ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 630*416:551.583:528.8(476)
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-315-331

Поступила в редакцию 13.08.2026
Received 13.08.2026

Н. М. Роговский, Д. Г. Груммо

Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ДИНАМИКА УСЫХАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ К КЛИМАТИЧЕСКОМУ СТРЕССУ: ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. Представлен комплексный подход к выявлению и пространственно-временной оценке гибели лесов модельных территорий – Национального парка (НП) «Беловежская пуща» и Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ). С применением алгоритма Random Forest для классификации снимков Landsat-5/7/8/9 и Sentinel-2 определены площади погибших насаждений за 2001–2025 гг. В НП «Беловежская пуща» процессы гибели лесов имели распространение на 14,9 тыс. га с пиковым периодом в 2016–2018 гг., в ПГРЭЗ – на 16,4 тыс. га с максимумами в 2003–2006, 2011–2013 и 2016–2018 гг. Наиболее сильную корреляционную связь с масштабом гибели лесов показали взвешенные скользящие средние индекса засухи KBDI с лагом 1 год за 2001–2019 гг. (до 0,68 – в НП «Беловежская пуща» и 0,78 – в ПГРЭЗ). В разрезе экологических групп лесов (ЭГЛ) наименее устойчивыми в НП «Беловежская пуща» оказались леса на бедных песчаных почвах недостаточного (гибель на 27,5 % площади ЭГЛ) и неустойчивого (17,9 %) увлажнения , прежде всего сосновые (до 27,4 %), еловые (до 18,3 %) и березовые (до 49,9 %). В ПГРЭЗ наиболее подверженными к гибели являлись сосновые леса на бедных песчаных почвах недостаточного (28,8 %) и неустойчивого (19,2 %) увлажнения . Выявленные закономерности климатической обусловленности масштабов гибели лесов и степень их устойчивости в разрезе ЭГЛ легли в основу подхода к ежегодному прогнозу потенциала развития лесопатологических процессов.

Ключевые слова: лесные экосистемы, заповедные территории, гибель лесов, изменение климата, дистанционное зондирование растительности, машинное обучение, климатические индексы

Для цитирования: Роговский, Н. М. Динамика усыхания и устойчивость лесных насаждений к климатическому стрессу: дистанционный мониторинг с применением алгоритмов машинного обучения / Н. М. Роговский, Д. Г. Груммо // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 315–331. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-315-331

Nikita M. Rogovsky, Dzmitry G. Grummo

V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

FOREST LOSS DYNAMICS AND RESILIENCE TO CLIMATE STRESS: A MACHINE LEARNING APPROACH USING REMOTE SENSING DATA

Abstract. The article presents an integrated approach to identifying and spatiotemporally assessing forest loss in the Belovezhskaya Pushcha National Park (NP) and the Polessky State Radioecological Reserve (PSRR). For the period 2001–2025, the Random Forest algorithm identified forest loss in the Belovezhskaya Pushcha NP over more than 14.9 kha with a peak period in 2016–2018, and in the PSRR over an area of 16.4 kha with maximums in 2003–2006, 2011–2013, and 2016–2018. A correlation analysis of annual forest loss values and drought climate indices revealed that the KBDI drought index with a one-year time lag for 2001–2019 had the strongest correlation (up to 0.68 in the Belovezhskaya Pushcha NP and 0.78 in the PSRR). The least resilient forests were those on poor sandy soils with insufficient moisture (27.5 % of the forest ecological group, FEG, area lost) and unstable moisture (17.9 %), in particular pine (up to 27.4 %), spruce (up to 18.3 %) and birch (up to 49.9 %). In the PSRR, the least resilient were pine forests on poor sandy soils with insufficient (28.8 % of the FEG area) and unstable moisture (19.2 %). Based on the identified ecological and climatic patterns of forest loss development, an approach to annual forecasting of the potential for forest pathological processes has been developed.

Keywords: forest ecosystems, protected areas, forest loss, climate change, remote sensing of vegetation, machine learning, climate indices

For citation: Rogovsky N. M., Grummo D. G. Forest loss dynamics and resilience to climate stress: a machine learning approach using remote sensing data. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk* =

© Роговский Н. М., Груммо Д. Г., 2026

Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series, 2026, vol. 71, no. 4, pp. 315–331 (in Russian).
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-315-331

Введение. Леса природных территорий со специальным режимом охраны являются репрезентативными полигонами для изучения динамики природных процессов, развитие которых происходит при доминирующем влиянии естественных факторов, один из которых – изменение климата. Рост частоты и продолжительности климатических засух, аномально теплые малоснежные зимы и учащение иных неблагоприятных погодных явлений – все это приводит к понижению устойчивости древостоев к таким прямодействующим негативным факторам, как пожары, ветровалы и активизация жизнедеятельности насекомых-вредителей и патогенов [1–11].

Только за 2001–2020 гг. в Беларуси отмечалась гибель лесов на площади 938,08 тыс. га при росте среднегодового показателя с 36,3 до 83,4 тыс. га/год [12]. Наиболее остро стоит вопрос развития лесопатологических процессов в еловых и сосновых насаждениях. Так, в 2016–2018 гг. в южных регионах Беларуси площадь погибших и вырубленных при санитарных рубках сосновых лесов составила 12,2 тыс. га[1]. За период с 2016 по 2024 г. доля еловых насаждений в республике, погибших от фито- и энтомовредителей, составила около 23,0 % [13].

В текущих условиях становится необходимым оперативное и точное получение пространственных данных гибели лесов для принятия мер по снижению активности негативных процессов в очагах развития и ограничению их распространения в близлежащие лесные массивы. В мировой практике для мониторинга лесных экосистем используются дистанционные методы, преимуществами которых являются: пространственная точность, регулярность обновления и свободный доступ к спутниковым данным [14–21]. Они позволяют выполнять как текущую оценку и ретроспективный анализ гибели лесов, так и разрабатывать на этой основе подходы к прогнозированию лесопатологической угрозы.

Целью работы является создание методики выявления очагов гибели лесов и прогнозирование риска их возникновения с учетом влияния климатических факторов на примере Национального парка (НП) «Беловежская пуща» и Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ).

Объекты и методы исследования. Модельными объектами выступают 2 природные территории с существенными ограничениями в ведении хозяйственной деятельности: НП «Беловежская пуща» площадью 150,1 тыс. га и ПГРЭЗ площадью 217,2 тыс. га, расположенные соответственно в юго-западной и юго-восточной частях Беларуси (рис. 1). Лесопокрытые земли занимают значительную долю как в НП «Беловежская пуща» (131,4 тыс. га, 87,4 % всей территории), так и в ПГРЭЗ (165,9 тыс. га, 76,7 %).

Выбор двух объектов исследования объясняется рядом причин:

1. *Генезис природной среды.* Территория НП «Беловежская пуща» обладает многовековым природоохранным режимом и является одним из наиболее сохранившихся природно-растительных комплексов в мире. ПГРЭЗ, наоборот, был организован после аварии на ЧАЭС в 1988 г. на землях, ранее находившихся в хозяйственном пользовании.

Отсюда возникают различия в структуре лесов: насаждения естественного происхождения занимают 105,6 тыс. га (80,3 % лесопокрытых земель) в НП «Беловежская пуща» и 93,6 тыс. га (56,4 %) – в ПГРЭЗ. В свою очередь, перестойные леса занимают 26,0 тыс. га (24,6 % насаждений естественного происхождения) в НП «Беловежская пуща» и 0,1 тыс. га (<0,1 %) – в ПГРЭЗ. Несмотря на это, недавние исследования показали, что ПГРЭЗ имеет основания для присвоения статуса особо охраняемой природной территории (ООПТ) с категорией заповедника, а низкая доля старовозрастных насаждений не может способствовать обратному [22].

[1] Мониторинговые исследования трансформации лесного фонда в результате климатических изменений, антропогенного воздействия и лесохозяйственной деятельности с разработкой предложений по сохранению естественного происхождения насаждений при лесовозобновлении, лесовыращивании и лесопользовании: отчет по мероприятию / Мин-во лесного хоз-ва, Ин-т эксперимент. ботаники НАН Беларуси: рук. В. Г. Шатравко; исполн.: А. В. Пугачевский [и др.]. – Мн., 2019. – 130 с.

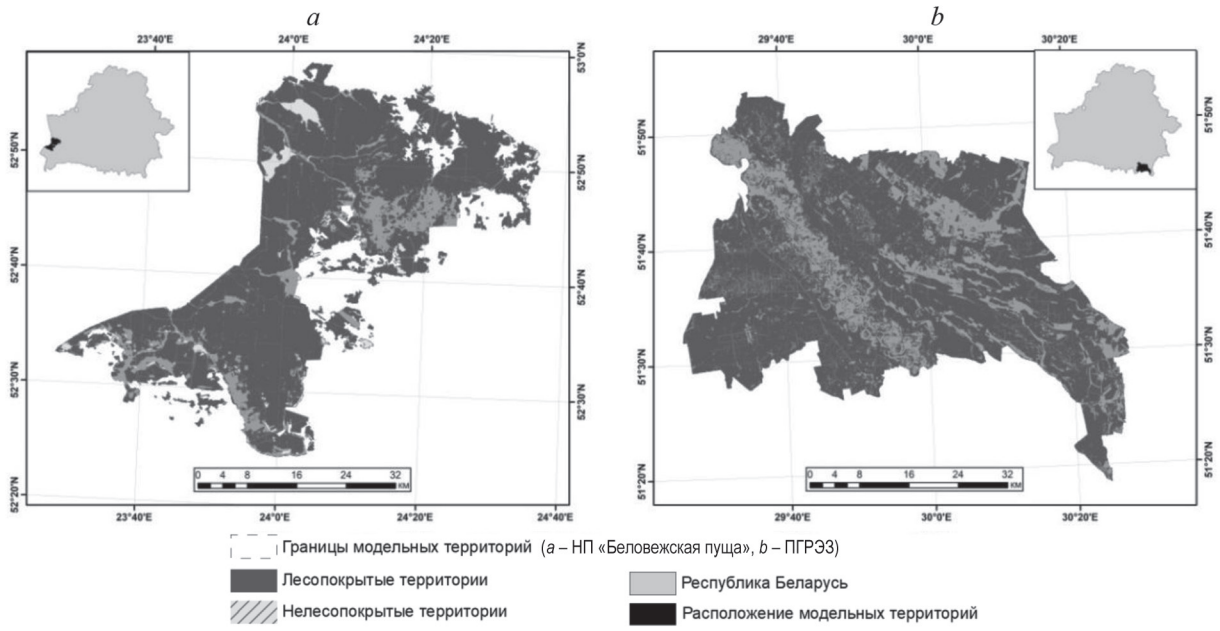


Рис. 1. Модельные территории: *a* – НП «Беловежская пуща, *b* – ПГРЭЗ

Fig. 1. Study sites: *a* – NP “Belovezhskaya Pushcha”, *b* – PSRR

2. *Природные условия и облик растительности.* Индикатором различий природных условий между объектами служит типологическая структура лесов. Для НП «Беловежская пуща» с относительно стабильным гидрологическим режимом, благоприятными климатическими условиями и пестрой почвенной мозаикой характерно преобладание сосновых лесов на бедных песчаных почвах неустойчивого увлажнения (35,2 тыс. га, 26,7 % лесов), на относительно богатых почвах нормального (26,8 тыс. га, 20,4 %) и повышенного (10,5 тыс. га, 8,0 %) увлажнения , черноольшаников – на торфяных эвтрофных болотах (11,9 тыс. га, 9,1 %) и на богатых почвах повышенного увлажнения (9,3 тыс. га, 7,1 %), составляющих 71,5 % всех лесов.

Леса ПГРЭЗ сформировались под воздействием мелиорации и активного лесопользования в доаварийный период на крупных массивах дерново-подзолистых автоморфных и полугидроморфных песчаных почв. Здесь доминируют сосняки на бедных песчаных (55,4 тыс. га, 33,4 %) и относительно богатых почвах (23,8 тыс. га, 14,3 %) и мелколиственные леса – на богатых почвах повышенного увлажнения (25,0 тыс. га, 15,1 %), составляющие суммарно 62,8 % лесов ПГРЭЗ.

3. *Различия в структуре лесов с высоким потенциалом возникновения лесопатологических процессов.* Наибольшему риску гибели подвержены насаждения ели и сосны, однако их соотношение в двух объектах различно. Площадь еловой формации в НП «Беловежская пуща» довольно невелика (5,2 тыс. га, 4,1 % всех лесов), однако распространение насаждений с елью (10–40 % в составе древостоя) значительно шире (44,2 тыс. га, 34,6 %). Леса с участием сосны здесь получили распространение на 90,9 тыс. га (71,5 %). В ПГРЭЗ, напротив, площадь насаждений с елью незначительна (0,2 тыс. га, 0,1 %), а леса с участием или доминированием сосны в составе древостоя расположены на 67,7 тыс. га (40,8 %).

Выявление участков погибших насаждений проводилось с применением алгоритма Random Forest для классификации коллекций спутниковых снимков Landsat-5/7/8/9 и Sentinel-2 [23, 24]. Обученный классификатор позволяет сопоставлять значения отдельных каналов, индексов или их комбинаций на эталонных участках с остальной территорией объекта, формируя пространственную сцену с заданным числом классов.

Пространственная база обучения включала: погибшие насаждения, рубки, стабильные леса, заросли тростника, сельскохозяйственные угодья и иные земли. Контуры эталонных участков получены по результатам наземных обследований и дешифрирования разновременных снимков. Для летнего периода каждого года подбирались снимки с низкой облачностью, а при их отсутствии формировался сезонный композит.

Алгоритм реализован средствами библиотеки scikit-learn с оптимизацией числа решающих деревьев и их глубины во избежание переобучения. Данные разделялись на обучающую (80 %) и тестовую (20 %) выборки для оценки точности модели. Полученные ежегодные сведения элиминировались в случае повторного выявления погибших насаждений в следующий год после первого обнаружения.

Взаимосвязь гибели лесов и засух за 2001–2025 гг. оценивалась с применением интегральных климатических показателей: индекса засухи Китча – Байрама (KBDI) [25], стандартизированного индекса осадков и испарения (SPEI) [26], комплексного гидротермического показателя Битвинскаса [27] и гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) [28].

Индекс KBDI разработан для контроля пожароопасной ситуации и в настоящее время широко применяется в сельском и лесном хозяйстве. Его значения варьируются от 0 до 203,2, где рост отражает увеличение уровня дефицита влаги. В классическом варианте увлажнение грунта учитывается лишь при сумме осадков от 5,1 мм/сут, что в условиях Беларуси завышает значения индекса, поэтому пороговое значение принято равным 1 мм/сут.

Индекс SPEI является усовершенствованным вариантом индекса SPI с учетом вклада температур в оценке засух. Индекс не имеет крайних значений, однако их градация ограничена 7 классами от 2 и более (экстремальное увлажнение) до –2 и менее (экстремальная засуха). В исследовании использовалась динамика SPEI за 3, 6, 9, 12, 24, 36 и 48 месяцев по данным онлайн-ресурса SPEI Global Drought Monitor [29].

Комплексный гидротермический показатель Битвинскаса отражает многолетний ход периодического иссушения, влияющего на формирование годичных колец деревьев. Показатель принимает значения от 0, что соответствует крайне сильному дефициту влаги, и не имеет максимального предела.

Широко на постсоветском пространстве для оценки уровня влагообеспеченности себя зарекомендовал ГТК, применяющийся на различных временных масштабах.

Расчеты значений индексов, за исключением SPEI, производились на платформе Google Earth Engine с использованием ежедневного датасета ERA5, разработанного ECMWF [30]. Помимо расчетов средних значений KBDI и ГТК в течение мая – августа каждого года, определялось их взвешенное скользящее среднее (WMA) за 2, 3 и 4 года.

Климатическая обусловленность гибели лесов оценивалась корреляционным и кросс-корреляционным анализом временных рядов площадей погибших насаждений и климатических индексов с учетом их значения в год («в год») и через год после обнаружения погибших насаждений («+1 год») за периоды 2001–2019 и 2001–2025 гг. Выбор двух интервалов связан с возможным истощением кормовой базы для источников лесопатологических процессов в последние годы [31].

Разнообразие природных условий определяет пространственную дифференциацию лесной растительности и устойчивость насаждений к климатическому стрессу. В работе устойчивость оценивалась через долю площадей погибших насаждений в структуре формаций экологических групп лесов (ЭГЛ) [32, с. 268–270].

На заключительном этапе схема дифференциации лесов по степени устойчивости сопоставлялась с репрезентативным климатическом индексом, что составило основу алгоритма ежегодного прогноза лесопатологической угрозы.

Результаты и их обсуждение. Общая площадь выявленных участков с гибелью лесов составила за 2001–2025 гг. в НП «Беловежская пуща» 14,9 тыс. га, в ПГРЭЗ – 16,4 тыс. га (рис. 2).

Периоды с пиковыми значениями гибели лесов в двух объектах различаются: в НП «Беловежская пуща» они пришлись на 2004–2005 и 2016–2019 гг. (12,8 тыс. га, 85,6 % площади погибших насаждений), в ПГРЭЗ – на 2003–2006, 2011–2013, 2016–2018 гг. (12,2 тыс. га, 74,0 %) (рис. 3).

Анализ климатической обусловленности гибели лесов продемонстрировал связь масштабов явления с рядом индексов засух.

НП «Беловежская пуща». Наибольшую зависимость здесь показал индекс KBDI и его WMA с временным лагом в +1 год (табл. 1). Максимальное значение KBDI отмечено в 2015 г. (48,5 единиц), а в последующие сезоны наблюдалась самая масштабная за весь анализируемый период гибель лесов. Иные индексы устойчивых корреляционных связей не показали.

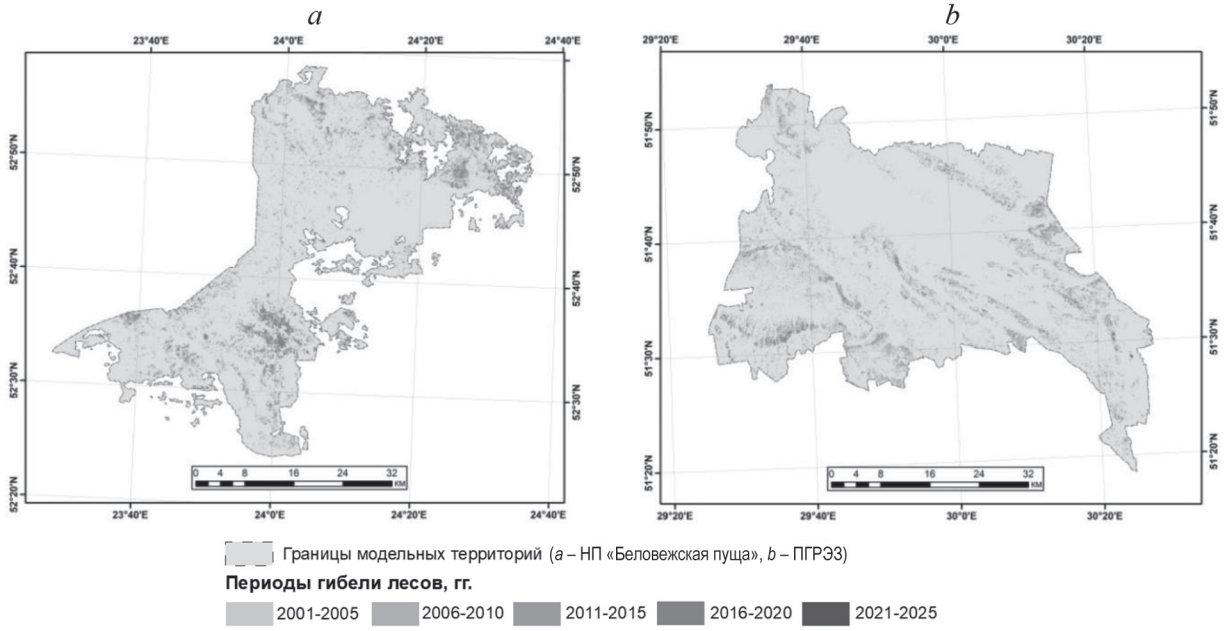


Рис. 2. Гибель лесов в НП «Беловежская пуща» (*a*) и ПГРЭЗ (*b*) за 2001–2025 гг.

Fig. 2. Forest loss in the NP "Belovezhskaya Pushcha" (*a*) and the PSRR (*b*) in 2001–2025

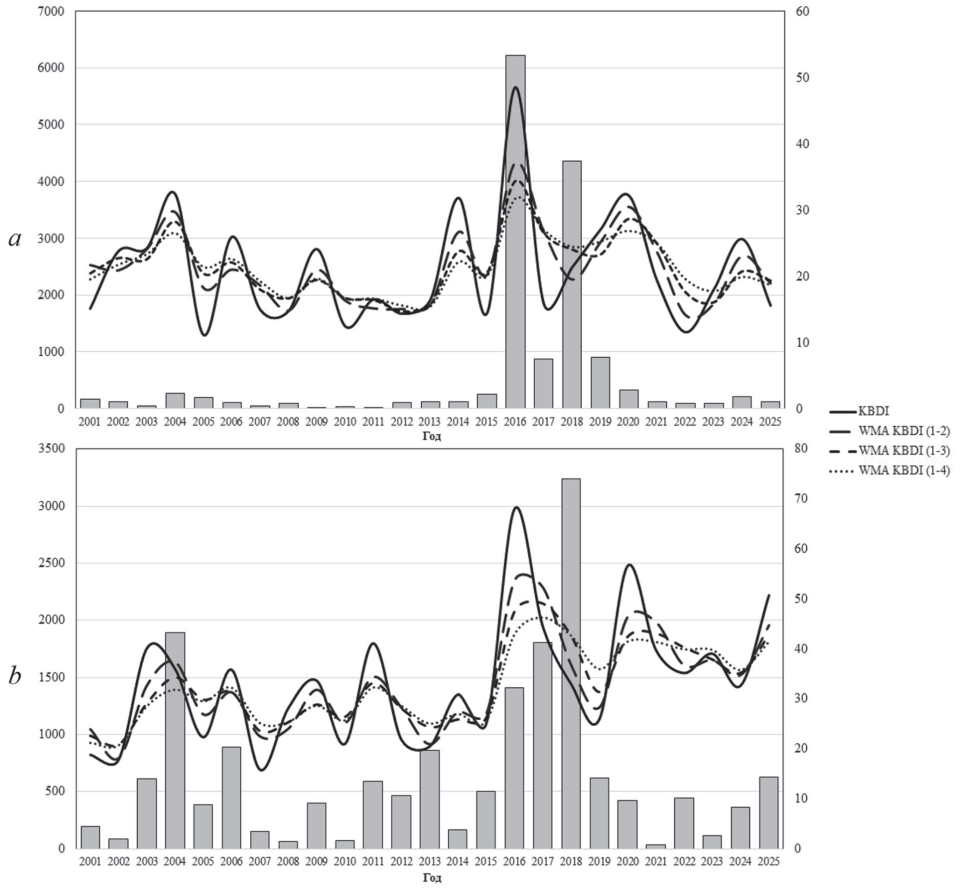


Рис. 3. Динамика площади погибших насаждений и климатических индексов (смещение +1 год):
a – НП «Беловежская пуща», *b* – ПГРЭЗ

Fig. 3. Dynamics of the area of dying forest stand area and climate indices (+1 year):
a – NP "Belovezhskaya Pushcha", *b* – PSRR

Таблица 1. **Коэффициенты корреляции значений площадей усыханий и индексов**

Table 1. **Correlation coefficients between the values of drying areas and climate indices**

Объект	Индекс	Площадь усыханий							
		2001–2025 гг.				2001–2019 гг.			
		+1 год		в год		+1 год		в год	
		r	*p*-value	*r*	*p*-value	*r*	*p*-value	*r*	*p*-value
НП «Беловежская пуща»	KBDI	**0,57**	**<0,01**	0,02	0,94	**0,61**	**<0,01**	–0,02	0,92
	$WMA_{KBDI\ (1-2)}$	**0,51**	**<0,01**	0,30	0,14	**0,56**	**0,01**	0,28	0,24
	$WMA_{KBDI\ (1-3)}$	**0,61**	**<0,01**	0,32	0,12	**0,68**	**<0,01**	0,30	0,21
	$WMA_{KBDI\ (1-4)}$	**0,60**	**<0,01**	0,43	0,03	**0,66**	**<0,01**	0,42	0,08
	$SPEI_3$	–0,39	0,06	–0,03	0,90	–0,47	0,04	–0,04	0,85
	$SPEI_6$	–0,08	0,07	–0,08	0,72	–0,14	0,58	–0,14	0,58
	$SPEI_{12}$	–0,04	0,09	0,04	0,85	–0,08	0,74	0,03	0,90
	$SPEI_{24}$	–0,01	0,95	0,01	0,96	–0,07	0,79	0,00	1,0
	$SPEI_{36}$	0,02	0,93	0,02	0,91	–0,04	0,88	0,00	1,0
	$SPEI_{48}$	–0,03	0,89	0,03	0,88	–0,08	0,73	–0,01	0,98
	Б	–0,08	0,22	0,10	0,63	–0,07	0,78	0,14	0,57
	ГТК	–0,25	0,36	–0,18	0,40	–0,28	0,24	–0,18	0,46
	$WMA_{ГТК\ (1-2)}$	–0,19	0,44	–0,28	0,17	–0,21	0,38	–0,31	0,19
	$WMA_{ГТК\ (1-3)}$	–0,16	0,44	–0,28	0,18	–0,17	0,48	–0,30	0,21
	$WMA_{ГТК\ (1-4)}$	–0,14	0,50	–0,26	0,20	–0,13	0,59	–0,26	0,28
ПГРЭЗ	KBDI	0,30	0,14	–0,15	0,49	0,47	0,04	–0,12	0,63
	$WMA_{KBDI\ (1-2)}$	**0,41**	**0,04**	0,00	0,98	**0,65**	**<0,01**	0,09	0,71
	$WMA_{KBDI\ (1-3)}$	**0,50**	**0,01**	0,13	0,53	**0,78**	**<0,01**	0,28	0,25
	$WMA_{KBDI\ (1-4)}$	**0,47**	**0,02**	0,24	0,25	**0,78**	**<0,01**	0,43	0,07
	$SPEI_3$	–0,18	0,39	0,12	0,56	–0,34	0,16	0,05	0,83
	$SPEI_6$	–0,02	0,91	–0,08	0,70	–0,12	0,62	–0,20	0,42
	$SPEI_{12}$	–0,04	0,83	–0,04	0,86	–0,12	0,63	–0,04	0,86
	$SPEI_{24}$	–0,14	0,51	–0,05	0,81	–0,32	0,18	–0,10	0,68
	$SPEI_{36}$	–0,21	0,32	–0,11	0,61	**–0,64**	**<0,01**	–0,29	0,23
	$SPEI_{48}$	–0,22	0,30	–0,22	0,29	**–0,73**	**<0,01**	**–0,57**	**0,01**
	Б	**–0,45**	**0,02**	–0,16	0,43	**–0,64**	**<0,01**	–0,22	0,36
	ГТК	**–0,35**	**<0,01**	–0,08	0,71	–0,44	0,06	–0,09	0,72
	$WMA_{ГТК\ (1-2)}$	**–0,46**	**0,02**	–0,21	0,30	**–0,62**	**<0,01**	–0,26	0,29
	$WMA_{ГТК\ (1-3)}$	**–0,54**	**<0,01**	–0,34	0,10	**–0,71**	**<0,01**	–0,41	0,09
	$WMA_{ГТК\ (1-4)}$	**–0,53**	**<0,01**	–0,43	0,03	**–0,71**	**<0,01**	**–0,50**	**0,03**

Примечание. Полужирным начертанием обозначены статистически значимые корреляционные связи (*p*-value < 0,05).

Более сильная зависимость отмечается для периода 2001–2019 гг., где коэффициент корреляции достигал 0,68 (KBDI, $WMA_{KBDI\ (1-3)}$) на следующий год после засухи. Это связано с тем, что после массовой гибели древостоя в 2016–2018 гг. кормовая база для насекомых и патогенных грибов не успела восстановиться. Также сказались проводимые санитарные мероприятия по борьбе с источниками ослабления состояния древостоя. В результате этого в последующем наблюдалось снижение масштабов гибели лесов, несмотря на высокие значения KBDI.

ПГРЭЗ. В заповеднике сильную корреляционную связь с площадью погибших насаждений показали все вариации WMA индекса KBDI и ГТК, а также значения SPEI за 36 и 48 месяцев и комплексного гидротермического показателя Битвинскаса. Максимальные значения коэффициента корреляции отмечены для $WMA_{KBDI\ (1-3)}$ и $WMA_{KBDI\ (1-4)}$ – по 0,78.

Характер засух и масштабы гибели лесов в ПГРЭЗ отличаются от НП «Беловежская пуща». Максимальное среднесезонное значение KBDI (68,0 единиц) отмечено в 2015 г., что соответствует

сильному уровню засухи при пороге «эффективных осадков» в 1 мм/сут. В ПГРЭЗ значения индекса были высоки и в 2016 г., что повлияло на усиление негативного воздействия недостатка влаги и продолжение развития лесопатологических процессов вплоть до 2019 г. По аналогичному сценарию наблюдались потери лесов в 2003–2004 гг. на фоне двух подряд летних сезонов 2002–2003 гг. с засухами. По этой же причине отличается динамика площадей погибших насаждений двух модельных территорий, где пик в НП «Беловежская пуща» относится к 2016 г., а в ПГРЭЗ – к 2018 г.

Взвешенное скользящее среднее KBDI за 3 года показало наилучший результат на обеих территориях, что делает его наиболее пригодным для прогнозирования риска гибели лесов.

Анализ устойчивости лесов. При близкой климатической обусловленности гибели различия в генезисе и структуре лесов отражаются в распределении погибших насаждений по ЭГЛ.

НП «Беловежская пуща». Основные очаги гибели лесов располагаются в северо- и юго-восточной частях объекта (рис. 2, *а*), сконцентрировавшись на бедных дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах водно-ледниковых возвышенностей сожского возраста. В разрезе функционального зонирования участки погибших насаждений распределяются неравномерно: большая часть (5,9 тыс. га, 39,7 % всей гибели лесов) находится в заповедной зоне, самой крупной структурной единице объекта (58,3 тыс. га); на хозяйственную зону (45,9 тыс. га) приходится 4,8 тыс. га (32,0 %) погибших насаждений, на зону регулируемого использования (37,9 тыс. га) и рекреационную зону (8,0 тыс. га) – 3,1 (20,9 %) и 1,0 тыс. га (6,5 %) соответственно. Сильная степень подверженности древостоя в заповедной зоне объясняется наличием в ее пределах территорий, ранее входивших в заповедно-охотничью хозчасть [33, с. 8], где и сконцентрированы основные очаги. На остальной ее площади, длительно находившейся в абсолютно заповедном режиме, нарушенные леса встречаются лишь небольшими фрагментами.

Наибольшие площади погибших насаждений за анализируемый период были характерны для лесов, произрастающих на бедных и относительно богатых песчаных почвах (суммарно – 12,4 тыс. га, 94,4 % потерь лесов) (табл. 2, рис. 4).

По отношению к гигротопам явление получило обширное распространение в лесах на почвах неустойчивого и нормального увлажнения (11,8 тыс. га, 78,8 %).

В структуре формаций ЭГЛ наиболее сильно негативное воздействие внешних факторов проявилось в сосновых лесах, в особенности на бедных песчаных почвах неустойчивого увлажнения и относительно богатых почвах нормального увлажнения (10,5 тыс. га, 70,6 %). Помимо этого, явление получило распространение в еловых и березовых лесах, в большей степени – на относительно богатых почвах нормального и повышенного увлажнения (1,0 тыс. га, 6,6 %). Преобладание указанных групп и формаций связано прежде всего с их обширной представленностью, тогда как реакция на изменение состояния среды существенно различается.

Наиболее уязвимыми в НП «Беловежская пуща» за 2001–2025 гг. оказались леса на бедных песчаных почвах недостаточного (27,5 % площади ЭГЛ) и неустойчивого (17,9 %) увлажнения, относительно богатых почвах нормального (12,1 %) и повышенного (12,0 %) увлажнения. Менее уязвимыми оказались леса на более богатых и увлажненных почвах, где доля погибших насаждений составила от 1,5 до 2,8 % от площади ЭГЛ.

Среди формаций с низкой устойчивостью к климатическому стрессу выделяются сосновые леса, где доля погибших насаждений снижается с ростом богатства и увлажненности почв: от 27,4 % на бедных песчаных почвах недостаточного увлажнения до 2,7% на олиго- и мезотрофных болотах.

Для еловых лесов зависимость между устойчивостью к негативному воздействию и условиями местопроизрастания выражена в меньшей степени. Здесь погибшие насаждения составили от 6,2 % площади формации на оторфованных минеральных почвах эвтрофного заболачивания до 18,3 % на бедных песчаных почвах неустойчивого увлажнения.

Березовые леса подвержены гибели главным образом на бедных песчаных почвах, где погибшие насаждения составляют до половины площади в ряде ЭГЛ. Прежде всего это связано с общей малой представленностью березовых лесов в таких местообитаниях и весомой долей насаждений с низкоустойчивым древостоем сосны (55,6 %).

Промежуточное положение в устойчивости к лесопатологической угрозе занимают в основном лиственные леса на относительно богатых почвах нормального и повышенного увлажнения, где наиболее широко представлены формации дуба, березы и осины.

Таблица. 2. **Характеристика гибели лесов в разрезе пород различных ЭГЛ**

Table 2. **Characteristics of forest loss in terms of species of various forest ecological groups**

ЭГЛ			Формация	Характеристики ЭГЛ							
				НП «Беловежская пуща»				ПГРЭЗ			
				площадь ЭГЛ, тыс. га	гибель леса, тыс. га	доля погибших насаждений в ЭГЛ, %	доля погибших насаждений от всех лесов, %	площадь ЭГЛ, тыс. га	гибель леса, тыс. га	доля погибших насаждений в ЭГЛ, %	доля погибших насаждений от всех лесов, %
на бедных песчаных почвах	недостаточного увлажнения	1	С	2,3	0,6	27,4	4,3	17,5	5,1	28,8	30,8
			Б	<0,1	<0,1	49,9	0,1	1,0	0,2	17,4	1,1
			Итого по 1	2,4	0,7	27,5	4,4	18,6	5,2	28,2	31,8
	неустойчивого увлажнения	2	С	35,2	6,3	18,0	42,4	37,9	7,3	19,2	44,5
			Е	0,3	0,1	18,3	0,3	<0,1	<0,1	0,6	<0,1
			Д	<0,1	<0,1	1,2	<0,1	–	–	–	–
			Б	0,9	0,1	15,7	1,0	1,9	0,2	12,2	1,4
			ОС	<0,1	<0,1	4,6	<0,1	<0,1	<0,1	0,5	<0,1
			Итого по 2	36,4	6,5	17,9	43,7	39,9	7,5	18,9	45,8
на относительно богатых почвах	нормального увлажнения	3	С	26,8	4,2	15,7	28,2	13,3	0,6	4,6	3,7
			Е	2,7	0,4	13,5	2,4	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
			Д	4,8	0,2	4,6	1,5	6,5	0,1	1,6	0,6
			Г	1,4	<0,1	2,4	0,2	0,3	<0,1	0,1	<0,1
			КЛ	0,1	<0,1	1,8	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1
			ЛП	<0,1	<0,1	9,6	<0,1	–	–	–	–
			Я	<0,1	<0,1	1,8	<0,1	0,3	<0,1	0,4	<0,1
			ОЛЧ	0,9	<0,1	3,1	0,2	0,8	<0,1	1,0	<0,1
			Б	5,2	0,3	5,9	2,1	5,0	0,2	3,1	0,9
			ОС	1,2	0,1	4,6	0,4	0,2	<0,1	0,9	<0,1
			ИВД	–	–	–	–	<0,1	<0,1	1,3	<0,1
			Итого по 3	43,3	5,2	12,1	35,0	27,1	0,9	3,3	5,5
	повышенного увлажнения	4	С	10,5	1,4	12,9	9,1	10,5	0,8	7,8	5,0
			Е	1,4	0,2	16,4	1,5	–	–	–	–
			Д	0,3	<0,1	4,3	0,1	0,9	<0,1	1,2	0,1
			Г	<0,1	<0,1	4,5	<0,1	–	–	–	–
			Б	1,7	0,1	5,2	0,6	10,6	0,6	5,9	3,9
			ОС	0,2	<0,1	4,3	0,1	0,1	<0,1	2,4	<0,1
			Итого по 4	14,1	1,7	12,0	11,3	22,4	1,5	6,6	9,0
на богатых почвах повышенного увлажнения		5	Е	0,9	0,1	8,2	0,5	–	–	–	–
			Д	0,4	<0,1	2,5	0,1	11,1	0,1	1,2	0,8
			Г	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	–	–	–	–
			КЛ	<0,1	<0,1	2,5	<0,1	–	–	–	–
			Я	0,2	<0,1	1,6	<0,1	0,9	<0,1	0,3	<0,1
			ОЛЧ	9,3	0,2	1,9	1,2	10,4	0,1	0,9	0,5
			Б	1,9	<0,1	1,3	0,2	13,9	0,4	2,5	2,2
			ОС	0,1	<0,1	2,6	<0,1	0,3	<0,1	0,2	<0,1
			ИВК	–	–	–	–	<0,1	<0,1	2,5	<0,1
			ИВД	–	–	–	–	1,0	<0,1	2,3	0,1
			Итого по 5	12,9	0,3	2,2	1,9	37,7	0,6	1,6	3,7

на оторфованных минеральных почвах	олиготрофного заболачивания	6	С	1,7	0,2	10,4	1,2	0,5	<0,1	7,0	0,2
			Е	0,1	<0,1	11,8	0,1	–	–	–	–
			Б	0,6	<0,1	2,9	0,1	0,8	0,1	8,2	0,4
			ОС	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	0,4	<0,1
			Итого по 6	2,5	0,2	8,6	1,4	1,4	0,1	7,6	0,6
	эвтрофного заболачивания	7	С	0,4	<0,1	4,6	0,1	0,1	<0,1	7,7	0,1
			Е	0,1	<0,1	6,2	<0,1	–	–	–	–
			ОЛЧ	<0,1	<0,1	1,1	<0,1	–	–	–	–
			Б	0,5	<0,1	0,8	<0,1	1,4	<0,1	3,2	0,3
			Итого по 7	1,0	<0,1	2,8	0,2	1,5	<0,1	3,6	0,3
на торфяных болотах	олиго- и мезотрофных	8	С	1,8	<0,1	2,7	0,3	–	–	–	–
			Б	0,3	<0,1	1,3	<0,1	–	–	–	–
			Итого по 8	2,1	0,1	2,6	0,4	–	–	–	–
	эвтрофных	9	С	0,9	<0,1	2,8	0,2	<0,1	<0,1	2,6	<0,1
			Е	0,1	<0,1	12,4	0,1	–	–	–	–
			Я	<0,1	<0,1	6,5	<0,1	–	–	–	–
			ОЛЧ	11,9	0,2	1,5	1,2	5,0	0,1	2,1	<0,1
			Б	3,7	<0,1	0,9	0,2	2,3	0,1	3,9	0,5
			ИВД	–	–	–	–	0,9	<0,1	3,7	0,2
			ИВК	0,1	<0,1	0,2	<0,1	4,9	0,1	2,2	0,7
			Итого по 9	16,8	0,2	1,5	1,6	13,0	0,3	2,6	2,0
на затапливаемых землях		10	Д	–	–	–	–	3,3	0,1	4,2	0,8
			ИВК	–	–	–	1,0	<0,1	5,6	0,3	
			Итого по 10	–	–	–	4,2	0,2	4,5	1,2	
Итого по всем ЭГЛ				131,4	14,9	11,4	100,0	165,9	16,4	9,9	100,0

Примечание. Формации древесных пород: С – сосновая, Е – еловая, Д – дубовая, Г – грабовая, КЛ – кленовая, ЛП – липовая, Я – ясеневая, ОЛЧ – черноольховая, Б – березовая, ОС – осиновая, ИВК – ивы кустарниковой, ИВД – ивы древовидной.

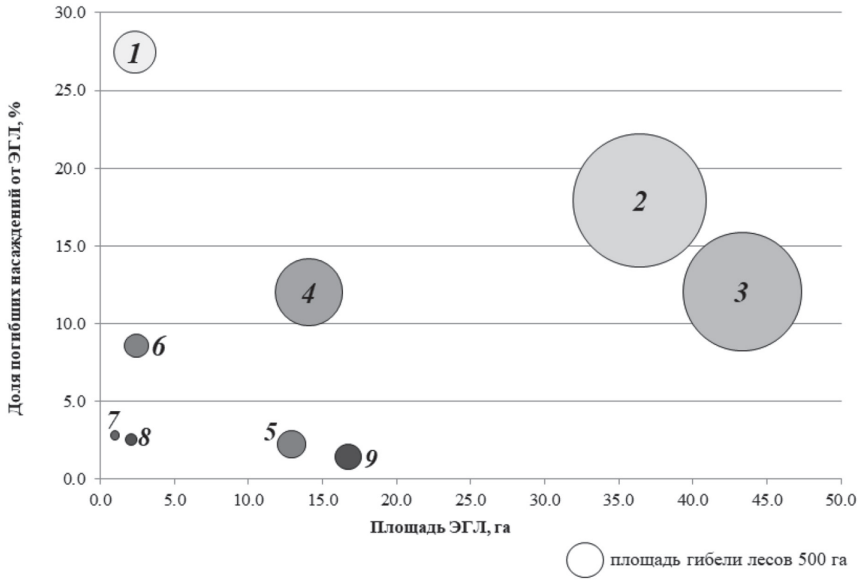


Рис. 4. Соотношение доли погибших насаждений в ЭГЛ с ее общей площадью в НП «Беловежская пуща» (номера ЭГЛ – в табл. 2)

Fig. 4. The ratio of the proportion of dying forest stands in the forest ecological groups to its total area in the NP "Belovezhskaya Pushcha" (forest ecological groups' numbers are given in Table 2)

Леса на болотах и оторфованных минеральных почвах различных типов заболачивания являются наименее уязвимыми к воздействию экстремальных климатических явлений. Доминирующее положение в данных ЭГЛ занимают формации ольхи черной и березы. Для них характерна низкая доля погибших насаждений в структуре лесов (от 0,8 до 2,9 %) при довольно широком распространении в НП «Беловежская пуща» (17,1 тыс. га).

ПГРЭЗ. Здесь подавляющая доля погибших насаждений разместилась крупными массивами по периферии и в центре территории (рис. 2, *b*), в основном на бедных песчаных почвах недостаточного и неустойчивого увлажнения (12,7 тыс. га, 77,6 %) (рис. 5).

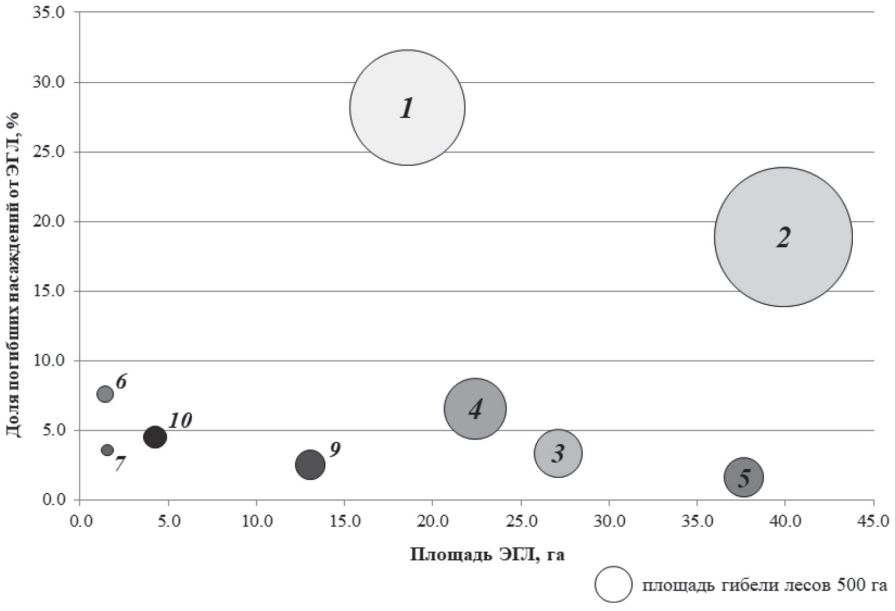


Рис. 5. Соотношение доли погибших насаждений в ЭГЛ с ее общей площадью в ПГРЭЗ (номера ЭГЛ – в табл. 2)

Fig. 5. The ratio of the proportion of dying forest stands in the forest ecological groups to its total area in the PSRR (forest ecological groups' numbers are given in Table 2)

Погибшие насаждения сосредоточены в сосновых лесах на бедных песчаных почвах (12,4 тыс. га, 75,3 %). Крупные участки с гибелью лесов отмечены в сосновых (1,4 тыс. га, 8,7 %) и березовых (0,8 тыс. га, 4,8 %) лесах на относительно богатых почвах.

Наименее устойчивыми оказались сосняки (до 28,8 % погибших насаждений от площади ЭГЛ) и березняки (до 17,4 %) на бедных и относительно богатых почвах различной степени увлажнения, что в целом повторяет порядок ведущих позиций по общей площади гибели и отражает неудовлетворительное санитарное состояние доминирующей лесной формации заповедника.

Более устойчивы сосняки и березняки на относительно богатых почвах нормального и повышенного увлажнения и на оторфованных минеральных почвах олиготрофного заболачивания. Наименьшая доля погибших насаждений отмечена в лиственных лесах наиболее влажных местообитаний.

Категории лесов по степени устойчивости к лесопатологической угрозе. На основе данных о подверженности ЭГЛ к негативному воздействию для обоих объектов выделены 5 категорий лесов по степени устойчивости к лесопатологической угрозе (табл. 3, рис. 6).

Таблица 3. **Категории устойчивости лесов к возникновению лесопатологической угрозы**

Table 3. **Categories of forest resistance to forest pathological threats**

Категория устойчивости	Доля погибших насаждений в формациях ЭГЛ, %	Площадь			
		НП «Беловежская пуща»		ПГРЭЗ	
		тыс. га	%	тыс. га	%
1 (наименее устойчивые)	>20,0	2,4	1,8	17,6	10,6
2 (неустойчивые)	15,0–20,0	64,6	49,1	39,0	23,5
3 (среднеустойчивые)	10,0–15,0	15,2	11,6	1,9	1,2
4 (устойчивые)	3,0–10,0	15,7	11,9	50,1	30,2
5 (наиболее устойчивые)	<3,0	33,6	25,6	57,4	34,6

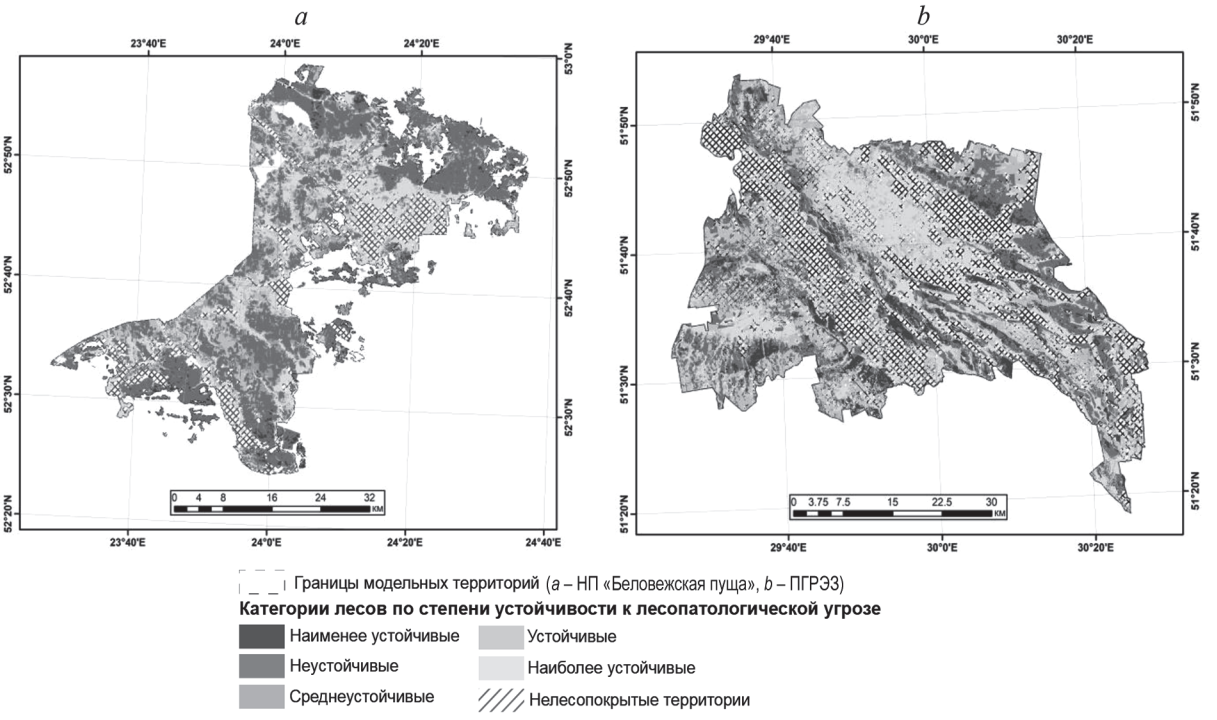


Рис. 6. Устойчивость лесов к лесопатологической угрозе (*a* – НП «Беловежская пуща, *b* – ПГРЭЗ)

Fig. 6. Forest resistance to the forest pathological threats (a – NP “Belovezhskaya Pushcha”, *b* – PSRR)

Таким образом, в НП «Беловежская пуща» 50,9 % лесов имеют высокий риск возникновения лесопатологических процессов, они располагаются в основном в северной и юго-восточной части объекта. В ПГРЭЗ низкоустойчивые насаждения размещаются компактными массивами в периферийных частях объекта, составляя 34,1 % площади всех лесов.

Полученная схема служит пространственной основой мониторинга состояния лесов и разработки превентивных мер в слабоустойчивых насаждениях. Она описывает долгосрочный потенциал риска и обладает свойством динамичности. При поступлении актуальных сведений об изменении состояния или структуры насаждений участки могут быть отнесены к иным категориям устойчивости. Наиболее важно, что на ее основе возможно составление прогноза риска гибели насаждений, где рассчитываемые 3-летние значения WMA KBDI выступают в качестве предиктора потенциала усыхания на следующий год, когда сведения об устойчивости насаждений к стрессу используются как множитель климатического показателя (1,2 – 1 категория, 1,1 – 2 категория, 1,0 – 3 категория, 0,9 – 4 категория, 0,8 – 5 категория).

Итоговым продуктом алгоритма является карта-схема прогнозируемого риска возникновения лесопатологических процессов в соответствии с адаптированным индексом aKBDI, где значения 0–10 отражают отсутствие риска, 10–20 – низкий риск, 20–30 – умеренный, 30–40 – средний, 40–50 – повышенный, 50–60 – высокий, 60–70 – очень высокий, 70 и более – экстремально высокий (рис. 7).

Проверка подхода на примере ПГРЭЗ за период с 2016 по 2018 г. с максимальной гибелью лесов (6,5 тыс. га) после засухи 2015 г. показала, что наиболее высокий риск отмечен на 48,0 тыс. га (28,9 % площади всех лесов), в пределах которых гибель лесов встречалась на 3,8 тыс. га (76,9 % всех погибших насаждений за тестовый период) (рис. 8).

Таким образом, смоделированный потенциал и фактическая гибель лесов в значительной мере совпадают. При этом не все насаждения, определенные как потенциально уязвимые, погибают ввиду того, что подход позволяет оценить степень риска, а его уточнение требует привлечения дополнительных сведений.

В дальнейшей перспективе исследований по данному направлению видится повышение детализации получаемых результатов через добавление важных факторов формирования устойчивости – возрастной структуры и категорий лесов. Однако даже при такой дифференциации невозможно точечно отразить участки лесов, где вероятность гибели будет довольно высока в предстоящем году – на такой исход событий влияет довольно большое количество факторов.

Несомненно, рассмотренный подход требует регулярного обновления входной информации. Во-первых, актуальные данные о площадях гибели лесов служат новыми эталонными объектами и повышают качество классификации спутниковых композитов. Во-вторых, немаловажным является элемент естественной динамики растительности, усложняющий спектральные характеристики объектов, а также приводящий к развитию восстановительных процессов растительности и появлению лесов на ныне нелесопокрытых землях, которые также должны включаться в пространственную выборку. Разработанный алгоритм допускает такое обновление с высокой точностью и оперативностью.

Заключение. С применением алгоритма Random Forest для классификации спутниковых снимков получены ежегодные пространственные сведения о гибели лесов в НП «Беловежская пуща» и ПГРЭЗ за 2001–2025 гг. Пиковые значения площадей погибших насаждений для двух объектов пришлись на 2016–2018 гг.: в НП «Беловежская пуща» – на 2016 г. после засухи 2015 г., в ПГРЭЗ – на 2018 г. после трех засушливых летних сезонов 2015–2017 гг.

Масштабы гибели лесов имеют сильную зависимость от климатических условий, сложившихся на протяжении предыдущих лет, что хорошо отражают значения взвешенных скользящих средних индекса KBDI за 3 года с временным лагом в +1 год.

Устойчивость насаждений существенно зависит от типа местообитания, где наибольший риск гибели древостоя на двух объектах характерен для хвойных и хвойно-мелколиственных лесов на бедных песчаных почвах недостаточного и неустойчивого увлажнения. На основе доли погибших насаждений в структуре площадей различных ЭГЛ определены 5 категорий устойчивости лесов к возникающему стрессу, среди которых низкоустойчивые составили 50,9 и 34,1 % площади всех лесов в НП «Беловежская пуща» и ПГРЭЗ соответственно.

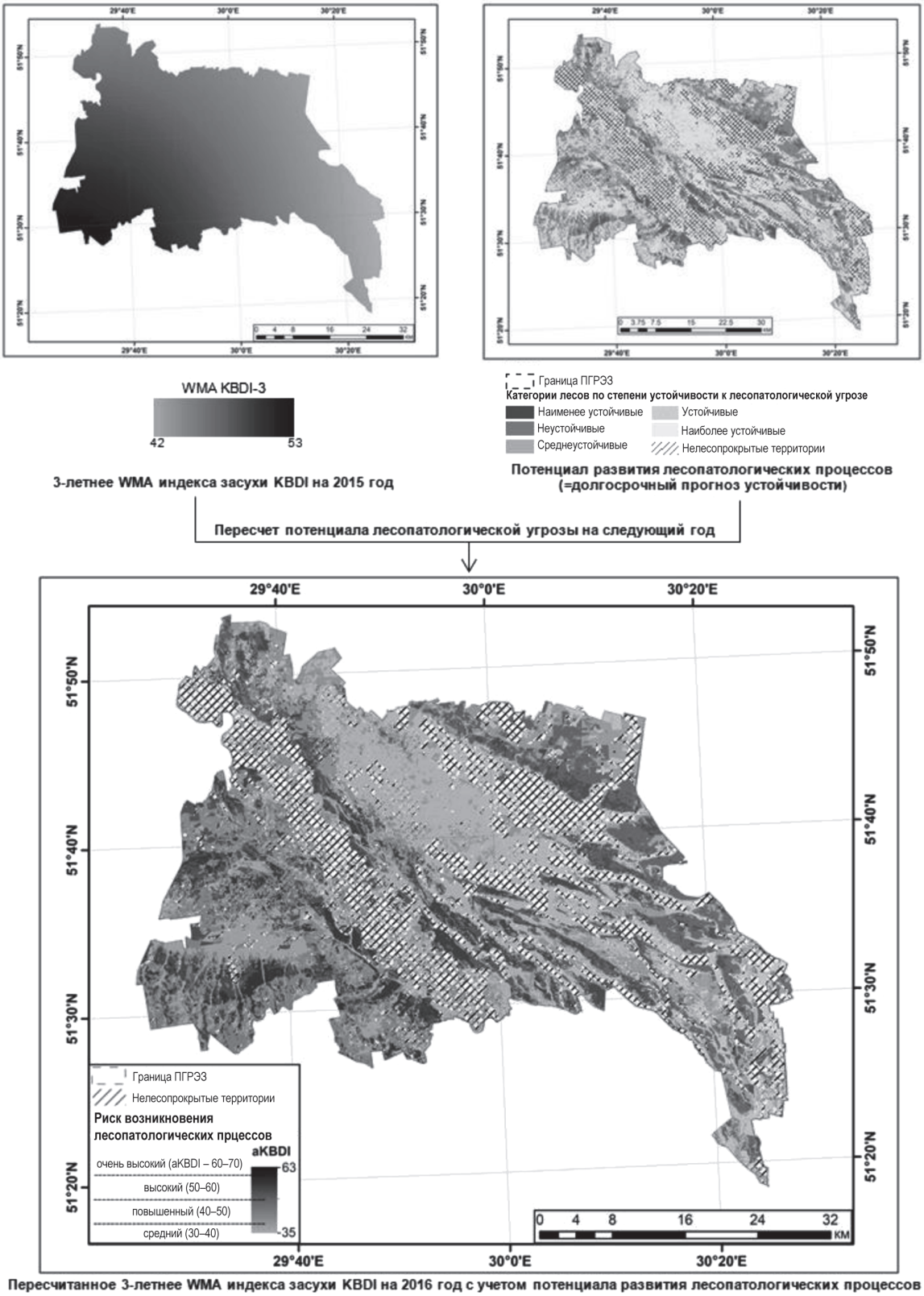


Рис. 7. Пример ежегодного прогнозирования риска возникновения лесопатологических процессов

Fig. 7. Example of annual forecasting of the risk of forest pathological processes

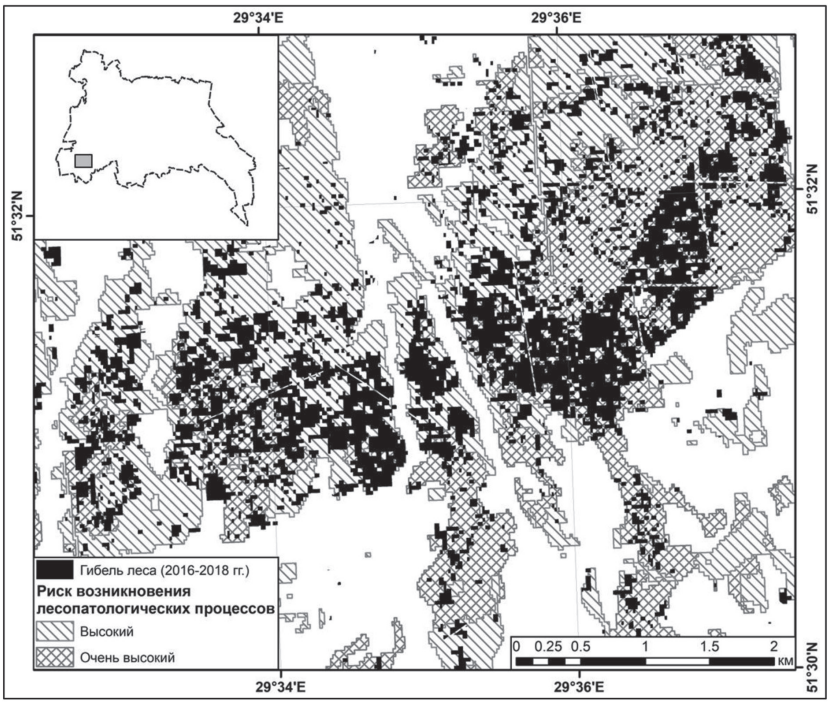


Рис. 8. Сопоставление участков с гибелью лесов и наиболее высокой степенью риска возникновения лесопатологических процессов

Fig. 8. Comparison of areas with forest loss and the highest risk of forest pathological processes

На базе полученных данных о климатической обусловленности гибели лесов и устойчивости различных ЭГЛ модельных территорий составлен алгоритм прогнозирования риска возникновения лесопатологических процессов, позволяющий после окончания вегетационного сезона определить участки леса, где в следующем году вероятность гибели древостоя наиболее высока.

Ежегодно получаемые прогнозные сведения могут являться важным элементом в принятии своевременных решений о проведении мероприятий по поддержанию санитарного состояния лесов. Подтверждением этому являются результаты исследования, где отражены возможности применения современных достижений информационных технологий, начиная от получения исходных сведений о расположении погибших насаждений до прогнозирования риска развития лесопатологических процессов в ныне относительно здоровых лесах. В ходе дальнейших исследований планируется более детально определить критерии для выделения категорий лесов по степени устойчивости к возникающему стрессу, что позволит повысить объективность составляемого прогноза.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Гниненко, Ю. И. Проблема усыхания сосняков и роль вершинного короеда в этом процессе / Ю. И. Гниненко, Н. И. Лямцев // Лесохозяйственная информация. – 2022. – № 3. – С. 84–94.

2. Сазонов, А. А. Массовое усыхание сосновых лесов Беларуси: особенности, причины, последствия / А. А. Сазонов, В. Б. Звягинцев // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах: X Чтения памяти О. А. Катаева: материалы Междунар. конф., Санкт-Петербург, 22–25 окт. 2018 г. / С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова; отв. ред.: Д. Л. Мусолина, А. В. Селиховкина. – СПб., 2018. – Т. 2: Фитопатогенные грибы, вопросы патологии и защиты леса. – С. 28–29.

3. Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought / H. D. Adams, M. Guardiola-Claramonte, G. A. Barron-Gafford [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2009. – Vol. 106, N 17. – P. 7063–7066. https://doi.org/10.1073/pnas.0901438106

4. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests / C. D. Allen, A. K. Macalady, H. Chenchouni [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2010. – Vol. 259, N 4. – P. 660–684. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.09.001

5. Allen, C. D. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off drom hotter drought in the Anthropocene / C. D. Allen, D. D. Breshears, N. G. McDowell // Ecosphere. – 2015. – Vol. 6, N 8. – Art. 129. – https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1

6. Anderegg, W. R. L. Consequnces of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress / W. R. L. Anderegg, J. M. Kane, L. D. L. Anderegg // Nature Climate Change. – 2012. – Vol. 3, N 1. – P. 30–36. https://doi.org/10.1038/nclimate1635

7. Climate Warming Drought in the Bialowieza Forest from 1950–2015 and Their Impact in the Dieback of Norway Spruce Stands / A. Boczoń, A. Kowalska, M. Ksepko, K. Sokołowski // Water. – 2018. – Vol. 10. – Art. 1502. – https://doi.org/10.3390/W10111502

8. Kharuk, V. I. Climate-induced mortality of spruce stands in Belarus / V. I. Kharuk, S. Im, M. L. Dvinskaya [et al.] // Environmental Research Letter. – 2015. – Vol. 10, N 12. – Art. 125006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/125006

9. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests / W. M. Hammond, A. P. Williams, J. T. Abatzoglou [et al.] // Nature Communications. – 2022. – Vol. 13, N 1. – Art. 1761. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2

10. Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe / C. Senf, A. Buras, C. S. Zang [et al.] // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11, N 1. – Art. 6200. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19924-1

11. Weed, A. S. Consequences of climate change for biotic disturbances on North American forests / A. S. Weed, M. P. Ayres, J. A. Hicke // Ecological Monographs. – 2013. – Vol. 83, N. 4. – P. 441–470. https://doi.org/10.1890/13-0160.1

12. Анализ динамики лесного растительного покрова Беларуси на основе данных дистанционного зондирования / Д. Г. Груммо, А. В. Пугачевский, С. Г. Русецкий, Н. А. Зеленкевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 293–303.

13. Жибуль, А. А. Мониторинг лесов / А. А. Жибуль // Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь: результаты наблюдений, 2024 год / Н. Г. Бибова, В. В. Парфенов, П. В. Пальчех [и др.]; под ред. Е. А. Мельник. – Мн., 2025. – Гл. 9. – С. 326–355.

14. Алексеев, А. С. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований / А. С. Алексеев, Д. М. Черняховский // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 2. – С. 11–27.

15. Обнаружение усыханий хвойных лесов по авиакосмическим данным / Л. В. Катковский, О. О. Силюк, Б. И. Беляев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. – Т. 19, № 3. – С. 88–102.

16. Лабутина, И. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: метод. пособие / И. А. Лабутина, Е. А. Балдина. – М.: Всемир. фонд дикой природы (WWF России), 2011. – 88 с.

17. Byer, S. Detecting Drought-Induced Tree Mortality in Sierra Nevada Forests with Time Series of Satellite Data / S. Byer, J. Yufang // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, N 9. – Art. 929. https://doi.org/10.3390/rs9090929

18. Climate-Change-Driven Droughts and Tree Mortality: Assessing the Potential of UAV-Derived Early Warning Metrics / E. B. Ewane, M. Midhun, B. Shaurya [et al.] // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, N 10. – Art. 2627. https://doi.org/10.3390/rs15102627

19. Sentinel-2 Data in an Evaluation of the Impact of the Disturbances on Forest Vegetation / J. Lastovicka, P. Svec, D. Paluba [et al.] // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, N 12. – Art. 1914. https://doi.org/10.3390/rs12121914

20. Detection of Fir Trees (Abies Sibirica) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning / A. Safonova, S. Tabik, D. Alcaraz-Segura [et al.] // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, N 6. – Art. 643. https://doi.org/10.3390/rs11060643

21. Mapping Tree Mortality Caused by Siberian Silkmoth Outbreak Using Sentinel-2 Remote Sensing Data / O. A. Slinkina, P. V. Mikhaylov, S. M. Sultson [et al.] // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 14, N 12. – Art. 2436. https://doi.org/10.3390/f14122436

22. Чайковский, А. И. К вопросу о придании природоохранного статуса Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику / А. И. Чайковский, М. В. Кудин, Д. Г. Груммо [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 80–88.

23. Landsat satellites images catalog // Google Earth Engine. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat (date of access: 10.01.2026).

24. Sentinel-2 images catalog // Google Earth Engine. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-2?hl=en (date of access: 10.01.2026).

25. Keetch, J. J. A Drought Index for Forest Fire Control / J. J. Keetch, G. M. Byram. – Asheville: Dep. of Agricult., Forest Service, Southeastern Forest Experim. Station, 1968. – 35 p.

26. Vicente-Serrano, S. M. A Multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index–SPEI / S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. I. López-Moreno // Journal of Climate. – 2010. – Vol. 23, N 7. – P. 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

27. Битвинскас, Т. Т. Дендроклиматические исследования / Т. Т. Битвинскас. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 172 с.

28. Селянинов, Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата / Г. Т. Селянинов // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – Вып. 20. – С. 165–177.

29. SPEI Global Drought Monitor Maps // SPEI Global Drought Monitor. – URL: https://spei.csic.es/map/maps.html (date of access: 10.01.2026).

30. ERA5 Daily Aggregates // Google Earth Engine. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_DAILY?hl=ru (date access: 10.01.2026).

31. Маслов, А. Д. Короед-типограф и усыхание еловых лесов / А. Д. Маслов. – Пушкино: Всерос. науч.-исслед. ин-т лесоводства и механизации лес. хоз-ва, 2010. – 130 с.

32. Гельтман, В. С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии / В. С. Гельтман. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 326 с.

33. Развитие системы функционального зонирования национального парка «Беловежская пуща» / А. В. Бурый, В. М. Арнольбик, Д. И. Бернацкий, В. Г. Кравчук // Беловежская пуща. Исследования: сб. науч. ст. / Гос. природоохран. учреждение «Нац. парк “Беловеж. Пуща”». – Брест, 2017. – Вып. 15. – С. 6–16.

References

1. Gninenko Yu. I., Lyamtsev N. I. Drying Out of Pine Forests and the Role of the *Ips acuminatus*. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Forestry Information*, 2022, no. 3, pp. 84–94 (in Russian).

2. Sazonov A. A., Zvyagintsev V. B. Massive drying of pine forests in Belarus: features, causes, consequences. *Dendrobiontnye bespozvonochnye zhivotnye i griby i ikh rol' v lesnykh ekosistemakh: X Chteniya pamyati O. A. Kataeva: materialy Mezhdunarodnoi konferentsii, Sankt-Peterburg, 22–25 oktyabrya 2018 goda* [Dendrobiont invertebrates and fungi and their role in forest ecosystems: 10th Readings in memory of O. A. Kataev: Proceedings of the international conference, St. Petersburg, October 22–25, 2018]. St. Petersburg, 2018, pp. 28–29 (in Russian).

3. Adams H. D., Guardiola-Claramonte M., Barron-Gafford G. A., Villegas J. C., Breshears D. D., Zou C. B., Troch P. A., Huxman T. E. Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, vol. 106, no. 17, pp. 7063–7066. https://doi.org/10.1073/pnas.0901438106

4. Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D. D., Hogg E. H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S. W., Semerci A., Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 259, no. 4, pp. 660–684. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.09.001

5. Allen C. D., Breshears D. D., McDowell N. G. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off drom hotter drought in the Anthropocene. *Ecoshere*, 2015, vol. 6, no. 8, art. 129. https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1

6. Anderegg W. R. L., Kane J. M., Anderegg L. D. L. Consequnces of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 30–36. https://doi.org/10.1038/nclimate1635

7. Boczoń A, Kowalska A., Ksepko M., Sokołowski K. Climate Warming Drought in the Bialowieza Forest from 1950–2015 and Their Impact in the Dieback of Norway Spruce Stands. *Water*, 2018, vol. 10, art. 1502. https://doi.org/10.3390/W10111502

8. Kharuk V. I., Im S., Dvinskaya M. L., Golukov A. S., Ranson K. J. Climate-induced mortality of spruce stands in Belarus. *Environmental Research Letter*, 2015, vol. 10, no. 12, art. 125006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/125006

9. Hammond W. M., Williams A. P., Abatzoglou J. T., Adams H. D., Klein T., López R., Sáenz-Romero C., Hartmann H., Breshears D. D., Allen C. D. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communic*, 2020, vol. 11, no. 1, art. 1761. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2

10. Senf C., Buras A., Zang C. S., Rmmig A., Seidl R. Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communic*, 2020, vol. 11, no. 1, art. 6200. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19924-1

11. Weed A. S., Ayres M. P., Hicke J. A. Consequences of climate change for biotic disturbances on North American forests. *Ecolologica Monographs*, 2013, vol. 83, no. 4, pp. 441–470. https://doi.org/10.1890/13-0160.1

12. Grummo D. G., Pugachevskii A. V., Rusetskii S. G., Zelenkevich N. A. Analysis of Forest Cover Dynamics in Belarus Based on Remote Sensing Data. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 293–303 (in Russian).

13. Zhibul' A. A. Forest monitoring. *National Environmental Monitoring System in the Republic of Belarus: Observation Results*, *2024.* Minsk, 2025, ch. 7, pp. 326–355 (in Russian).

14. Alekseev A. S., Chernikhovskii D. M. Identification of Damage to Coniferius Stands Based on Comprehensive Analysis of the Results of Remote Sensing of the Earth and Ground Surveys. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 11–28 (in Russian).

15. Katkovskii L. V., Silyuk O. O., Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Sarmin E. E., Bruchkovskii I. I., Gulyaeva S. I., Litvinovich G. S., Davidovich Yu. S. Detection of drying coniferous forests from aerospace data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2022, vol. 19, no. 3, pp. 88–102 (in Russian).

16. Labutina I. A., Baldina E. A. *Using Remote Sensing Data to Monitor Ecosystems in Protected Area*s. Moscow, World Wildlife Fund Russia, 2011. 88 p. (in Russian).

17. Byer S., Yufang J. Detecting Drought-Induced Tree Mortality in Sierra Nevada Forests with Time Series of Satellite Data. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no. 9, art. 929. https://doi.org/10.3390/rs9090929

18. Ewane B. E., Midhun M., Shaurya B., Galgamuwa G. A. P., Watt M. S., Arachchige P. P., Hudak A. T., Richardson G., Ajithkumar N., Srinivasan S., Corte A. P. D., Johnson D. J., Broadbent E. N., de-Miguel S., Bruscolini M., Young D. J. N., Shafai S., Abdullah M. M., Jaafar W. S. W. M., Doaemo W., Silva C. A., Cardil A. Climate-Change-Driven Droughts and Tree

Mortality: Assessing the Potential of UAV-Derived Early Warning Metrics. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 10, art. 2627. https://doi.org/10.3390/rs15102627

19. Lastovicka J., Svec P., Paluba D., Kobliuk N., Svoboda J., Hladky R., Stych P. Sentinel-2 Data in an Evaluation of the Impact of the Disturbances on Forest Vegetation. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 12, art. 1914. https://doi.org/10.3390/rs12121914

20. Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Yu., Herrera F. Detection of Fir Trees (Abies Sibirica) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 6, art. 643. https://doi.org/10.3390/rs11060643

21. Slinkina O. A., Mikhaylov P. V., Sultson S. M., Demidko D. A., Khizhniak N. P., Ttatrintsev A. I. Mapping Tree Mortality Caused by Siberian Silkmoth Outbreak Using Sentinel-2 Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 2023, vol 14, no. 12, art. 2436. https://doi.org/10.3390/f14122436

22. Chaikovskii A. I., Kudin M. V., Grummo D. G., Maksimenkov M. V., Ustin V. V. On the granting nature protection status to the Polesie State Radiation and Ecological Reserve. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 80–88 (in Russian).

23. *Landsat satellites images catalog (2026).* Available at: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat (accessed 10.01.2026).

24. *Sentinel-2 images catalog (2026).* Available at: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-2 (accessed 10.01.2026).

25. Keetch J. J., Byram G. M. A. *Drought Index for Forest Fire Control.* Asheville, Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1968. 35 p.

26. Vicente-Serrano S. M., Beguería S., López-Moreno J. I. Multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index–SPEI. *Journal of Climate*, 2010, vol. 23, no. 7, pp 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

27. Bitvinskas T. T. *Dendroclimatic research*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 172 p (in Russian).

28. Selyaninov G. T. On agricultural climate assessment. *Trudy po sel'skokhozyaistvennoi meteorologii* [Works on agricultural meteorology], 1928, iss. 20, pp. 165–177 (in Russian).

29. SPEI Global Drought Monitor Maps (2026). *SPEI Global Drought Monitor.* Available at: https://spei.csic.es/map/maps.html (accessed 10.01.2026).

30. ERA5 Daily Aggregates. *Google Earth Engine.* Available at: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_DAILY (accessed 10.01.2026).

31. Maslov A. D. *The bark beetle and the dying out of spruce forests*. Pushkino, All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, 2010. 130 p. (in Russian).

32. Gel'tman V. S. Geographical and typological analysis of the forest vegetation of Belarus. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 326 p. (in Russian).

33. Buryi A. V., Arnol'bik V. M., Bernatskii D. I., Kravchuk V. G. Development of a functional zoning system for the national park. *Belovezhskaya pushcha. Issledovaniya: sbornik nauchnykh statei* [Belovezhskaya Pushcha. Research: A Collection of Scientific Articles]. Brest, 2017, iss. 15, pp. 6–16 (in Russian).

Информация об авторах

Роговский Никита Михайлович – мл. науч. сотрудник, аспирант. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikita.rogovski.03@gmail.com

Груммо Дмитрий Геннадьевич – д-р биол. наук, доцент, директор. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: dm.grumo@botany.by

Information about the authors

Nikita M. Rogovsky – Junior Researcher, Postgraduate Student. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikita.rogovski.03@gmail.com

Dzmitry G. Grummo – D. Sc. (Biol.), Associate Professor, Director. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dm.grumo@botany.by