



DOI: 10.21178/2079–6080.2025.3.146  
УДК 630\*5:528.85:630\*9

## Возможности выявления еловых насаждений, поврежденных короедом-типографом, на материалах космической съемки Sentinel-2 (на примере Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области)

© Д.М. Черниховский, А.С. Алексеев, Л.С. Ветров, М.О. Гурьянов

**The possibility of identifying spruce stands damaged by bark beetles based on Sentinel-2 satellite imagery (on the example of the Lisinsky experimental forestry enterprise of the Leningrad region)**

**D.M. Chernikhovskii, A.S. Alekseev, L.S. Vetrov, M.O. Gurjanov** (Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov)

The study is devoted to the search for methodological approaches to the identification and mapping of spruce stands damaged by bark beetle using Sentinel-2 multi-zone satellite imagery. The objects of the study were spruce stands of different groups of sanitary conditions in the Tosnensky and Gatchinsky districts of the Leningrad region. The objects of the study included 30 permanent sample plots based on the ICP-Forests methodology (healthy and weakened forest stands); 3 sites of mass reproduction of stem pests (shrinking and dead forest stands); 41 mature and overripe spruce stands damaged by bark beetle (severely weakened forest stands). Fragments of cloudless multi-zone satellite images from Sentinel-2 were selected as remote sensing data. Based on them, the brightness of a spectral channels and vegetation indices were determined. A number of statistical analysis operations were performed to identify and evaluate differences between the characteristics of forest stands at different stages of damage. It has been established that differences between groups of categories of spruce stands can be determined based on the NDVI and SWVI indices. Healthy and dead stands differ in average index values. To identify severely weakened stands, it is possible to use the results of the analysis of pixel-by-pixel index values. Information about the pixel-by-pixel distribution of vegetation index values allows you to

obtain additional information about the state of forest stands. If the pixel-by-pixel distribution of vegetation index values deviates from the normal one, their average value will be shifted towards positive (positive asymmetry) or negative (negative asymmetry) index values, respectively, towards the best or worst vegetation condition categories. It was found that for the NDVI and SWVI indices, the proximity of the pixel-by-pixel distribution to the normal is typical for healthy and weakened stands. For severely weakened plantings, there is a deviation of the pixel-by-pixel distribution of vegetation index values from normal, mainly with negative asymmetry. The sites of mass reproduction of stem pests are characterized by average index values and high variation coefficients.

**Keywords:** Norway spruce, bark beetle-typographer, damage to forest stands, satellite images, Sentinel-2, vegetation indexes, analysis of variance, pixel-by-pixel analysis, normal distribution

**Возможности выявления еловых насаждений, поврежденных короедом-типографом, на материалах космической съемки Sentinel-2 (на примере Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области)**

**Д.М. Черниковский, А.С. Алексеев, Л.С. Ветров, М.О. Гурьянов**

Исследование посвящено поиску методических подходов к выявлению и картированию еловых насаждений, поврежденных короедом-типографом с применением материалов многозональной космической съемки Sentinel-2. Объектами исследования являлись ельники разных групп санитарного состояния на территории Тосненского и Гатчинского районов Ленинградской области. Работы по сбору информации проводились на 30 постоянных пунктах учета, заложенных по методике ICP-Forests (здоровые и ослабленные насаждения); 3 участках в очагах массового размножения стволовых вредителей (усыхающие и погибшие); 41 лесотаксационном выделе спелых и перестойных ельников, поврежденных короедом (сильно ослабленные). Материалами дистанционного зондирования служили фрагменты безоблачных многозональных космических снимков Sentinel-2. На их основе выполнялось определение яркостей ряда спектральных каналов и расчет вегетационных индексов. Для выявления и оценки различий между характеристиками насаждений разных стадий повреждения проводился статистический анализ. Установлено, что различия между группами категорий состояния ельников могут определяться на основе индексов NDVI и SWVI. Здоровые и погибшие древостои отличаются средними значениями индексов. Для выявления сильно ослабленных возможно использование результатов попиксельного анализа. В случае отклонения распределения значений вегетационных индексов от нормального, их среднее будет смещено в сторону положительных (положительная асимметрия) или отрицательных (отрицательная асимметрия) величин, соответственно в сторону лучших или худших категорий состояния растительности. Установлено, что для индексов NDVI и SWVI близость распределения к нормальному характерна для здоровых и ослабленных насаждений. Для сильно ослабленных древостоев отмечается отклонение распределения от нормального, преимущественно с отрицательной асимметрией. Очаги повреждения отличаются средними значениями индексов и высокими значениями коэффициентов вариации.

**Ключевые слова:** ель обыкновенная, короед-типограф, повреждение насаждений, космические снимки, Sentinel-2, вегетационные индексы, дисперсионный анализ, попиксельный анализ, нормальное распределение

Черниковский Дмитрий Михайлович – профессор кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, доцент, доктор с.-х. наук

E-mail: cherndm2006@yandex.ru; ORCID: 0000–0002–6375–3080; SPIN-код: 2189–1988

Алексеев Александр Сергеевич – заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, профессор, доктор географических наук

E-mail: a\_s\_alekseev@mail.ru; ORCID: 0000–0001–8795–2888; SPIN-код: 8115–9103

Ветров Леонид Степанович – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, доцент, кандидат с.-х. наук

Гурьянов Михаил Олегович – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, кандидат с.-х. наук; ORCID: 0000–0003–3028–2881; SPIN-код: 2801–5477

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова»

194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, литера У

Телефон: +7 (812) 217–92–46

## Введение

Проблема массового усыхания ельников в разных странах мира и российских регионах регулярно обсуждается исследователями и специалистами на протяжении последних десятилетий. Изучению вспышек размножения насекомых-вредителей, часто сопутствующих усыханию ельников, посвящено значительное число публикаций [12, 13, 14]. Масштабный характер повреждений и зачастую значительные темпы их распространения указывают на ограниченные возможности оперативной оценки состояния лесов наземными методами. Изучение возможностей применения материалов и методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для выявления, анализа и картирования поврежденных насаждений является актуальным направлением исследований [7–9, 11, 17, 18, 21, 25].

Оценка состояния лесов по материалам ДЗЗ основана на изменении спектральных характеристик поврежденных насаждений сравнительно со здоровыми. Под воздействием негативных факторов среды в клеточных тканях ассимиляционных побегов происходят биохимические реакции, сопровождаемые изменениями спектральных характеристик полога насаждений. Примерами подобных изменений являются снижение отражательной способности в ближнем инфракрасном диапазоне, а также эффект «голубого сдвига» (изменение разницы отражательной способности между красной и инфракрасной частями спектра, приводящее к смещению красного края отражения в сторону синей части спектра) [9, 24].

Одной из актуальных исследовательских задач является выявление ранних стадий повреждения еловых насаждений короедом-типографом [16, 19, 20, 21, 25]. Для своевременного обнаружения симптомов усыхания ельников на материалах ДЗЗ рекомендуется использование датчиков в ближней инфракрасной (от 700 до 1300 нм) и коротковолновой инфракрасной (от 1300 до 2500 нм) областях спектра, что подтверждает целесообразность

применения вегетационных индексов NDVI и SWVI. Оба индекса активно рассматриваются в качестве индикаторов состояния насаждений, повреждаемых насекомыми.

Нормализованный индекс NDVI применяется для изучения сезонной и многолетней динамики фотосинтетически активной фитомассы растительности. В публикациях [26, 27] предложена методика мониторинга состояния лесов, подверженных повреждениям насекомыми, на основе анализа отклонения индекса NDVI от сезонной траектории. Данная методика была апробирована на территории Швеции и Финляндии. Отмечается, что индекс NDVI чувствителен к изменениям в растительном покрове, в частности к изменениям сомкнутости лесного полога [7].

Коротковолновый индекс SWVI отражает стресс растительности вследствие воздействия неблагоприятных факторов среды. Использование SWVI позволяет выделять участки древостоев с ухудшенным санитарным состоянием, которое связано как с нарушением процесса фотосинтеза при повреждении или гибели хвои, так и с воздействием на лес атмосферной или почвенной засухи. Также индекс SWVI может использоваться для количественной оценки усыхания и повреждения древесных насаждений. По сравнению с NDVI коротковолновый индекс SWVI обладает более низкой сезонной изменчивостью [7].

В результате изучения многолетней динамики вегетационных индексов на примере Белорусского Полесья установлено, что наиболее высокие значения вегетационных индексов для лесных геосистем отмечаются в летний период. Вследствие негативных воздействий происходит снижение значений вегетационных индексов с одновременным ростом величин стандартного отклонения [5].

Одним из способов обнаружения повреждений лесного растительного покрова является определение разностных и относительных индексов на основе снимков, полученных до и после негативного воздействия [4, 15].

Возможности применения вегетационных индексов NDVI и SWVI для оценки состояния хвойных насаждений на примере Ленинградской области рассмотрены в ряде публикаций [1, 2, 22, 23].

Целью настоящего исследования являлся поиск новых методических подходов к выявлению и картированию еловых насаждений, поврежденных короедом-типографом на основе материалов многозональной космической съемки Sentinel-2 и наземных обследований. Для проведения исследования был подобран набор участков, относящихся к разным категориям санитарного состояния, получены материалы ДЗЗ, выполнена оценка спектральных характеристик.

#### **Объекты и методы исследования**

Объектами исследования служили еловые насаждения, относящиеся к разным группам санитарного состояния в Тосненском и Гатчинском районах Ленинградской области. Большая часть изучаемых участков относится к Лисинскому учебно-опытному лесхозу (ЛУОЛХ) – филиалу Санкт-Петербургского Лесотехнического университета им. С.М. Кирова.

Территория ЛУОЛХ принадлежит к Балтийско-Белозерскому таежному району Российской Федерации и представляет собой компактный лесной массив, в котором на протяжении последних двух столетий ведется интенсивное лесное хозяйство. Все леса относятся к защитным, представленным преимущественно ценными лесами, имеющими научное или историческое значение. По данным государственного лесного реестра на 2018 г., средний состав насаждений 2,9С3,5Е2,3Б1,2Ос0,1Олс, средний возраст 71 год, средний класс бонитета 2,6, средняя полнота 0,67, средний запас спелых и перестойных насаждений 262 м<sup>3</sup> / га.

Для выполнения исследования использовался набор данных, полученных в результате проведения полевых обследований сотрудниками кафедр защиты леса, древесиноведения и охотоведения и лесной таксации, лесоустройства и ГИС СПбГЛТУ в 2021–2024 гг.

31 постоянный пункт учета (ППУ), заложенный по методике ICP-Forests (здоровые и ослабленные насаждения); 3 участка – очаги массового размножения стволовых вредителей (усыхающие и погибшие); 42 лесотаксационных выдела еловых насаждений, поврежденных короедом (сильно ослабленные). Анализируемые участки представлены средневозрастными и спелыми еловыми насаждениями черничных и кисличных типов леса с высокой степенью сомкнутости полога и высокими классами бонитета.

С помощью сервиса Sentinel Hub был сформирован набор фрагментов безоблачных космических снимков Sentinel-2 за период 2018–2024 гг., включающих следующие спектральные диапазоны: В2, В3, В4, В8, В8А, В11. На основе материалов многозональной космической съемки также определялся набор вегетационных индексов. Определение спектральных характеристик изучаемых выделов включало совмещение векторных границ анализируемых участков (лесотаксационных выделов, очагов повреждения и пробных площадей) с материалами ДЗЗ средствами ГИС QGIS.

Для выявления и оценки различий между характеристиками насаждений разных стадий повреждения проводился ряд операций статистического анализа – оценка близости распределения к нормальному, дисперсионный анализ спектральных яркостей отдельных каналов и вегетационных индексов за период 2018–2024 гг., анализ разностных вегетационных индексов.

#### **Результаты и их обсуждение**

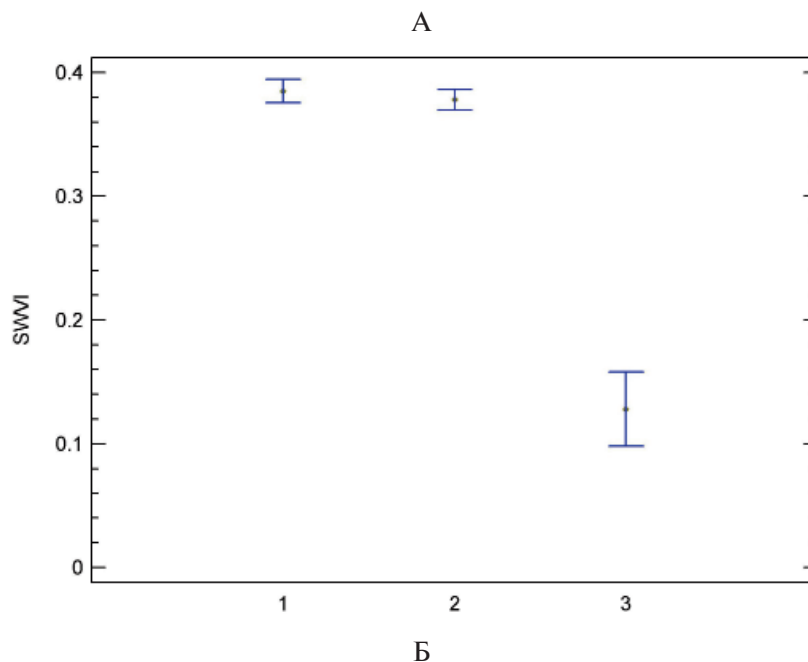
Наиболее очевидным путем выявления крон усохших и сильно ослабленных деревьев в древостоях представляется визуальный анализ (дешифрирование) материалов съемок сверхвысокого пространственного разрешения. Такие данные ДЗЗ на изучаемую территорию отсутствовали. Возможности визуального анализа актуальных космических снимков Landsat и Sentinel оказались ограничен-

ными из-за относительно невысокого пространственного разрешения (10–30 м), не позволяющего идентифицировать отдельные кроны.

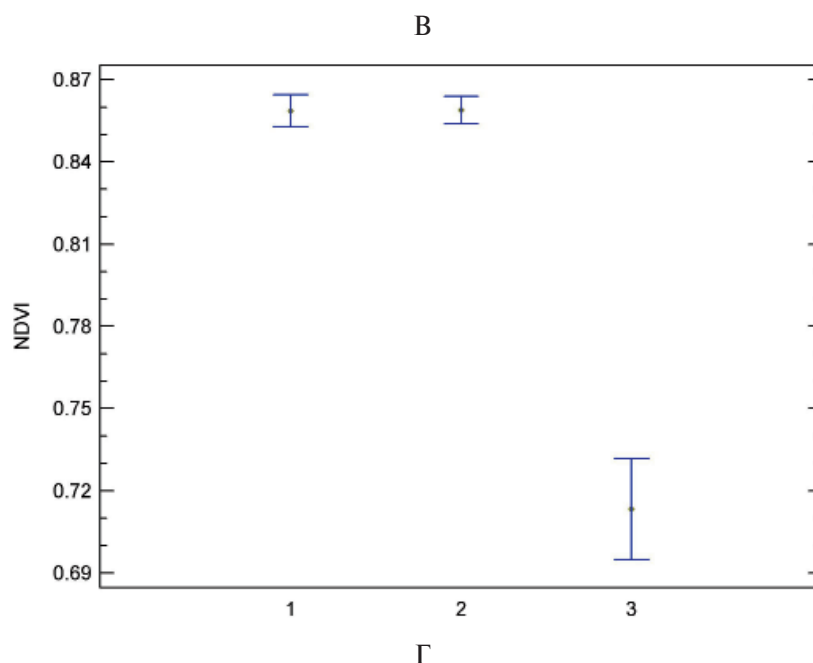
Дисперсионный анализ значений спектральных яркостей отдельных каналов и вегетационных индексов материалов космической съемки Sentinel-2 за период 2018–2024 гг. не выявил статистически значимых различий между характеристиками здоровых насаждений (ППУ) и насаждений с сильно ослабленными деревьями (лесотаксационные выделы) (рис. 1). Характеристики усохших насаждений (очагов повреждения), где сухостойные деревья занимают значительную долю площади, существенно отличались от здоровых.

Близость спектральных характеристик здоровых и сильно ослабленных насаждений на материалах космической съемки в целом объяснима особенностями структуры и состава еловых насаждений ЛУОЛХ и их реакцией на повреждение и гибель отдельных деревьев. Во многих обследованных древостоях присутствовала ель двух поколений со значительным количеством подроста. Повреждение, гибель и выпадение отдельных деревьев (преимущественно старших возрастов и первых классов

Крафта) происходят не одновременно, а на протяжении нескольких лет. Ослабленные, усыхающие и сухостойные деревья, как правило, располагаются в пологе отдельно или небольшими куртинами в окружении здоровых. После выпадения погибших деревьев образовавшиеся в лесном пологе окна через несколько лет занимают деревья младших поколений ели и подрост. Таким образом устойчивость насаждений в целом сохраняется, а площади, занимаемые на материалах ДЗЗ кронами усохших деревьев и открытыми участками остаются относительно невысокими. В процессе определения спектральных характеристик происходит неизбежное усреднение значений яркостей составляющих лесной полог отдельных крон усохших, усыхающих и здоровых деревьев, а также подроста и окружающего фона в пределах пространственного разрешения материалов съемки (порядка 10–20 м). При этом отдельные усыхающие и сухостойные деревья встречаются и в здоровых насаждениях. Поэтому существенной разницы средних величин яркостей и вегетационных индексов между здоровыми и ослабленными насаждениями не отмечается (см. рис. 1).



Источник изменчивости	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат	F-критерий Фишера	Вероятность ошибки (p-value)
Между группами	0,1853	2	0,0927	68,16	0,0000
Внутри групп	0,0965	71	0,0013	—	—
Общая	0,2818	73	—	—	—



Источник изменчивости	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат	F-критерий Фишера	Вероятность ошибки (p-value)
Между группами	0,0609	2	0,0304	59,27	0,0000
Внутри групп	0,0364	71	0,0005	—	—
Общая	0,0974	73	—	—	—

Рис. 1. Результаты дисперсионного анализа значений индексов SWVI и NDVI по группам состояния: А и В – средние значения и доверительные интервалы индексов SWVI и NDVI групп насаждений разного санитарного состояния, Б и Г – таблицы дисперсионного анализа индексов SWVI и NDVI. По оси абсцисс цифрами показаны группы категорий состояния насаждений: 1 – здоровые, 2 – сильно ослабленные, 3 – усыхающие и сухостойные)

Также был выполнен попиксельный анализ распределения значений вегетационных индексов NDVI и SWVI за август 2024 г. Близость распределения индексов к нормальному оценивалась на основе стандартизированных значений

коэффициентов асимметрии и эксцесса средствами ППП Statgraphics Centurion XVII.

Набор статистических характеристик, полученных на основе попиксельных значений индекса SWVI, приведен в таблице 1.

Таблица 1

Статистические характеристики распределения значений индекса SWVI по отдельным участкам

Обозначение участка	Количество пикселей, шт.	Среднее	Коэффициент вариации	Стандартизованная асимметрия	Стандартизованный эксцесс	Обозначение участка	Количество пикселей, шт.	Среднее	Коэффициент вариации	Стандартизованная асимметрия	Стандартизованный эксцесс
P-1	23	0,3954	11,71	-2,12	2,90	1–21	233	0,3714	19,40	-3,81	0,92
P-2	24	0,3482	16,53	-0,37	-1,34	1–24	347	0,3515	41,40	-11,56	7,89
P-3	25	0,4244	15,09	-0,54	-0,37	1–27	227	0,4088	11,67	-0,47	-1,27
P-4	26	0,4222	15,10	0,35	-0,76	1–29	717	0,3987	14,34	-6,80	2,91
P-5	24	0,4078	11,87	-2,81	4,08	1–31	202	0,3451	27,53	-2,77	-0,94
P-6	24	0,415	8,43	-0,39	-0,59	2–6	241	0,3861	18,23	-7,18	4,86
P-7	24	0,3318	14,05	-1,55	-0,21	7–3	208	0,3631	15,28	0,85	-0,38
P-8	24	0,3675	9,19	-0,92	-0,76	7–11	76	0,3475	22,04	-1,80	-0,16
P-9	24	0,1709	15,97	1,86	0,00	7–35	373	0,4075	17,56	-3,37	-0,25
P-10	24	0,3675	9,19	0,13	1,11	10–17	385	0,3727	23,78	-6,41	4,97
P-11	24	0,3969	22,63	-0,50	-1,35	11–46	239	0,3469	30,18	-7,01	4,16
P-12	24	0,3777	17,79	0,15	-0,50	11–55	860	0,3484	21,51	-4,00	0,22
P-13	23	0,4315	13,74	-0,30	-0,79	12–2	90	0,3614	33,01	-6,38	7,91
P-14	23	0,3854	13,67	0,11	-0,90	12–4	309	0,3893	15,99	-1,09	-0,86
P-15	23	0,3954	11,71	0,16	0,01	12–15	396	0,4211	19,38	-7,74	2,56
P-16	24	0,4177	5,33	-2,13	1,53	15–39	260	0,3735	16,79	-1,83	0,17
P-17	23	0,4008	15,27	-0,32	-0,06	15–53	317	0,3825	19,33	-2,19	-0,07
P-18	24	0,3492	23,63	-0,65	-0,75	17–22	869	0,3855	19,40	-5,45	2,28
P-19	24	0,3949	11,48	-0,10	-1,55	83–23	376	0,3451	24,43	-4,25	2,40
P-20	23	0,3954	11,71	-4,14	6,90	83–24	432	0,3738	17,13	2,76	8,31
P-21	24	0,4177	5,33	-0,56	0,14	98–32	221	0,3791	13,73	-8,57	8,16

Обозначение участка	Количество пикселей, шт.	Среднее	Коэффициент вариации	Стандартизованная асимметрия	Стандартизованный эксцесс	Обозначение участка	Количество пикселей, шт.	Среднее	Коэффициент вариации	Стандартизованная асимметрия	Стандартизованный эксцесс
P-22	23	0,3986	10,71	0,19	0,12	98–37	364	0,3423	27,01	-10,13	6,52
P-23	24	0,4019	14,29	0,75	0,26	98–38	134	0,3904	17,99	-2,67	-0,40
P-24	25	0,3807	18,91	0,94	-1,00	104–9	75	0,3876	21,04	-3,02	1,78
P-25	23	0,3954	11,71	-4,38	6,19	104–11	362	0,407	21,72	-7,86	6,19
P-26	24	0,4035	17,09	0,21	-1,30	145–24	92	0,3675	17,49	-1,42	2,21
P-27	24	0,3702	13,61	-1,44	0,09	145–25	114	0,4192	17,14	-2,50	-0,63
P-28	24	0,3802	23,64	0,99	-0,51	145–27	183	0,4123	23,92	-3,57	-0,53
P-29	24	0,3966	15,20	0,19	-0,62	181–7	532	0,3985	18,40	-5,00	0,92
P-30	23	0,4155	7,82	-1,64	1,27	181–19	345	0,3615	17,64	-7,12	7,89
O-1	336	0,2007	54,42	-9,54	6,33	181–21	355	0,3734	25,60	-9,73	9,54
O-2	471	0,1377	95,35	-5,66	-4,23	181–24	78	0,3369	34,21	-2,44	-1,19
O-3	460	0,0455	221,56	4,68	1,57	181–25	210	0,3799	24,33	-8,48	10,26
1–4	162	0,3854	20,67	-2,68	1,00	181–32	104	0,3966	14,54	-0,48	0,16
182–36	707	0,3606	22,57	-7,39	4,94	202–34	472	0,3765	16,95	-3,33	1,61
201–19	610	0,3910	19,15	-9,00	5,93	202–36	442	0,3575	21,17	-3,39	1,55
202–22	736	0,3976	14,34	-5,67	3,65	203–4	659	0,4022	15,44	-5,52	1,11

Примечание. Участки, обозначенные буквой P, – ППУ; O – очаги повреждения; участки, обозначенные двумя цифрами, – лесотаксационные выделы (первое число – номер квартала, второе – номер выдела)

Для оценки степени варьирования вегетационных индексов можно использовать следующую шкалу градаций коэффициента вариации: если он < 10 %, изменчивость показателя оценивается как незначительная, 10–20 % – средняя, 20–33 % – значительная, > 33 % – высокая.

Дополнительную информацию о состоянии насаждений дают сведения о попиксельном распределении значений вегетационных индексов по сравнению с нормальным стандартизованным распределением [3, 6, 10]. Соответствие распределения величин вегетационных индексов для какой-либо из 3-х групп

объектов нормальному распределению свидетельствует о репрезентативности выборки и среднего значения индексов для этой группы объектов. В случае отклонения по픽сельного распределения значений вегетационных индексов от нормального их среднее значение

будет смещено в сторону положительных (положительная асимметрия) или отрицательных (отрицательная асимметрия) величин индексов, соответственно в сторону лучших или худших категорий состояния растительности (рис. 2).

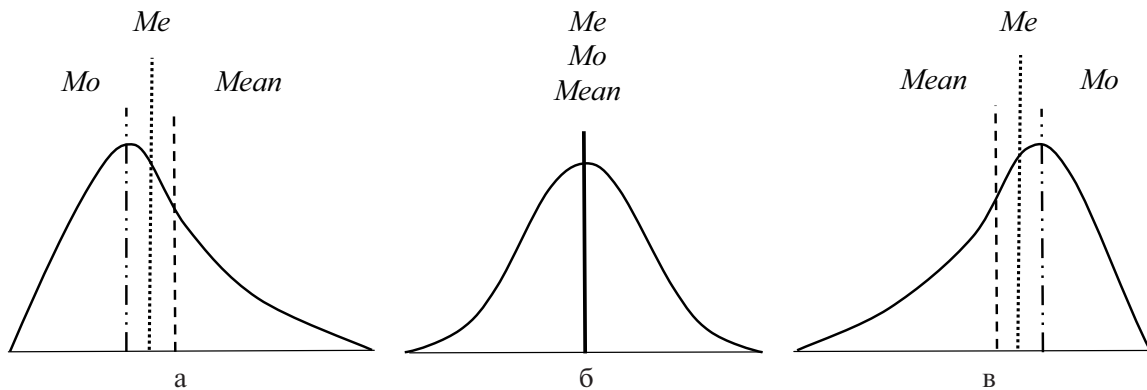


Рис. 2. Смещение статистических характеристик распределений при положительной (а) и отрицательной (в) асимметрии относительно нормального распределения (б).  
Обозначения: *Me* – медиана, *Mo* – мода, *Mean* – среднее

Положительный (отрицательный) эксцесс распределения свидетельствует о меньшем (большем) разбросе значений вегетаци-

онных индексов вокруг среднего значения, которое характеризует состояния группы изучаемых объектов (рис. 3).

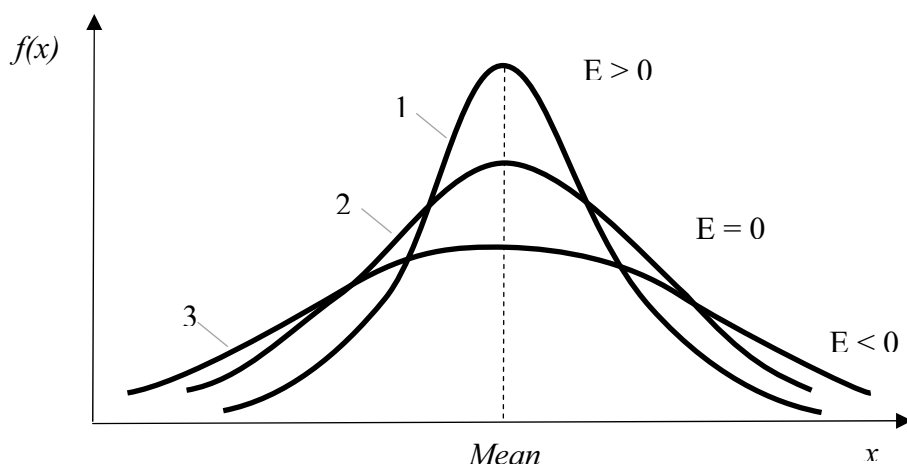


Рис. 3. Распределения с положительным ( $E > 0$ ), отрицательным ( $E < 0$ ) и нормальным (отсутствием) ( $E = 0$ ) эксцессом

Из 30 ППУ (здоровые и ослабленные насаждения) по픽сельное распределение значений индекса SWVI не соответствовало нормальному лишь в одном случае. Нали-

чие положительных асимметрии и эксцесса распределения индексов при этом говорит о смещении их среднего значения в сторону положительных величин и меньшем раз-

бросе пиксельных значений вокруг среднего. Коэффициенты вариации более 20 %, которые соответствуют значительной и высокой степеням изменчивости, отмечены только у трех ППУ, то есть у 10 % их общего числа. Само среднее значение вегетационного индекса SWVI для этой группы равно 0,39, что соответствует категориям здоровых или слегка ослабленных насаждений, установленным в результате полевых исследований.

Из 41 лесотаксационного выдела с наличием сильно ослабленных древостоев нормальное распределение значений индекса SWVI отмечено только у 6. Среднее значение индекса равно 0,38, то есть почти такое же, как и у группы здоровых и ослабленных насаждений. Распределение, не соответствующее нормальному, отмечено у 35 выделов, в том числе с отрицательной асимметрией и положительным эксцессом – 18 выделов (среднее значение индекса смещено в сторону низких значений, разброс вокруг среднего низкий), отрицательной асимметрией – 15 выделов, положительным эксцессом – 1 выдел, положительными асимметрией и эксцессом – 1 выдел. Коэффициенты вариации больше 20 % отмечены у 18 выделов.

Три участка – очаги повреждения (усыхающие и сухостойные насаждения) отличаются средними значениями индекса SWVI (менее 0,2) и значительными коэффициентами вариации (более 50 %). Распределение, не соответствующее нормальному, отмечено на одном участке. Положительные значения асимметрии и эксцесса при этом свидетельствуют о том, что этот очаг немного лучше по своему состоянию по сравнению с двумя другими.

Примечательно, что средние, минимальные и максимальные значения, а также стандартные отклонения значений индекса SWVI для здоровых (ППУ) и поврежденных (лесотаксационные выделы) на-

саждений достаточно близки, что объясняет трудности их разделения на основе дисперсионного анализа. Можно предположить, что распределение значений индекса SWVI для отдельных насаждений будет характеризовать их состояние лучше, чем среднее значение индекса. Так, например, наличие в составе сильно поврежденных и усыхающих деревьев (с низкими значениями SWVI) при расчете средних значений индекса для рассматриваемого участка леса может нивелироваться значительным количеством здоровых деревьев (с высокими значениями SWVI), что препятствует разделению здоровых и ослабленных насаждений при дисперсионном анализе.

Явное преобладание среди рассмотренных участков распределения с отрицательной асимметрией можно объяснить наличием в насаждениях деревьев разных категорий санитарного состояния (от сухостоя до здоровых) с преобладанием здоровых. Стоит отметить, что на результаты попиксельного распределения значений индексов помимо наличия поврежденных деревьев могут влиять конфигурация и площадь выдела, а также характер распределения древесных пород, типа леса и сомкнутости полога. При одинаковом количестве ослабленных деревьев в выделах с большей площадью (и, соответственно, большим количеством здоровых деревьев) отклонения коэффициентов асимметрии и эксцесса от нормального будут более значительными, а среднее значение индекса будет выше.

На рисунке 4 показаны характерные варианты распределения попиксельных значений индекса SWVI для трёх изучаемых групп насаждений: здоровых (ППУ), сильно ослабленных (лесостроительные выделы) и очагов повреждения.

Также выполнен анализ статистических характеристик попиксельных значений индекса NDVI (табл. 2).

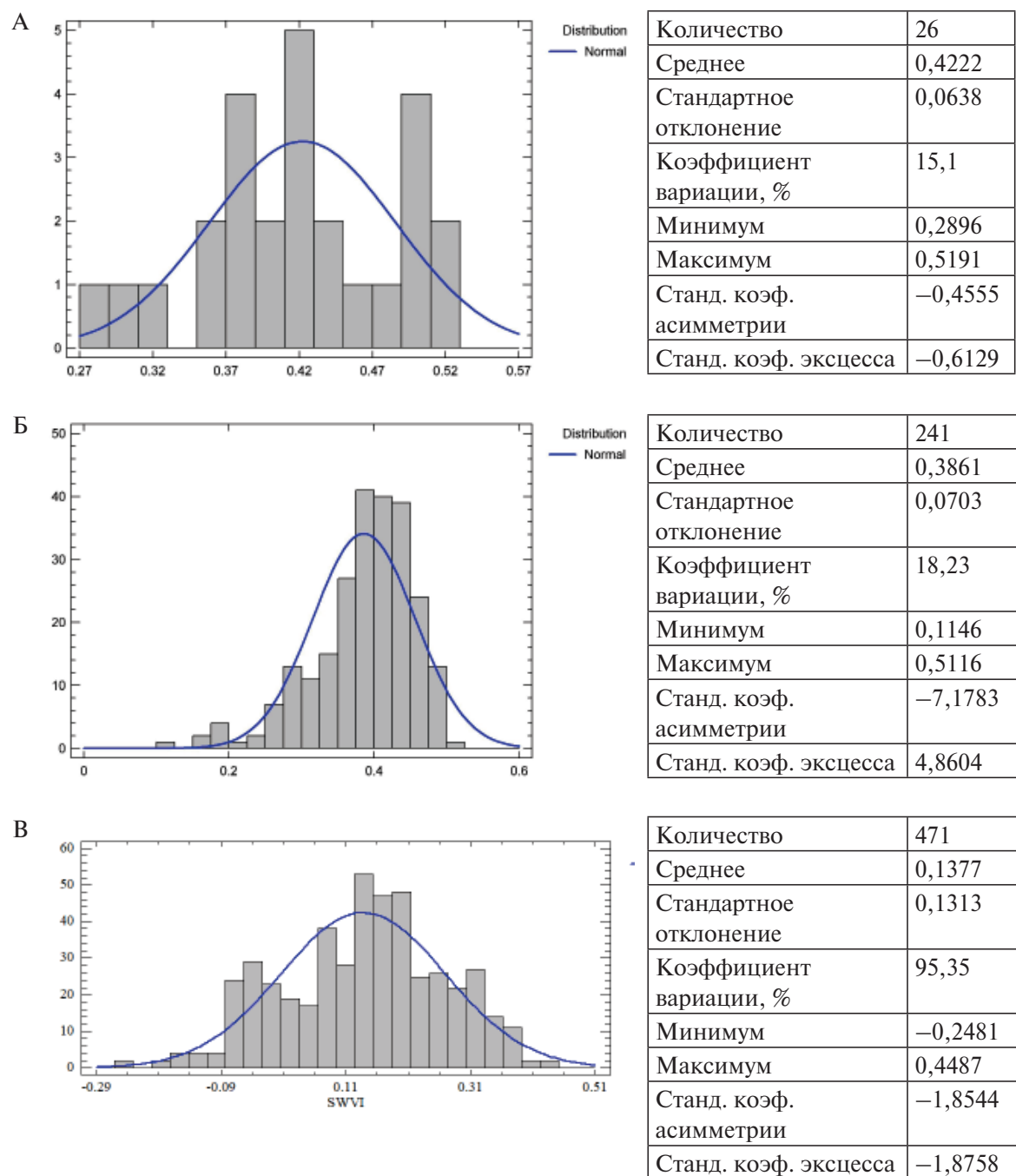


Рис. 4. Характерные гистограммы и описательные статистики распределения попиксельных значений индекса SWVI для спелых еловых насаждений разного санитарного состояния:

А – ППУ (здоровые и ослабленные насаждения), участок Р-4;

Б – лесотаксационный выдел (сильно ослабленные), участок 2–6;

В – очаг повреждения (усыхающие, сухостой), участок О-2.

Сплошной синей линией показан график нормального распределения

Таблица 2

Статистические характеристики распределения значений индекса NDVI по отдельным участкам

Обозначение участка	Количество пикселей, шт.	Среднее	Коэффициент вариации	Стандартизованная асимметрия	Стандартизованный эксцесс	Обозначение участка	Количество пикселей, шт.	Среднее	Коэффициент вариации	Стандартизованная асимметрия	Стандартизованный эксцесс
P-1	24	0,8427	3,74	-2,12	2,90	1–29	717	0,8657	2,61	-4,63	0,85
P-2	24	0,8612	1,90	-0,37	-1,34	1–31	202	0,8503	4,38	-5,78	5,27
P-3	25	0,8760	1,65	-0,54	-0,37	2–6	241	0,8437	3,77	-11,24	19,76
P-4	24	0,8689	1,52	0,35	-0,76	7–3	208	0,8676	2,56	-2,60	0,55
P-5	24	0,8495	2,77	-2,81	4,08	7–11	76	0,8775	3,06	-9,76	20,78
P-6	24	0,8605	1,73	-0,39	-0,59	7–35	373	0,8758	3,14	-5,48	2,21
P-7	24	0,8469	2,56	-1,55	-0,21	10–17	385	0,8648	2,82	-10,12	15,96
P-8	24	0,8575	1,60	-0,92	-0,76	11–46	239	0,8586	4,15	-23,18	73,48
P-9	24	0,7887	3,31	1,86	0,00	11–55	860	0,8538	3,51	-13,50	19,85
P-10	23	0,8655	1,98	0,13	1,11	12–2	72	0,8741	3,02	-3,74	3,12
P-11	24	0,8828	1,96	-0,50	-1,35	12–4	309	0,8695	2,64	-4,18	0,91
P-12	24	0,8601	2,42	0,15	-0,50	12–15	396	0,8643	4,22	-11,94	9,36
P-13	23	0,8845	1,64	-0,30	-0,79	15–39	260	0,8607	2,82	-5,81	9,26
P-14	23	0,8686	2,41	0,11	-0,90	15–53	317	0,8541	3,95	-11,76	13,71
P-15	24	0,8760	1,36	0,16	0,01	17–22	869	0,8610	3,25	-19,63	40,66
P-16	23	0,8562	2,20	-2,13	1,53	83–23	376	0,8260	4,45	-8,65	9,75
P-17	23	0,8634	2,59	-0,32	-0,06	83–24	432	0,8375	3,36	-2,58	7,03
P-18	24	0,8407	2,89	-0,65	-0,75	98–32	221	0,8458	2,89	-18,07	41,70
P-19	24	0,8445	1,68	-0,10	-1,55	98–37	364	0,8278	5,31	-15,48	25,21
P-20	23	0,8585	3,24	-4,14	6,90	98–38	134	0,8611	3,19	-2,43	1,91
P-21	24	0,8483	1,02	-0,56	0,14	104–9	75	0,8518	5,64	-7,20	8,26
P-22	23	0,8536	2,19	0,19	0,12	104–11	362	0,8657	4,85	-22,38	41,10

Обозначение участка	Количество пикселей, шт.	Среднее	Коэффициент вариации	Стандартизированная асимметрия	Стандартизированный эксцесс	Обозначение участка	Количество пикселей, шт.	Среднее	Коэффициент вариации	Стандартизированная асимметрия	Стандартизированный эксцесс
P-23	24	0,8618	2,09	0,75	0,26	145–24	92	0,8542	2,34	-2,62	0,79
P-24	25	0,8449	2,67	0,94	-1,00	145–25	114	0,8758	2,27	-4,84	9,40
P-25	24	0,8473	6,44	-4,38	6,19	145–27	182	0,8755	2,54	-3,83	0,84
P-26	24	0,8863	2,49	0,21	-1,30	181–7	532	0,8588	3,93	-17,12	25,36
P-27	24	0,8355	2,13	-1,44	0,09	181–19	345	0,8421	3,78	-18,95	40,18
P-28	24	0,8738	1,64	0,99	-0,51	181–21	355	0,8550	4,09	-11,31	13,76
P-29	24	0,8691	1,75	0,19	-0,62	181–24	78	0,8101	10,55	-4,01	-0,06
P-30	23	0,8860	1,72	-1,64	1,27	181–25	210	0,8560	5,35	-15,88	24,42
O_1	336	0,8081	10,15	-9,54	6,33	181–32	104	0,8650	1,94	-0,50	0,20
O_2	471	0,7047	19,07	-5,66	-4,23	182–36	707	0,8498	4,49	-22,39	34,34
O_3	460	0,6271	14,88	4,68	1,57	201–19	610	0,8617	3,35	-12,85	15,62
1_4	162	0,8693	2,27	-0,81	0,48	202–22	736	0,8785	2,56	-9,77	6,82
1_21	233	0,8713	3,40	-14,18	36,08	202–34	736	0,8785	2,56	-9,77	6,82
1_24	345	0,8633	6,36	-26,69	56,52	202–36	442	0,8508	3,47	-9,87	12,82
1_27	227	0,8732	2,42	-0,69	-1,80	203–4	659	0,8692	2,71	-8,76	11,23

Примечание. Обозначения те же, что и в таблице 1.

Из 30 ППУ (здоровые и ослабленные насаждения) попиксельное распределение значений индекса NDVI не соответствовало нормальному в пяти случаях (четыре ППУ с отрицательной асимметрией и положительным эксцессом, один ППУ с отрицательной асимметрией). Коэффициенты вариации в большинстве случаев не превышали 6 %.

Для 41 лесотаксационного выдела с наличием сильно ослабленных древостоев нормальное распределение значений индекса NDVI отмечено у трёх. Распределение, не соответствующее нормальному, отмечено у

38 выделов, среди которых 31 – с отрицательной асимметрией и положительным эксцессом, 7 – с отрицательной асимметрией. Коэффициенты вариации в большинстве случаев не превышали 6 %.

Распределение значений NDVI всех трёх очагов повреждения (усыхающие и сухостойные насаждения) отличается от нормального: у одного участка наблюдается отрицательная асимметрия и положительный эксцесс, у другого – отрицательные асимметрия и эксцесс, у третьего – положительная асимметрия. Коэффициенты вариации ме-

нее 20 %. Средние значения индексов NDVI очагов повреждения значительно отличаются от здоровых (ППУ) и сильно ослабленных (лесотаксационные выделы) насаждений с наличием здоровых деревьев и подроста, что подтверждается результатами дисперсионного анализа (см. рис. 1В).

Приведенные примеры оценки распределения индексов NDVI и SWVI для разных категорий состояния насаждений демонстрируют их схожие индикационные возможности. Выявленные закономерности нуждаются в дальнейшем изучении и развитии с применением наземных обследований, дистанционных методов и ГИС-технологий.

#### Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– различия между группами категорий состояния еловых насаждений могут выявляться на основе индексов NDVI и SWVI по материалам многозональных космических съемок Sentinel-2;

– крайние категории санитарного состояния насаждений (здоровые и погибшие) отличаются средними значениями индексов;

– для выявления промежуточных категорий состояния (сильно ослабленных насаждений) возможно использование результатов анализа попиксельных значений индексов;

– для индексов NDVI и SWVI отмечена близость распределения попиксельных значений к нормальному для здоровых и ослабленных насаждений и отклонение распределения от нормального для сильно ослабленных насаждений.

*Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031–6)».*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, А.С. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований / А.С. Алексеев, Д.М. Черниковский // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 2 (398). – С. 11–28. – DOI: 10.37482/0536–1036–2024–2–11–28.
2. Алексеев, А.С. Выявление ранних стадий повреждения еловых древостоев короедом-типографом на основе совмещенного анализа материалов спутниковой съемки Sentinel-2b и наземных обследований / А.С. Алексеев, Д.М. Черниковский // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – Вып. 246. – С. 22–43. – DOI: 10.21266/2079–4304.2023.246.22–43.
3. Алексеев, А.С. Теория популяционной биоиндикации антропогенных воздействий / А.С. Алексеев // Журнал общей биологии. – 1997. – Т. 58, № 1. – С. 121–131.
4. Барталев, С.А. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений / С.А. Барталев, В.А. Егоров, А.М. Крылов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, № 3. – С. 215–225.
5. Гусев, А.П. Многолетние изменения вегетационных индексов как индикатор динамики состояния природных и антропогенных геосистем / А.П. Гусев // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2021. – Т. 7 (17), вып. 2. – С. 202–209.
6. Дерр, В.Я. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов / В.Я. Дерр. – СПб. : Лань, 2021. – 596 с.

7. Жирин, В.М. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйдлина // Лесоведение. – 2016. – № 1. – С. 3–14.
8. Ковалев, А.В. Анализ устойчивости лесных насаждений к повреждениям сибирским шелкопрядом по данным дистанционного зондирования / А.В. Ковалев // Сибирский лесной журнал. – 2021. – № 5. – С. 71–78.
9. Крылов, А.М. Выявление очагов короеда-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat / А.М. Крылов, А.А. Соболев, Н.А. Владимирова // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2011. – № 4. – С. 54–60.
10. Лесных, Н.Б. Асимметрия и эксцесс в статистическом анализе закона распределения / Н.Б. Лесных // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2014. – № 1 (25). – С. 40–46.
11. Малахова, Е.Г. Усыхание ельников в Клинском лесничестве Московской области / Е.Г. Малахова, А.М. Крылов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1–8. – С. 1975–1978.
12. Маслов, А.Д. Короед-типограф и усыхание еловых лесов / А.Д. Маслов. – Пушкино : Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2010. – 138 с.
13. Селиховкин, А.В. Новая вспышка массового размножения короеда-типографа *Ips typographus* (L.) (Coleoptera, Curculionidae) в Ленинградской области и ее особенности / А.В. Селиховкин, Н.А. Мамаев, М.Б. Мартирова [и др.] // Энтомологическое обозрение. – 2022. – Т. 101, № 2. – С. 239–251. – DOI: 10.31857/S0367144522020034.
14. Селиховкин, А.В. Роль стволовых вредителей в изменении состояния хвойных лесов на северо-западе европейской части России / А.В. Селиховкин, Б.Г. Поповичев, М.Ю. Мандельштам, А.С. Алексеев // Лесоведение. – 2023. – № 3. – С. 304–321. – DOI: 10.31857/S0024114823030099.
15. Стыценко, Ф.В. Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозелёных лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений / Ф.В. Стыценко, С.А. Баргалева, А.В. Букась [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 5. – С. 217–227. – DOI: 10.21046/2070–7401–2019–16–5–217–227.
16. Сулытсон, С.М. Применение дистанционного зондирования для прогноза нарушений темнохвойных лесов после вспышки численности сибирского шелкопряда / С.М. Сулытсон, Е.И. Пономарев, Е.Г. Швецов [и др.] // Биосфера. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 21–32. – DOI: 10.24855/biosfera.v15i1.790.
17. Федотова, Е.В. Пространственно-временная динамика вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в темнохвойных древостоях Горного Алтая / Е.В. Федотова, А.И. Заречнева // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, № 6. – С. 747–757.
18. Шелуха, В.П. Динамика санитарного состояния ельников в период кульминации размножения типографа и эффективность лесозащитных мероприятий / В.П. Шелуха, В.И. Шошин, В.С. Клюев // Известия вузов. Лесной журнал. – 2014. – № 2. – С. 30–39.
19. Abdullah, H. Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus* L.) Infestation / H. Abdullah, R. Darvishzadeh, A.K. Skidmore, M. Heurich // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, no. 4. – P. 398. – DOI: 10.3390/rs11040398.
20. Abdullah, H. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) compared with Landsat-8 / H. Abdullah, A.K. Skidmore, R. Darvishzadeh, M. Heurich // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – Vol. 5, no. 1. – P. 87–106. – DOI: 10.1002/rse2.93.
21. Abdullah, H.J. Remote sensing of European spruce (*Ips typographus* L.) bark beetle green attack / H.J. Abdullah : Dissertation to obtain the degree of doctor at the University of Twente. The Netherlands, 2019, 151 p. – DOI: 10.3990/1.9789036547956.

22. Alekseev, A. Assessment of the health status of tree stands based on Sentinel – 2B remote sensing materials and the short-wave vegetation index SWVI / A. Alekseev, D. Chernikhovskii // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 6, Politics, Industry, Science, Education, St. Petersburg, 26–28 мая 2021 года. – St. Petersburg, 2021. – P. 012003. – DOI: 10.1088/1755–1315/876/1/012003.
23. Alekseev, A.S. Assessment of the State of Forests Based on Joint Statistical Processing of Sentinel-2B Remote Sensing Data and the Data from Network of Ground-Based ICP-Forests Sample Plots / A.S. Alekseev, D.M. Chernikhovskii // Open Journal of Ecology. – 2022. – Vol. 12, no. 8. – P. 513–528. – DOI: 10.4236/oje.2022.128028.
24. Franklin, S.E. Remote sensing for sustainable forest management / S.E. Franklin. – CRC Press LLC, 2001. – 391 p.
25. Georgiev, G. Early detection of *Ips typographus* infestations by using Sentinel-2 satellite images in windthrow affected Norway spruce forests in Smolyan region, Bulgaria / G. Georgiev, M. Georgieva, S. Belilov [et al.] // Silva Balcanica. – 2022. – Vol. 23, no. 2. – P. 27–34. – DOI: 10.3897/silvabalcanica.22.e98314.
26. Olsson, P.O. Development of a method for monitoring of insect induced forest defoliation – limitation of MODIS data in fennoscandian forest landscapes / P.O. Olsson, A.M. Jönsson, L. Eklundh [et al.] // Silva Fennica. – 2016. – Vol. 50, no. 2. – DOI: 10.14214/sf.1495.
27. Olsson, P.O. Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI / P.O. Olsson, L. Eklundh, J. Lindström // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 181. – P. 42–53. – DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.040.

#### REFERENCES

1. Alekseev A.S. Theory of population bioindication of anthropogenic impacts. *Journal of General Biology [Zhurnal obshchey biologii]*, 1997, vol. 58, no. 1, pp. 121–131. (In Russian).
2. Alekseev A.S., Chernikhovsky D.M. Identification of damage to coniferous stands based on a comprehensive analysis of the results of remote sensing of the Earth and ground-based surveys. *News of higher educational institutions. Forestry magazine [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal]*, 2024, no. 2 (398), pp. 11–28. DOI: 10.37482/0536–1036–2024–2–11–28. (In Russian).
3. Alekseev A.S., Chernikhovsky D.M. Identification of early stages of damage to spruce stands by the bark beetle based on a combined analysis of Sentinel-2b satellite imagery and ground-based surveys. *Bulletin of the St. Petersburg Forest Technical Academy [Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii]*, 2023, iss. 246, pp. 22–43. DOI: 10.21266/2079–4304.2023.246.22–43. (In Russian).
4. Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stytsenko F.V., Khovratovich T.S. Study of the possibilities of assessing the condition of forests damaged by fires using multispectral satellite measurements. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space [Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa]*, 2010, vol. 7, no. 3, pp. 215–225. (In Russian).
5. Gusev A.P. Long-term changes in vegetation indices as an indicator of the dynamics of the state of natural and anthropogenic geosystems. *Geopolitics and ecogeodynamics of regions [Geopolitika i ehkogeodinamika regionov]*, 2021, vol. 7 (17), iss. 2, pp. 202–209. (In Russian).
6. Derr V.Ya. Probability Theory and Mathematical Statistics. A Textbook for Universities. St. Petersburg, Lan, 2021, 596 p. (In Russian).
7. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Long-term dynamics of vegetation indices of dark coniferous forests after damage by the Siberian silkworm. *Forest Science [Lesovedenie]*, 2016, no. 1, pp. 3–14. (In Russian).
8. Kovalev A.V. Analysis of forest plantations' resistance to damage by the Siberian silkworm based on remote sensing data. *Siberian Forestry Journal [Sibirskij lesnoj zhurnal]*, 2021, no. 5, pp. 71–78. (In Russian).

9. Krylov A.M., Sobolev A.A., Vladimirova N.A. Identification of bark beetle outbreaks in the Moscow region using Landsat images. *Bulletin of the Moscow State Forest University – Forest Bulletin [Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik]*, 2011, no. 4, pp. 54–60. (In Russian).
10. Lesnykh N.B. Asymmetry and excess in statistical analysis of the distribution law. *Bulletin of the Siberian State University of Geosystems and Technologies [Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologij]*, no. 1 (25), 2014, pp. 40–46. (In Russian).
11. Malakhova E.G., Krylov A.M. Drying out of spruce forests in the Klin forestry of the Moscow region. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk]*, 2012, vol. 14, no. 1–8, pp. 1975–1978. (In Russian).
12. Maslov A.D. The bark beetle and the drying out of spruce forests. Pushkino, All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, 2010, 138 p. (In Russian).
13. Selikhovkin A.V., Mamaev N.A., Martirova M.B., Merkuriev S.A., Popovichev B.G. New outbreak of mass reproduction of the bark beetle *Ips typographus* (L.) (Coleoptera, Curculionidae) in the Leningrad region and its features. *Entomological Review [Ehntomologicheskoe obozrenie]*, 2022, vol. 101, no. 2, pp. 239–251. DOI: 10.31857/S0367144522020034. (In Russian).
14. Selikhovkin A.V., Popovichev B.G., Mandelstam M.Yu., Alekseev A.S. The role of stem pests in changing the state of coniferous forests in the northwest of the European part of Russia. *Forestry [Lesovedenie]*, 2023, no. 3, pp. 304–321. DOI: 10.31857/S0024114823030099. (In Russian).
15. Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Bukas A.V., Ershov D.V., Saigin I.A. Possibilities of prolonged assessment of post-fire condition of coniferous evergreen forests based on multispectral satellite measurements. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space [Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa]*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 217–227. DOI: 10.21046/2070–7401–2019–16–5–217–227. (In Russian).
16. Sultson S.M., Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Tretyakov P.D., Goroshko A.A., Kulakova N.N., Mikhaylov P.V. Application of remote sensing to predict disturbances in dark coniferous forests after an outbreak of the Siberian silkworm. *Biosphere [Biosfera]*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 21–32. DOI: 10.24855/biosfera.v15i1.790. (In Russian).
17. Fedotova E.V., Zarechneva A.I. Spatiotemporal dynamics of the Siberian silkworm outbreak in dark coniferous stands of the Altai Mountains. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology [Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii]*, 2017, vol. 10, no. 6, pp. 747–757. (In Russian).
18. Shelukho V.P., Shoshin V.I., Klyuev V.S. Dynamics of the sanitary condition of spruce forests during the peak of the typographer's reproduction and the effectiveness of forest protection measures. *News of universities. Forestry journal [Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal]*, 2014, no. 2, pp. 30–39. (In Russian).
19. Abdullah H., Darvishzadeh R., Skidmore A.K., Heurich M. Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus* L.) Infestation. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 4, p. 398. DOI: 10.3390/rs11040398.
20. Abdullah H., Skidmore A.K., Darvishzadeh R., Heurich M. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) compared with Landsat-8. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 87–106. DOI: 10.1002/rse2.93.
21. Abdullah H.J. Remote sensing of European spruce (*Ips typographus* L.) bark beetle green attack. Dissertation to obtain the degree of doctor at the University of Twente, 2019, 151 pp. DOI: 10.3990/1.9789036547956.
22. Alekseev A., Chernikhovskii D. Assessment of the health status of tree stands based on Sentinel – 2B remote sensing materials and the short-wave vegetation index SWVI. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Proceedings of the 6th All-Russian Science And Technology Conference Forests Of*

- Russia: Politics, Industry, Science, Education, Fr. 2021*. St. Petersburg, 2021, p. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012003.
23. Alekseev A.S., Chernikhovskii D.M. Assessment of the State of Forests Based on Joint Statistical Processing of Sentinel-2B Remote Sensing Data and the Data from Network of Ground-Based ICP-Forests Sample Plots. *Open Journal of Ecology*, 2022, vol. 12, no. 8, pp. 513–528. DOI: 10.4236/oje.2022.128028.
24. Franklin S.E. Remote sensing for sustainable forest management. CRC Press LLC, 2001, 391 p.
25. Georgiev G., Georgieva M., Belilov S., Mirchev P., Deliyanchev S., Mladenov V., Kropov K., Haydarova S. Early detection of *Ips typographus* infestations by using Sentinel-2 satellite images in windthrow affected Norway spruce forests in Smolyan region, Bulgaria. *Silva Balcanica*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 27–34. DOI: 10.3897/silvabalcanica.22.e98314.
26. Olsson P.-O., Kantola T., Lytikäinen-Saarenmaa P., Jönsson A.M., Eklundh L. Development of a method for monitoring of insect induced forest defoliation – limitation of MODIS data in Fennoscandian forest landscapes. *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 2. DOI: 10.14214/sf.1495.
27. Olsson P.O., Eklundh L., Lindström J. Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 181, pp. 42–53. DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.040.

Статья поступила в редакцию 25.06.2025