показателями санитарного состояния древостоев выборка ПП должна включать более однородные насаждения по таксационным показателям.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-76-10057, <https://rscf.ru/project/24-76-10057/>.

Литература

1. Бунькова Н. П., Залесов С. В., Залесова Е. С., Магасумова А. Г., Осипенко Р. А. Основы фитомониторинга: учеб. пособие. Екатеринбург: Уральский гос. лесотехн. ун-т, 2020. 90 с.
2. ГОСТ Р 57973-2017 «Санитарная безопасность в лесах. Термины и определения». М.: Стандартинформ, 2017. 8 с.
3. Катковский Л. В., Силюк О. О., Беляев Б. И. и др. Обнаружение усыханий хвойных лесов по авиакосмическим данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 88–102. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-88-102.
4. Керчев И. А., Маслов К. А., Марков Н. Г., Токарева О. С. Семантическая сегментация повреждённых деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 116–126. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-116-126.
5. Кривец С. А., Керчев И. А., Бисирова Э. М. и др. Обзор современного вторичного ареала уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на территории Российской Федерации // Российский журн. биол. инвазий. 2024. № 1. С. 49–69. DOI: 10.35885/1996-1499-17-1-49-69.
6. Крылов А. М., Соболев А. А., Владимирова Н. А. Выявление очагов короеда-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat // Вестн. Московского гос. ун-та леса — Лесной вестн. 2011. № 4. С. 54–60.

7. Овеснов С. А. Местная флора: Флора Пермского края и её анализ. Пермь: Пермский гос. ун-т, 2009. 171 с.
8. Постановление Правительства РФ от 9 декабря 2020 г. № 2047 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах».
9. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 18 августа 2014 г. № 367 «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации».
10. Харук В. И., Шушпанов А. С., Петров И. А. и др. Усыхание *Abies sibirica* Ledeb. в горных лесах Восточного Саяна // Сибирский эколог. журн. 2019. № 4. С. 369–382. DOI: 10.15372/SEJ20190401.
11. Curtis P. G., Slay C. M., Harris N. L. et al. Classifying drivers of global forest loss // Science. 2018. V. 361. No. 6407. P. 1108–1111. DOI: 10.1126/science.aau3445.
12. Forzleri G., Dakos V., McDowell N. G. et al. Emerging signals of declining forest resilience under climate change // Nature. 2022. V. 608. P. 534–539. DOI: 10.1038/s41586-022-05071-9.
13. Gao Y., Skutsch M., Paneque-Gálvez J., Ghilardi A. Remote sensing of forest degradation: A review // Environmental Research Letters. 2020. V. 15. No. 10. Article 103001. DOI: 10.1088/1748-9326/abaad7.
14. Hlásny T., König L., Krokene P. et al. Bark beetle outbreaks in Europe: State of knowledge and ways forward for management // Current Forestry Reports. 2021. V. 7. P. 138–165. DOI: 10.1007/s40725-021-00142-x.
15. Kautz M., Meddens A. J. H., Hall R. J., Arneeth A. Biotic disturbances in Northern Hemisphere forests — a synthesis of recent data, uncertainties and implications for forest monitoring and modelling // Global Ecology and Biogeography. 2017. V. 26. No. 5. P. 533–552. DOI: 10.1111/geb.12558.
16. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. et al. Climate-driven conifer mortality in Siberia // Global Ecology and Biogeography. 2021. V. 30. No. 2. P. 543–556. DOI: 10.1111/geb.13243.
17. Krylov A., McCarty J. L., Potapov P. et al. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // Environmental Research Letters. 2014. V. 9. No. 10. Article 105007. DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
18. Lausch A., Heurich M., Gordalla D. et al. 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. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.043.
19. Malysheva N., Shvidenko A., Nilsson S., Petelina S., Öskog A. An overview of remote sensing in Russian forestry: Interim Report IR-00-034. Laxenburg: Intern. Institute for Applied Systems Analysis, 2000. 89 p.
20. Patacca M., Lindner M., Lucas-Borja M. E. et al. Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950 // Global Change Biology. 2023. V. 29. No. 5. P. 1359–1376. DOI: 10.1111/gcb.16531.
21. Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D. et al. Detection of fir trees (*Abies sibirica*) damaged by the bark beetle in unmanned aerial vehicle images with deep learning // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 6. Article 643. 19 p. DOI: 10.3390/rs11060643.
22. Seidl R., Thom D., Kautz M. et al. Forest disturbances under climate change // Nature Climate Change. 2017. V. 7. No. 6. P. 395–402. DOI: 10.1038/nclimate3303.
23. Senf C., Seidl R., Hostert P. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2017. V. 60. P. 49–60. DOI: 10.1016/j.jag.2017.04.004.
24. 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. No. 1. P. 32–38. DOI: 10.5558/tfc85032-1.
25. Yang J., Dai G., Wang S. China's national monitoring program on ecological functions of forests: An analysis of the protocol and initial results // Forests. 2015. V. 6. No. 3. P. 809–826. DOI: 10.3390/f6030809.

Estimation of drying out of dark coniferous forests caused by the spread of the four-eyed fir bark beetle in Perm Krai based on satellite and field observations

L. A. Ivanchina, L. A. Shilonosov, A. N. Shikhov

Perm State University, Perm 614990, Russia

E-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru

The signs of drying out of dark coniferous plantations in the central part of Perm Krai caused by the spread of the four-eyed fir bark beetle are considered using Sentinel-2 satellite images of the MSI (Multispectral Instrument) sensor. Field surveys were carried out on 51 test areas within which the proportion of living, dead, windbreak and windfall dark coniferous trees, as well as some taxation characteristics, were determined. Twenty eight vegetation indices and spectral brightness coefficients (SBC) in separate bands were calculated using Sentinel-2 satellite images obtained in June and July 2024. The correlation coefficients between the indicators of sanitary condition of the plantations and vegetation indices and SBC from the Sentinel-2 images were calculated. Statistically significant correlations with indicators of sanitary condition were revealed for a number of indices, but for both images the significance was confirmed only for the correlation between the proportion of living trees and the values of the leaf water indices (LWI) and normalized difference moisture indices (NDMI). The informative value of these indices was previously demonstrated using Landsat images as an example. The values of the indices in the studied areas are approximately equally determined by both the proportion of living or dead dark coniferous trees and the taxation indicators, primarily the proportion of dark coniferous species, the completeness of planting, the proportion of windbreak and windfall. In order to clarify the dependencies between vegetation indices and sanitary condition indicators of forest stand, the selection of sample areas should include more homogeneous stands according to taxation indicators.

Keywords: dark coniferous forests, drying out, four-eyed fir bark beetle, Sentinel-2 images, spectral brightness coefficient, vegetation indices, correlation

Accepted: 19.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-149-160

References

1. Bun'kova N. P., Zalesov S. V., Zalesova E. S., Magasumova A. G., Osipenko R. A., *Osnovy fitomonitoringa: uchebnoe posobie* (Basics of phytomonitoring: Textbook), Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2020, 90 p. (in Russian).
2. *GOST R 57973-2017 "Sanitarnaya bezopasnost' v lesakh. Terminy i opredeleniya"* (GOST R 57973-2017 "Salvage safety in forests. Terms and definitions"), Moscow: Standartinform, 2017, 8 p. (in Russian).
3. Katkovsky L. V., Siliuk V. A., Belyaev B. I. et al., Detection of drying coniferous forests from aerospace data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 3, pp. 88–102 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-88-102.
4. Kerchev I. A., Maslov K. A., Markov N. G., Tokareva O. S., Semantic segmentation of damaged fir trees in unmanned aerial vehicle images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 1, pp. 116–126 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-116-126.
5. Krivets S. A., Kerchev I. A., Bisirova E. M. et al., Overview of the current secondary range of the Four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) in the Russian Federation, *Russian J. Biological Invasions*, 2024, V. 15, No. 2, pp. 180–197, DOI: 10.1134/S2075111724700061.
6. Krylov A. M., Sobolev A. A., Vladimirova N. A., Identifying the foci of bark beetle in the Moscow Oblast using Landsat images, *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoi vestnik*, 2011, No. 4, pp. 54–60 (in Russian).
7. Ovesnov S. A., *Mestnaya flora. Flora Permskogo kraya i ee analiz* (Local flora: Flora of Perm Krai and its analysis), Perm: Perm State University, 2009, 171 p. (in Russian).
8. *Postanovlenie Pravitel'stva RF "Ob utverzhdenii Pravil sanitarnoi bezopasnosti v lesakh"* (Resolution of the Government of the Russian Federation "On approval of the Rules for sanitary safety in forests"), Dec. 9, 2020, No. 2047 (in Russian).

9. *Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ehkologii Rossiiskoi Federatsii "Ob utverzhdenii Perechnya lesorastitel'nykh zon Rossiiskoi Federatsii i Perechnya lesnykh raionov Rossiiskoi Federatsii"* (Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation "On approval of the List of forest growth zones of the Russian Federation and the List of forest regions of the Russian Federation"), Aug. 18, 2014, No. 367 (in Russian).
10. Kharuk V. I., Shushpanov A. S., Petrov I. A. et al., Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) mortality in mountain forests of the Eastern Sayan Ridge, Siberia, *Sibirskii Ehkologicheskii Zhurnal*, 2019, No. 4, pp. 369–382 (in Russian), DOI: 10.15372/SEJ20190401.
11. Curtis P. G., Slay C. M., Harris N. L. et al., Classifying drivers of global forest loss, *Science*, 2018, V. 361, No. 6407, pp. 1108–1111, DOI: 10.1126/science.aau3445.
12. Forzieri G., Dakos V., McDowell N. G. et al., Emerging signals of declining forest resilience under climate change, *Nature*, 2022, V. 608, pp. 534–539, DOI: 10.1038/s41586-022-05071-9.
13. Gao Y., Skutsch M., Paneque-Gálvez J., Ghilardi A., Remote sensing of forest degradation: A review, *Environmental Research Letters*, 2020, V. 15, No. 10, Article 103001, DOI: 10.1088/1748-9326/abaad7.
14. Hlásný T., König L., Krokene P. et al., Bark beetle outbreaks in Europe: State of knowledge and ways forward for management, *Current Forestry Reports*, 2021, V. 7, pp. 138–165, DOI: 10.1007/s40725-021-00142-x.
15. Kautz M., Meddens A. J. H., Hall R. J., Arneith A., Biotic disturbances in Northern Hemisphere forests — a synthesis of recent data, uncertainties and implications for forest monitoring and modelling, *Global Ecology and Biogeography*, 2017, V. 26, No. 5, pp. 533–552, DOI: 10.1111/geb.12558.
16. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. et al., Climate-driven conifer mortality in Siberia, *Global Ecology and Biogeography*, 2021, V. 30, No. 2, pp. 543–556, DOI: 10.1111/geb.13243.
17. Krylov A., McCarty J. L., Potapov P. et al., Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011, *Environmental Research Letters*, 2014, V. 9, No. 10, Article 105007, DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
18. Lausch A., Heurich M., Gordalla D. et al., 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, pp. 76–89, DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.043.
19. Malysheva N., Shvidenko A., Nilsson S., Petelina S., Öskog A., *An overview of remote sensing in Russian forestry: Interim Report IR-00-034*, Laxenburg: Intern. Institute for Applied Systems Analysis, 2000, 89 p.
20. Patacca M., Lindner M., Lucas-Borja M. E. et al., Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950, *Global Change Biology*, 2023, V. 29, No. 5, pp. 1359–1376, DOI: 10.1111/gcb.16531.
21. Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D. et al., Detection of fir trees (*Abies sibirica*) damaged by the bark beetle in unmanned aerial vehicle images with deep learning, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 6, Article 643, 19 p., DOI: 10.3390/rs11060643.
22. Seidl R., Thom D., Kautz M. et al., Forest disturbances under climate change, *Nature Climate Change*, 2017, V. 7, No. 6, pp. 395–402, DOI: 10.1038/nclimate3303.
23. Senf C., Seidl R., Hostert P., Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, V. 60, pp. 49–60, DOI: 10.1016/j.jag.2017.04.004.
24. 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, No. 1, pp. 32–38, DOI: 10.5558/tfc85032-1.
25. Yang J., Dai G., Wang S., China's national monitoring program on ecological functions of forests: An analysis of the protocol and initial results, *Forests*, 2015, V. 6, No. 3, pp. 809–826, DOI: 10.3390/f6030809.