



Оценка темпов естественного возобновления вырубок усохших ельников с помощью данных дистанционного зондирования

Людмила А. Иванчина¹, ✉, ivanchina.ludmila@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9476-8683>

Дмитрий В. Макурин¹, 1-0-0@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1173-8946>

Егор С. Савостин¹, savostin.egor2014@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6981-184X>

Артем Д. Деменев¹, demenevartem@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1086-178X>

Николай Г. Максимович¹, nmax54@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6220-2730>

¹ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614990, Российская Федерация

В связи с массовым усыханием еловых лесов становится актуальным вопрос их восстановления после выполнения санитарно-оздоровительных мероприятий. При необходимости обследования значительных площадей целесообразнее пользоваться дистанционными методами. Выполнен расчет межгодовых линейных трендов значений нормализованного разностного индекса растительного покрова (NDVI) и коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в красном канале снимков зарастающих вырубок, усохших в результате повреждения стволовым вредителем короедом-типографом (*Ips typographus* L.), по данным спутниковой съемки Landsat в период с 2014 по 2025 годы в зоне хвойно-широколиственных лесов Пермского края. Объекты исследований включали 26 вырубок на участках усыхания еловых древостоев, в пределах которых в 2014 году проведены сплошные санитарные рубки. В качестве контроля выбраны 3 вырубки, в границах которых проведены сплошные рубки спелых и перестойных насаждений. В результате анализа временных рядов NDVI с использованием непараметрического критерия Манна-Кендалла выявлено преобладание статистически достоверных положительных трендов при оценке динамики восстановления лиственными породами как вырубок усохших ельников (77% участков), так и контрольных участков (100% участков). На территории половины вырубок усохших ельников после сплошной санитарной рубки происходит смена пород на менее ценные лиственные. Лесовосстановление с преобладанием молодых деревьев ели зафиксировано на территории только 12% вырубок усохших ельников, что подтверждается статистически значимыми убывающими трендами КСЯ в красном канале. Анализ по типам леса демонстрирует более успешное лесовосстановление елью в условиях зеленомошного типа леса (среднее значение КСЯ составляет 0.274 ± 0.07), а менее успешное – в условиях липового типа леса (среднее значение КСЯ – 0.439 ± 0.07). Более успешно лиственными породами восстанавливаются вырубки, расположенные в условиях липового типа леса: базисный темп прироста средних значений NDVI относительно года рубки в условиях липового типа леса у экспериментальных участков достигает 249.2%, а у фоновых – 225.9%. В условиях зеленомошного и кисличного типов леса вырубки усохших ельников восстанавливаются активнее, чем вырубки, в пределах которых произрастали здоровые насаждения: темп прироста значений NDVI в условиях зеленомошного типа леса у экспериментальных участков составляет 200.6%, у фоновых не превышает 57.9%, а в условиях кисличного типа леса у экспериментальных составляет 194.8%, у фоновых – 26.8%. По мнению авторов, данная закономерность может быть объяснена относительно низкими исходными значениями NDVI во временном ряду для зарастающих вырубок усохших ельников, а также более благоприятными условиями произрастания, связанными с повышением доступности питательных веществ в почве за счет разложения опавшей еловой хвои после усыхания древостоя.

Ключевые слова: вырубки усохших ельников, дистанционное зондирование, снимки Landsat, NDVI, подрост предварительной генерации, лесовосстановление, линейные тренды, ельники, коэффициент спектральной яркости (КСЯ) в красном канале

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

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оценка темпов естественного возобновления вырубок усохших ельников с помощью данных дистанционного зондирования / Л. А. Иванчина, Д. В. Макурин, Е. С. Савостин, А. Д. Деменев, Н. Г. Максимович // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 50–64. – Библиогр.: с. 61–64 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/4>.

Поступила 16.03.2026. *Пересмотрена* 30.04.2026. *Принята* 15.05.2026. *Опубликована онлайн* 26.06.2026

Article

Assessment of Natural Regeneration Rates in Logged Dried-Up Spruce Forests Using Remote Sensing Data

Ludmila A. Ivanchina¹ ✉, ivanchina.ludmila@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9476-8683>

Dmitrii V. Makurin¹, 1-0-0@bk.ru  <https://orcid.org/0009-0001-1173-8946>

Egor S. Savostin¹, savostin.egor2014@yandex.ru  <https://orcid.org/0009-0006-6981-184X>

Artem D. Demenev¹, demenevartem@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0003-1086-178X>

Nikolay G. Maksimovich¹, nmax54@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0001-6220-2730>

¹Perm State University, 15 Bukireva Street, Perm, 614990, Russian Federation

Abstract

Due to the widespread dieback of spruce forests, reforestation following sanitary measures has become an urgent priority. When surveying large areas, remote sensing methods are more practical. Interannual linear trends of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and spectral brightness coefficients (SBC) in the red band were calculated for regenerating clear-cut areas of dried-up spruce forests affected by the bark beetle (*Ips typographus* L.) using Landsat satellite imagery for the period 2014–2025 within the coniferous-broadleaf forest zone of Perm Krai. The study included 26 logged areas where clear sanitary cuts were carried out in 2014. Three control sites, subjected to clear cutting of mature and overmature stands, were selected for comparison. Time-series analysis of NDVI using the Mann-Kendall non-parametric test revealed a predominance of statistically significant positive trends in the recovery of deciduous species, both on cleared dried-up spruce plots (77% of sites) and control sites (100% of sites). On half of the logged dried-up spruce areas, post-sanitary cutting regeneration involved a shift to less valuable deciduous species. Forest regeneration dominated by young spruce trees was observed in only 12% of the dried-up spruce clear-cuts, which is corroborated by statistically significant decreasing trends in SBC values in the red band. Analysis of red-band SBC values by forest type indicated more successful spruce regeneration in green-moss forests (mean SBC – 0.2741) and less successful regeneration in lime-dominated forests (mean SBC – 0.4388). Conversely, deciduous species regenerated more successfully in lime forests: the rate of increase in mean NDVI values reached 249.2% on experimental plots and 225.9% on control plots. In green-moss and oxalis forest types, logged dried-up spruce plots regenerated more actively than areas previously occupied by healthy stands: in green-moss forests, the NDVI increase was 200.6% on experimental plots versus 57.9% on controls; in oxalis forests, the increase was 194.8% versus 26.8%, respectively. According to the authors, this pattern can be explained by lower initial NDVI values in the time series for regenerating logged dried-up spruce forests, as well as by more favorable growing conditions associated with increased soil nutrient availability due to the decomposition of fallen spruce needles resulting from stand drying.

Keywords: *Dried-Up Spruce Forests, Remote Sensing, Landsat imagery, NDVI, Early-stage forest regeneration, Forest Regeneration, Linear Trend, Spruce Forests, spectral brightness coefficients (SBC) in the red band*

Funding: the research was funded by a Russian Science Foundation grant № 24-76-10057, <https://rscf.ru/project/24-76-10057/>

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Ivanchina L. A., Makurin D. V., Savostin E. S., Demenev A. D., Maksimovich N. G. (2026) Assessment of Natural Regeneration Rates in Logged Dried-Up Spruce Forests Using Remote Sensing Data. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 50–64 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/4>.

Received 16.03.2026.

Revised 30.04.2026.

Accepted 15.05.2026.

Published online 26.06.2026

Введение

В последние десятилетия как в нашей стране, так и за ее пределами наблюдается массовое усыхание еловых лесов [1, 2, 3]. Единого мнения о причинах этого явления среди ученых не существует [4, 5]. При этом следует отметить, что процесс массового усыхания еловых лесов неразрывно связан с размножением и развитием стволового вредителя – короеда-типографа (*Ips typographus* Linnaeus) [6]. В целях улучшения санитарного и лесопатологического состояния лесов, снижения ущерба от воздействия биотических и абиотических неблагоприятных факторов, борьбы с болезнями и вредителями леса лесным законодательством предусмотрено проведение санитарно-оздоровительных мероприятий, в частности санитарных рубок (Приказ Минприроды (МПР) РФ от 09.11.2020 г. № 912).

В связи с непрекращающимся воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды становится актуальным вопрос восстановления вырубленных в результате усыхания лесных территорий. В научной литературе имеются работы, посвященные изучению возобновления указанных рубок полевыми методами [7], что является трудоемким процессом [8]. При необходимости обследования значительных площадей целесообразнее пользоваться дистанционными методами. Дистанционное зондирование

Материалы и методы

С целью изучения зарастания рубок после проведения санитарно-оздоровительных мероприятий, назначенных актами лесопатологического обследования, подобраны лесные выделы 26 рубок 2014 г. (табл. 1), расположенные в лесном районе хвойно-широколиственных (смешанных) лесов Пермского края. Район занимает южную часть региона и характеризуется наибольшей интенсивностью нарушений. Участки расположены в условиях самых распространенных в исследуемом лесном районе типов леса: ельник зеленомошный, ельник кисличный и ельник липовый. В пределах рассмотренной территории (Чайковский, Еловский, Чагинский, Осинский, Большесосновский, Оханский и Березовский муниципальные округа) также подобраны «контрольные» участки, в пределах которых усыхание деревьев ели не зафиксировано.

Оценка санитарного состояния елового древостоя выполнена в соответствии классификацией, представленной в Правилах санитарной безопасности в лесах (Постановление Правительства РФ от 09.12.2020 г. № 2047).

Сведения о количестве подроста предварительной генерации приводятся в соответствии с материалами актов

предоставляет возможности для отслеживания изменений растительного покрова [9, 10, 11]. Для мониторинга состояния растительности наиболее широко используемым показателем является нормализованный разностный индекс растительности (NDVI) [12, 13, 14].

Индекс отражает количество фотосинтетически активной растительной биомассы и широко применяется для количественного анализа растительного покрова, включая процессы естественного зарастания ландшафтов [15]. При этом следует отметить, что NDVI более информативен для участков, на которых произрастают лиственные леса [15, 16]. Дешифровать произрастание еловых древостоев возможно по зимним снимкам с помощью значений яркости красного канала [17]. Указанное позволит установить, какими породами возобновляются рубки и произошла ли смена пород.

Научные работы по мониторингу зарастания рубок усохших ельников дистанционными методами практически не проводились, что свидетельствует о новизне исследования. В этом контексте целью исследования является оценка динамики естественного возобновления рубок усохших ельников, расположенных в зоне хвойно-широколиственных лесов Пермского края, с помощью данных дистанционного зондирования Земли.

лесопатологических обследований. При этом следует отметить, что в документах учтен подрост темной хвойной породы. Оценка достаточности подроста для естественного лесовосстановления путем мероприятий по сохранению подроста проведена согласно шкале, представленной в

действующих Правилах лесовосстановления (Приказ МПР РФ от 29.12.2021 г. № 1024).

Ниже приводится описание типов леса, послуживших объектами исследования (Основные положения организации и развития лесного хозяйства Пермской области. Т. 1. – Пермь, 2000):

Ельник зеленомошный (Е.з.м.). Почвы под насаждениями ельника зеленомошного глубокоподзолистые малогумусные суглинистые. В составе древостоев преобладают ель и пихта. Средний класс бонитета – III (II).

Ельник кисличный (Е.к.). Указанный тип леса формируется на неглубокоподзолистых среднегумусных суглинистых почвах. Распространенными породами, составляющими древостой, являются ель, пихта и береза. Средний класс бонитета – II (III).

Ельник липовый (Е.л.п.). Почвы ельника липового дерново-подзолистые среднегумусные суглинистые. В составе древостоев участвуют ель,

пихта, липа, береза. Средний класс бонитета – II (III).

В представленных выше описаниях приводятся наиболее часто встречающиеся средние значения классов бонитета в пределах Пермского края.

Преобладающая часть вырубок (24 выдела из 26) находится в условиях зеленомошного и кисличного типов леса, что объясняется значительной подверженностью насаждений указанных типов леса усыханию [5]. В то же время насаждения ельника липового представлены всего двумя участками, что, в свою очередь, объясняется

их повышенной устойчивостью [5]. По каждому исследуемому типу леса подобрано по одному фоновому участку. Рубки в пределах контрольных участков, количество которых составило 3 штуки, также проведены в 2014 году (табл. 2). Сведения о сплошных рубках спелых и перестойных насаждений, проведенных в 2014 году, получены из лесных деклараций. Большинство сплошных рубок в указанный период на исследуемой территории проведено в лиственных насаждениях, чем объясняется небольшое количество подобранных контрольных участков.

Таблица 1

Характеристика исследуемых вырубок усохших ельников

Table 1

Characteristics of the studied clear-cuts sites of dried-up spruce forests

Characteristics of the studied clear-cuts sites of dried-up spruce forests								
№ No.	Год начала усыхания Year of drying out	Площадь, га Area, ha	Доля участия ели в составе древостоев до рубки, % Proportion of spruce in the stand composition before logging, %	Оценка санитарного состояния елового древостоя Assessment of the sanitary condition of the spruce stand		Количество подроста под пологом древостоя до рубки, шт./га Number of understory regeneration beneath the forest canopy before logging, pcs/ha	Оценка достаточности подроста для естественного лесовосстановления путем мероприятий по сохранению подроста Assessment of the sufficiency of advance regeneration for natural forest regeneration through regeneration-preservation measures	
1	2	3	4	5		6	7	
Тип леса – Ельник кисличный The type of forest – Sorrel spruce forest								
1	2010	1,7	60	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
3	2010	3,6	40	Погибший	Dead	2000	Достаточно	Enough
5	2013	4,5	50	Погибший	Dead	2000	Достаточно	Enough
6	2011	1,8	50	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
8	2009	2,7	50	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
15	2013	8,4	50	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
16	2011	1,8	40	Усыхающий	Drying	2500	Достаточно	Enough
17	2013	1,8	40	Усыхающий	Drying	2500	Достаточно	Enough
18	2013	3,7	40	Усыхающий	Drying	2500	Достаточно	Enough
20	2013	7,9	70	Усыхающий	Drying	0	Отсутствует	Absent
21	2011	2,1	40	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
22	2009	5,9	50	Усыхающий	Drying	2000	Достаточно	Enough
Тип леса – Ельник липовый The type of forest – Linden spruce forest								
2	2013	8,5	70	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
14	2011	1,6	40	Усыхающий	Drying	2000	Достаточно	Enough
Тип леса – Ельник зеленомошный The type of forest – Green moss spruce forest								
4	2011	2,4	50	Усыхающий	Drying	2500	Достаточно	Enough
7	2010	1,9	50	Погибший	Dead	3500	Достаточно	Enough
9	2009	5,9	80	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
10	2009	10,9	50	Усыхающий	Drying	2500	Достаточно	Enough
1	2	3	4	5		6	7	
11	2010	3,9	40	Усыхающий	Drying	2000	Достаточно	Enough
12	2010	9,3	50	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
13	2011	8,5	60	Усыхающий	Drving	1500	Недостаточно	Not enough

19	2013	4,1	50	Погибший Dead	3000	Достаточно Enough
23	2011	2,4	60	Усыхающий Drying	3000	Достаточно Enough
24	2010	5,9	70	Сильно ослабленный Severely weakened	0	Отсутствует Absent
25	2009	9,6	55	Усыхающий Drying	4000	Достаточно Enough
26	2013	4,9	60	Усыхающий Drying	2000	Достаточно Enough

Источник: Данные актов лесопатологического обследования

Source: Data from the reports of forest pathology research

Таблица 2

Характеристика исследуемых контрольных вырубок

Table 2

Characteristics of the studied control clear-cuts sites

№ No.	Площадь, га Area, ha	Доля участия ели в составе древостоев до рубки, % Proportion of spruce in the stand composition before logging, %	Оценка санитарного состояния елового древостоя Assessment of the sanitary condition of the spruce stand	Количество подроста под пологом древостоя до рубки, шт./га Number of understory regeneration beneath the forest canopy before logging, pcs/ha	Оценка достаточности подроста для естественного лесовосстановления путем мероприятий по сохранению подроста Assessment of the sufficiency of advance regeneration for natural forest regeneration through regeneration-preservation measures
1	2	3	4	5	6
Тип леса – Ельник зеленомошный The type of forest – Green moss spruce forest					
1	2,7	70	Здоровый Healthy	1000	Недостаточно Not enough
Тип леса – Ельник липовый The type of forest – Linden spruce forest					
2	14,7	50	Здоровый Healthy	1000	Недостаточно Not enough
Тип леса – Ельник кисличный The type of forest – Sorrel spruce forest					
3	2,0	60	Здоровый Healthy	1000	Недостаточно Not enough

Источник: Данные актов лесопатологического обследования

Source: Data from the reports of forest pathology research

На территории объектов исследований искусственное лесовосстановление не осуществлялось, участки были оставлены под естественное зарастивание. Площадь пройденных сплошными санитарными рубками территорий варьирует от 1,6 до 10,9 га, а сплошными рубками спелых и перестойных лесных насаждений – от 2,0 до 14,7 га (что соответствует участкам от 17 до 119, от 22 до 161 пикселей снимка соответственно).

Для анализа многолетней динамики зарастания вырубок усохших ельников были использованы данные спутниковой съемки Landsat, полученные через открытый сервис Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) за период 2014–2025 гг. На основе спутниковых изображений были определены долгосрочные изменения общераспространенного нормализованного разностного индекса растительности NDVI [14]. Также в пределах вырубок рассчитаны средние значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в красном канале. В качестве минимально допустимого для анализа размера анализируемых объектов была принята площадь 1,5 га, что включает 17 пикселей Landsat. Для минимизации влияния

сезонных вариаций растительности, преимущественно рассматривались летние снимки в период со второй декады июня по первую декаду августа, что можно отнести к одной фазе вегетационного сезона – максимального развития фитомассы. Для отдельных лет (2017 и 2022 г.) из-за отсутствия спутниковых снимков, удовлетворяющих требованиям по облачности и покрытию, в виде исключения использовались данные второй декады августа. Данный интервал относится к вегетационному сезону и предшествует фазе активного осеннего снижения NDVI. Самая ранняя используемая дата снимка вегетационного сезона – 14 июня, а самая поздняя – 31 августа. Показатель рассчитывали по данным уровня обработки Level-2, для которых атмосферная коррекция уже выполнена с применением алгоритмов LEDAPS и LaSRC (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Статистическая обработка данных выполнена в среде Python (с использованием библиотек Pandas и PyMannKendall). Расчет линейных трендов значений NDVI и КСЯ для каждой рубки и оценка их значимости проведены

с использованием теста Манна-Кендалла. В указанном тесте применяется показатель тау, который используется для определения тренда в данных. Значение тау может меняться от -1 до 1, что указывает на отрицательную или положительную монотонность соответственно. По каждому тренду рассчитаны значения наклонов (slope), которые выражаются в следующих единицах: NDVI/год или КСЯ/год в зависимости от анализируемого показателя. Статистическое значимое различие между выборками значений NDVI пикселей оценивалось с помощью U-критерия Манна – Уитни. Предварительно выборки были проверены на наличие/отсутствие нормальности распределения с помощью теста Шапиро – Уилка. С целью статистической оценки динамики изменений средних значений NDVI на вырубках выполнен расчет ежегодных базисных темпов прироста относительно года рубки (2014 года). Для экспериментальных участков рассчитаны средние значения темпов прироста по типам леса.

Результаты

Большинство еловых насаждений начало усыхать в период 2010-2013 годов, что, по мнению авторов, объясняется аномальной жарой 2010 года [18]. У большинства участков, начавших усыхать в 2010-2011 годах (12 лесных выделов из 14), значения КСЯ в красном канале с течением времени увеличивались в среднем на 23,6%, что свидетельствует о том, что процесс усыхания активно развивался до рубки. У лесных насаждений, усыхание которых начало происходить в 2009 году, в 2010 году значение КСЯ уменьшилось, а в последующие годы снова стало возрастать, что свидетельствует о том, что процесс усыхания через год продолжился в связи с аномальной жарой 2010 года.

До санитарной рубки на территории исследуемых выделов произрастали смешанные по породному составу леса. В составе насаждений

произрастали еловые древостои, подвергшиеся гибели в результате воздействия короеда-типографа. Доля участия ели в составе насаждения варьировала от 40 до 80%. Санитарное состояние еловых древостоев до вырубki варьировало от сильно ослабленных до погибших, при этом преобладали усыхающие еловые древостои. Среди представленной выборки участков, сильнее усыхали древостои, которые произрастали в условиях ельника кисличного. На контрольных участках до вырубki также произрастали преимущественно смешанные еловые насаждения с преобладанием елового древостоя. Доля участия ели в составе древостоев варьировала от 50 до 70%. Наибольшее количество подроста предварительной генерации произрастало на участках, расположенных в условиях ельника зеленомошного: 67% насаждений зеленомошного типа леса характеризовалось достаточным количеством подроста для успешного лесовосстановления после рубки.

Анализ временных рядов NDVI за период 2014–2025 г. с использованием непараметрического критерия Манна-Кендалла выявил преобладание положительных трендов при оценке динамики восстановления как вырубok усохших ельников, так и контрольных лесных участков, что свидетельствует о том, что вырубki зарастают преимущественно лиственными породами (табл. 3).

Статистически значимый возрастающий тренд NDVI ($p < 0,05$) на территории вырубok усохших ельников выявлен в 77% случаев. Для этих участков значения Тау изменялись в диапазоне 0,43–0,74, что указывает на умеренную и высокую согласованность положительного тренда. Значения наклона линейного тренда для статистически значимых участков варьируют в диапазоне 0,012–0,027, что отражает стабильное повышение фотосинтетической активности в течение исследуемого периода.

Таблица 3

Результаты анализа временных рядов индекса NDVI и КСЯ в красном канале для объектов исследования с использованием непараметрического критерия Манна-Кендалла (2014 – 2025 годы)

Table 3

Results of the time-series analysis of the NDVI and SBC in the red band for the study sites using the non-parametric Mann–Kendall test (2014–2025)

Показатель Indicator	NDVI		КСЯ в красном канале SBC in the red band	
	Значение (вырубki усохших ельников) The value (Dried-up spruce clear-cuts)	Значение (контроль) The value (Control)	Значение (вырубki усохших ельников) The value (Dried-up spruce clear-cuts)	Значение (контроль) The value (Control)
1	2	3	4	5
Количество участков Number of plots	26	3	26	3

Участки со значимым ростом NDVI и со значимым снижением КСЯ в красном канале ($p < 0,05$) Sites with a significant increase in NDVI and a significant decrease in SBC in the red band ($p < 0.05$)	20 (77%)	3 (100%)	10 (38%)	0
Участки без значимого тренда ($p > 0,05$) Sites with no significant trend ($p > 0.05$)	6 (23%)	-	16 (62%)	3 (100%)
Диапазон значений Тау* Range of Tau values	0,43 – 0,74	0,47 – 0,58	-0,64 – (-0,93)	-
Средние значения Тау* Average Tau values	0,51	0,53	-0,72	-
Диапазон значений наклона тренда, NDVI/год и КСЯ/год* Range of trend slope values, NDVI/year and SBC/year	0,012 – 0,027	0,007 – 0,022	-0,036 – (-0,070)	-
Максимальные значения Тау и наклона тренда Maximum values of Tau and trend slope**	№№ 9, 19	№ 2	№№ 2, 20, 23	-
Отсутствие статистически значимого тренда No statistically significant trend**	№№ 3, 5, 7, 23, 25, 26	-	№№ 1, 4, 5, 7-9, 11, 12, 15-19, 21, 24, 26	№№ 1, 2, 3
Общая направленность изменений General trend direction	Преимущественно возрастающая Predominantly increasing	Преимущественно возрастающая Predominantly increasing	Преимущественно убывающая Predominantly decreasing	-

Примечание: * для статистически значимых трендов; ** номера участков из таблиц 1, 2

Note: * for statistically significant trends; ** plot numbers from tables 1, 2

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Author's calculations

Наиболее высокие значения Тау зафиксированы на участках №№ 9, 19, что свидетельствует о наиболее устойчивом росте индекса NDVI и успешном возобновлении преимущественно лиственными породами. При этом указанные участки характеризуются разным количеством подроста темнохвойных пород предварительной генерации: не достаточным и достаточным количеством для успешного лесовосстановления.

Анализ временных рядов значений КСЯ в красном канале за исследуемый период выявил наличие статистически значимых ($p < 0,05$) убывающих трендов в 38% случаев. Указанное свидетельствует, что в составе молодого поколения на территории 10 вырубок произрастает ель. Для данных участков характерны умеренная согласованность отрицательного тренда (значения Тау варьируют от -0,64 до -0,93) и медленный рост молодых деревьев ели (значения наклона линейного тренда изменяются от -0,036 до -0,070).

Для 7 участков (27%) выявлено наличие обоих статистически значимых трендов, что, по мнению авторов, указывает на смешанный состав

произрастающего на вырубках молодняка: имеются как темнохвойные, так и лиственные породы. У 3 вырубок усохших ельников (12%) выявлен только статистически значимый убывающий тренд значений КСЯ, соответственно, на их территории в составе молодого поколения господствует ель. При этом следует отметить, что все три участка характеризуются достаточным количеством темнохвойного подроста предварительной генерации.

Отсутствие статистически значимого тренда NDVI ($p > 0,05$) выявлено в 23% случаев. Эти участки характеризуются относительно низкими значениями Тау (0,30-0,45) и малыми величинами наклона тренда, что указывает на стабильность значений индекса NDVI в течение исследуемого периода. Для 16 участков установлено отсутствие статистически значимого тренда КСЯ в красном канале ($p > 0,05$), что обозначает отсутствие или незначительную долю участия деревьев ели в составе растущего леса.

Отсутствие статистически значимого тренда по обоим показателям выявлено у 3 вырубок усохших ельников. Постоянство значений NDVI и

КСЯ в красном канале свидетельствует о том, что указанные вырубки после удаления погибшей древесной растительности не восстанавливаются ни темнохвойными, ни лиственными породами деревьев. Однако, для всех исследуемых вырубок усохших ельников зафиксирован рост индекса NDVI при сравнении абсолютных начальных значений рядов в 2014 и конечных значений в 2025 годах, что указывает на развитие травяного покрова после рубки. При этом следует отметить, что на территории данных участков до рубки произрастал подрост в достаточном для успешного возобновления количестве.

Для всех вырубок спелых и перестойных лесных насаждений (фоновые участки) также выявлен статистически значимый возрастающий тренд NDVI. Для них значения Tau составляют 0,47-0,58, а наклон тренда изменяется в диапазоне 0,007-0,022, что указывает на умеренное (у вырубок, расположенных в условиях зеленомошного и кисличного типов леса) и стабильное (у вырубки, расположенной в условиях липового типа леса) усиление фотосинтетической активности. У всех контрольных участков статистически значимый тренд значений КСЯ не выявлен, что объясняется

отсутствием или незначительным количеством молодых деревьев ели.

Анализ значений NDVI по типам леса среди вырубок усохших ельников свидетельствует, что более успешно лиственными породами восстанавливаются вырубки, расположенные в условиях липового типа леса: среднее значение NDVI указанного типа леса выше, чем аналогичные значения у вырубок, расположенных в условиях остальных типов леса (табл. 4). Также в условиях липового типа леса наиболее высокие значения наклона тренда, что свидетельствует об устойчивом увеличении фотосинтетической активности в течение исследуемого периода. По мнению авторов, указанное объясняется более благоприятными условиями произрастания.

Среди контрольных вырубок получились аналогичные результаты: самое высокое среднее значение NDVI и самое высокое значение наклона тренда у участка, также расположенного в условиях ельника липового. Таким образом, наиболее успешно лиственными породами зарастают вырубки, расположенные в условиях ельника липового: как вырубки усохших ельников, так и вырубки спелых и перестойных лесных насаждений.

Таблица 4

Средние значения NDVI, Tau и наклона тренда в условиях разных типов леса

Table 4

Mean NDVI values, Tau , and trend slope under different forest types

Тип леса The type of forest	Средние значения Average values		
	NDVI за 2025 год NDVI for 2025	Tau Tau	Наклон тренда Trend slope
Вырубки усохших ельников Dried-up spruce clear-cuts			
Е.зм. Green moss spruce forest	0,438±0,0063	0,538±0,0366	0,018±0,0010
Е.к. Sorrel spruce forest	0,427±0,0065	0,482±0,0092	0,017±0,0012
Е.лп. Linden spruce forest	0,462±0,0028	0,500±0,0128	0,025±0,0025
Контрольные вырубки Control clear-cuts			
Е.зм. Green moss spruce forest	0,399	0,583	0,008
Е.к. Sorrel spruce forest	0,414	0,466	0,007
Е.лп. Linden spruce forest	0,461	0,527	0,022

Примечание: ± - стандартная ошибка

Note: ± - standard error

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Author's calculations

Распределение значений КСЯ в красном канале по типам леса демонстрирует более успешное лесовосстановление елью в условиях зеленомошного типа леса, а менее успешное – в условиях липового (табл. 5). Кроме того, значение

Tau в насаждениях ельника зеленомошного указывает на более усиленный рост молодого поколения деревьев ели по сравнению с насаждениями других типов леса.

Таблица 5

Средние значения КСЯ в красном канале, Тау и наклона тренда в условиях разных типов леса

Table 5

Тип леса The type of forest	Средние значения Average values		
	КСЯ в красном канале за 2025 год SBC in the red band for 2025	Тау Tau	Наклон тренда Trend slope
Вырубки усохших ельников Dried-up spruce clear-cuts			
Е.зм. Green moss spruce forest	0,2741±0,0682	-0,696±0,0342	-0,052±0,0049
Е.к. Sorrel spruce forest	0,3253±0,0524	-0,750±0,0684	-0,048±0,0059
Е.лп. Linden spruce forest	0,4388±0,0721	-0,714±0,00	-0,063±0,0074

Примечание: ± - стандартная ошибка

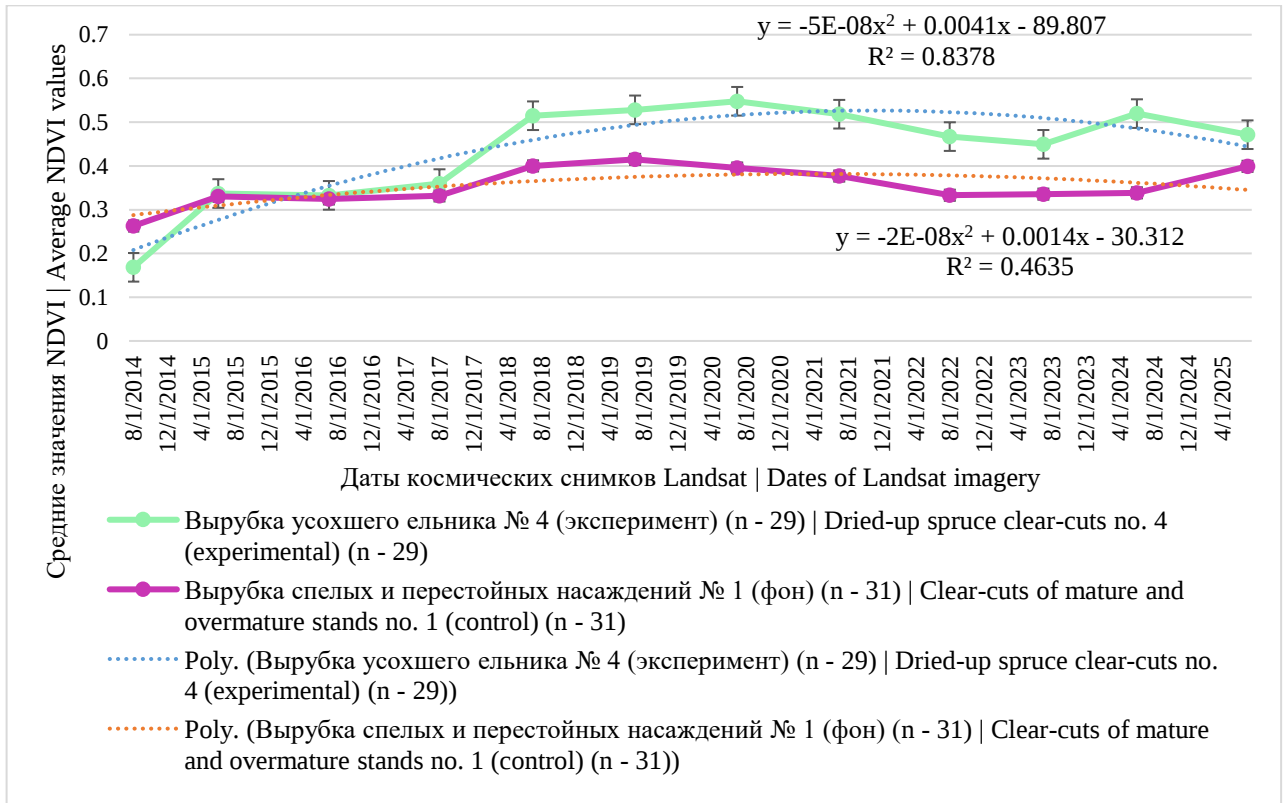
Note: ± - standard error

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Author's calculations

В связи с тем, что по фоновым участкам не выявлено статистически значимых трендов КСЯ в красном канале, динамика значений представлена только по NDVI. Сравнение изменений средних значений NDVI по годам в пределах экспериментального и фонового участков

представлено на примере насаждений ельника зеленомошного (рис. 1). U-тест Манна – Уитни зафиксировал наличие статистически значимых различий между двумя выборками за каждый год при $p \leq 0.05$.



Примечание: Планками отмечена стандартная погрешность

Note: The bars indicate the standard error

Рисунок 1. Динамика средних значений NDVI в период с 2014 по 2025 годы на примере вырубки усохших ельников № 4 (эксперимент) и вырубки спелых и перестойных насаждений (фон), расположенных в условиях ельника зеленомошного

Figure 1. Dynamics of mean NDVI values from 2014 to 2025 for dried-up spruce clear-cut №4 (experimental) and a clear-cut of mature and overmature stands (control) in green-moss spruce forest conditions

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Материалы рисунка 1 свидетельствуют, что вырубка усохших ельников восстанавливается активнее, в то время как вырубка спелых и перестойных насаждений – более умеренно. Кроме того, в промежутках между 2014 и 2015 годами, между 2017 и 2018 годами вырубка усохших ельников характеризуется высокой интенсивностью прироста средних значений NDVI: в 2015 году значение индекса увеличилось на 100,2% относительно 2014 года, а в 2018 – на 43,1% по сравнению с 2017 годом. В эти годы биомасса растений в период вегетации значительно увеличилась. Модели возобновления леса на указанных вырубках описываются полиномиальными функциями, при этом сильная объяснительная способность модели характерна для экспериментальной вырубки ($R^2 = 0,8378$), а для фоновой – умеренная объяснительная способность ($R^2 = 0,4635$).

Графики темпов прироста свидетельствуют (рис. 2), что в большинстве случаев минимальный

темп прироста средних значений NDVI наблюдается в год, следующий за годом рубки: в данном случае в 2015 году. Темпы прироста средних значений NDVI у вырубок усохших ельников, расположенных в условиях зеленомошного типа леса, выше на 61,6-150,2%, чем у вырубок спелых и перестойных насаждений, расположенных в аналогичных условиях. Подобная ситуация наблюдается и в условиях кисличного типа леса: у вырубок усохших ельников темпы прироста выше на 83,2-194,8% по сравнению с контролем. Указанное свидетельствует, что в условиях зеленомошного и кисличного типов леса вырубки усохших ельников зарастают более интенсивно, чем вырубки спелых и перестойных насаждений. Указанный вывод подтверждает также U-тест Манна – Уитни: при $p \leq 0.05$ различия между экспериментальными и контрольными группами в указанных типах леса статистически значимы.

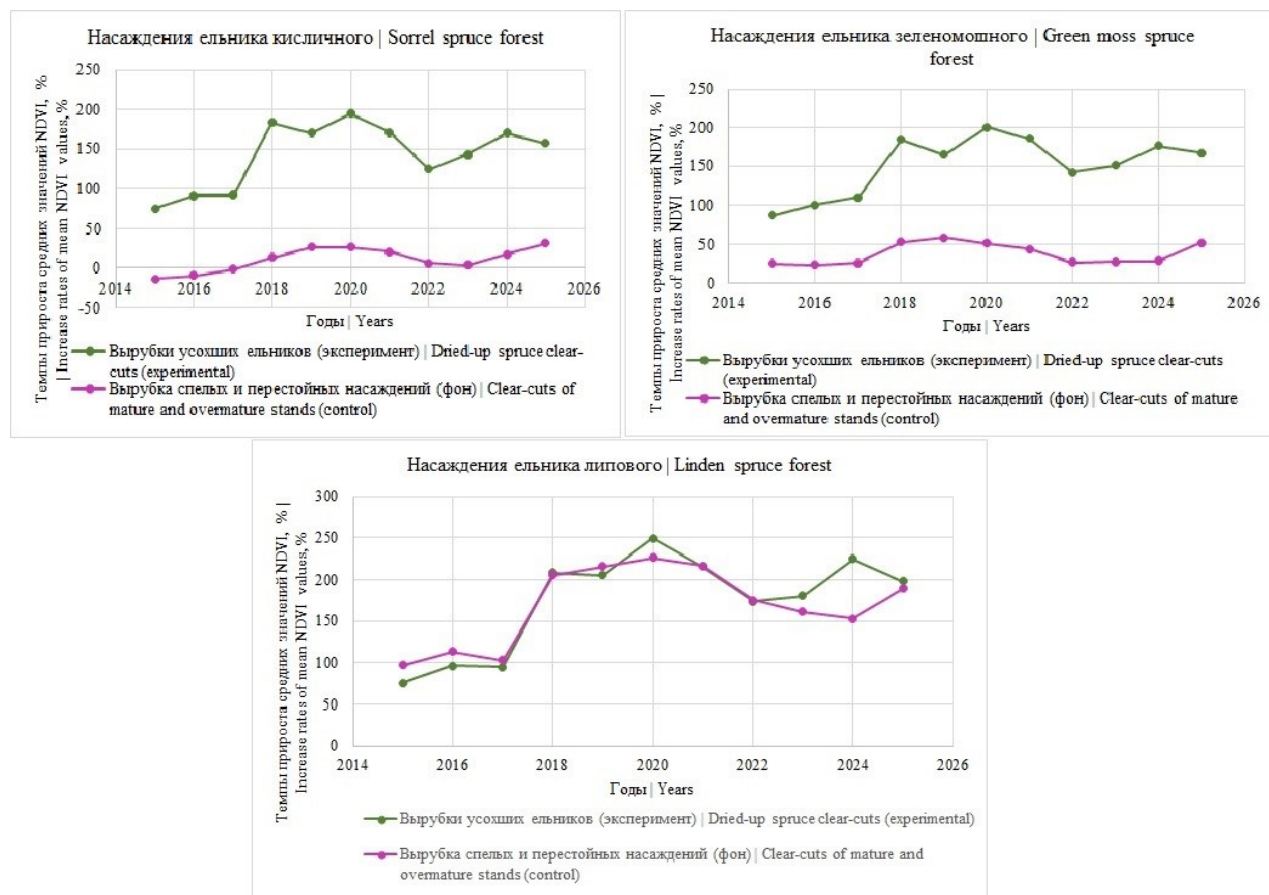


Рисунок 2. Интенсивность прироста средних значений NDVI относительно года рубки у вырубок разных типов леса

Figure 2. Rate of increase in mean NDVI values relative to the year of logging for clear-cuts in different forest types

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

В условиях липового типа леса темпы прироста между видами вырубок значительно не отличаются: экспериментальные и фоновые участки восстанавливаются интенсивно, что подтверждается U-тестом Манна – Уитни при $p \leq 0.05$: статистически значимое различие между выборками не установлено. Темпы прироста у вырубок усохших ельников варьируют от 75,3 до 249,2%, а у вырубок спелых и перестойных насаждений – от 97,2 до 225,9%.

Для того, чтобы установить, имеется ли взаимосвязь между количеством подроста темнохвойных пород до рубки и количеством молодняка ели на вырубках усохших ельников, был проведен корреляционный анализ между количеством подроста темнохвойных пород предварительной генерации и значениями КСЯ в

Обсуждение

Результаты исследований свидетельствуют, что в условиях зеленомошного и кисличного типов леса вырубки, в пределах которых произрастали усыхающие еловые древостои, лиственными породами восстанавливаются быстрее, чем вырубки, на которых произрастали здоровые ельники. По мнению авторов, указанное объясняется относительно низкими изначальными значениями вегетационного индекса по сравнению с конечными данными временного ряда и более благоприятными условиями произрастания на вырубках усохших ельников. В результате гибели деревьев разлагается опавшая еловая хвоя, и как следствие накапливаются дополнительные источники питательных веществ, таких, как калий и фосфор [19].

Ни на одном из фоновых участков не выявлено статистически значимого снижения индекса NDVI, что подтверждает стабильное и здоровое состояние растительного покрова на протяжении всего исследуемого периода, а также возобновление лиственными породами.

Отсутствие лесовозобновления на 3 вырубках, на которых отсутствует статистически значимый тренд по обоим показателям, а также слабая связь между количеством темнохвойного подроста до рубки и участием ели в составе лесовосстановления после рубки, по мнению авторов, могут быть вызваны антропогенными факторами: несоблюдение условий рубки. В частности, в процессе рубки были повреждены молодые растения, нарушен напочвенный покров, уплотнена почва. Насаждения на указанных участках до вырубки обладали разными таксационными характеристиками, что свидетельствует о том, что количественные и

Результаты данного исследования могут быть использованы при оценке лесовозобновления дистанционными методами.

красном канале по снимкам 2025 года, являющихся наиболее информативными при дешифрировании произрастания ели. Анализ проведен по данным всех вырубок без учета влияния отдельных факторов.

Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о слабой отрицательной связи (коэффициент корреляции между выборками составляет $-0,1842$) между исследуемыми показателями: чем больше количество подроста темнохвойных пород предварительной генерации, тем меньше значения КСЯ в красном канале. Чем ниже значения КСЯ в красном канале, тем больше биомасса деревьев ели. Соответственно, участие в составе лесовозобновления молодняка ели на вырубках усохших ельников слабо зависит от количества подроста темнохвойных пород до рубки. качественные характеристики усохших еловых древостоев до рубки не оказывают влияния на последующее лесовосстановление.

Согласно результатам исследований, господство деревьев ели в составе молодого поколения на вырубках усохших ельников зафиксировано в 38% случаев, а на контрольных – не отмечено. Таким образом, в большинстве случаев в Пермском крае происходит смена пород с более ценных темнохвойных на менее ценные лиственные.

Высокие значения базисных темпов прироста NDVI относительно 2014 года, достигающие 249,2%, объясняются тем, что лиственные породы, о произрастании которых свидетельствуют значения NDVI, в частности, светолюбивые породы береза и осина, которые появляются первыми на вырубках, являются быстрорастущими породами, способными ежегодно увеличиваться на 2 метра в высоту [20, 21]. За счет роста лиственных пород быстро увеличивается биомасса.

Исследованиями других авторов подтверждается частая смена пород на менее ценные мягколиственные леса при способности темнохвойных лесов к естественному самовосстановлению после крупных нарушений [7]. Например, на территории Центрально-Лесного заповедника, находящегося в Тверской области, после распада ельников смена пород происходит в 74% случаев [22]. Зафиксировано также формирование редколесий, состоящих из деревьев пихты. При этом М.Ю. Пукинская [7] отмечает, что в связи с большими масштабами усыхания возможен недостаток семян усыхающей породы, в связи с чем актуально сохранять хвойный подрост предварительной генерации.

Авторами планируется в дальнейшем отслеживать динамику увеличения растительной биомассы с течением времени на указанных в данном исследовании участках.

Заключение

Таким образом, вырубки усохших ельников преимущественно восстанавливаются лиственными породами: в 77% случаев выявлен положительный статистически значимый возрастающий линейный тренд NDVI ($p < 0,05$). Произрастание на вырубках в составе молодого поколения деревьев ели зафиксировано в 38% случаев, что подтверждается статистически значимым убывающим трендом КСЯ в красном канале. При этом в 27% случаев выявлено наличие обоих статистически значимых трендов, что, указывает на смешанный состав произрастающего на вырубках молодняка древесных пород. Лесовосстановление с господством ели зафиксировано на территории только 12% вырубок усохших ельников. Половина указанных вырубок возобновляется лиственными породами, то есть в 50% случаев происходит смена пород.

Анализ значений NDVI по типам леса свидетельствует, что более успешно лиственными породами зарастают вырубки, расположенные в

условиях ельника липового: как вырубки усохших ельников, так и вырубки спелых и перестойных лесных насаждений. Распределение значений КСЯ в красном канале по типам леса демонстрирует более успешное лесовосстановление елью в условиях зеленомошного, а менее успешное – в условиях липового типов леса.

В условиях зеленомошного и кисличного типов леса для вырубок усохших ельников характерно стабильное повышение значений NDVI в течение исследуемого периода (2014-2025 годы). А для вырубок, на территории которых проведены сплошные рубки спелых и перестойных лесных насаждений, характерно умеренное усиление значений NDVI. Вырубки, на территории которых произрастали здоровые древостои, восстанавливаются медленнее. По мнению авторов, данная закономерность может быть объяснена относительно низкими исходными значениями NDVI во временном ряду для зарастающих вырубок усохших ельников, а также более благоприятными условиями произрастания, связанными с повышением доступности питательных веществ в почве за счет разложения опавшей еловой хвои после усыхания древостоя.

Список литературы

1. Агафонова Т.Н., Итешина Н.М., Залесов С.В. Состояние еловых насаждений в Удмуртской Республике при меняющемся климате // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 2 (82). – С. 36-42. – DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.67>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82539202>.
2. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Тишков А.С. Ель европейская как лесообразователь на Смоленско-Московской возвышенности // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2024. – Т. 28. – № 1. – С. 5–13. – DOI: 10.18698/2542-1468-2024-1-5-13. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=63776263>.
3. Hlásny T., König L., Krokene P., Lindner M., Montagné-Huck C., Müller J., Qin H., Raffa K.F., Schelhaas M.-J., Svoboda M., Viiri H., Seidl R. Bark beetle outbreaks in Europe: State of knowledge and ways forward for management. Current Forestry Reports. 2021; 7: 138–165. – DOI: 10.1007/s40725-021-00142-x.
4. Чебакова Н.М., Бажина Е.В., Парфенова Е.И., Сенашова В.А. В поисках фактора “икс”: обзор публикаций по проблеме усыхания темнохвойных лесов Северной Евразии // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 5. – С. 123-140. – DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-123-140. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49308019&ysclid=mmojsa8sdc199641569>.
5. Ivanchina L., Kovalev V., Makurin D., Poplyakov E., Solontsov O., Korotaeva N. The influence of the type of forest and the type of forest growing conditions on the stability of spruce stands in the zone of coniferous-deciduous forests of the Perm Krai. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2023; 15(4): 92-111. DOI: <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-92-111>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=57709453>.
6. Nardi D., Jactel H., Pagot E., Samalens J.-C., Marini L. Drought and stand susceptibility to attacks by the European spruce bark beetle: A remote sensing approach. Agricultural and Forest Entomology. 2023; 25(1): 119-129. DOI: 10.1111/afe.12536.
7. Пукинская М.Ю. Реконструкция динамики темнохвойных лесов Тебердинского заповедника и перспективы их естественного восстановления после массового усыхания // Поволжский экологический журнал. – 2022. – № 4. – С. 431–451. DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-4-431-451>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49948485&ysclid=mmokvr7oto15650276>.
8. Isoaho A., Elo M., Marttila H., Rana P., Lensu A., Räsänen A. Monitoring changes in boreal peatland vegetation after restoration with optical satellite imagery. The Science of the total environment. 2024; 957: 177697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177697>.
9. Mashala M.J., Dube T., Mudereri B.T., Ayisi K.K., Ramudzuli M.R. A Systematic Review on Advancements in Remote Sensing for Assessing and Monitoring Land Use and Land Cover Changes Impacts on Surface Water Resources in Semi-Arid Tropical Environments. Remote Sensing. 2023; 15(16): 3926. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15163926>.

10. Подрядчикова Е.Д., Мартынова Н.Г., Кустышева И.Н., Раева И.В. Мониторинг растительного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2025. – Т. 68. – № 4 (406). – С. 420-423. – DOI: 10.55186/25876740_2025_68_4_420. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82885663>.

11. Ikkala L., Ismail I., Wolff F., Marttila H., Ronkanen A.-K., Alekseychik P., Rana P., Kohv M., Tahvanainen T., Tolvanen A., Haghighi A.T., Kumpula T., Osborne C., Ilmonen J., Haapalehto T., Kløve B., Räsänen A. Remote sensing applications for monitoring restoration outcomes in boreal forestry-drained peatlands - Reviewed applications and future potential. *Remote Sensing of Environment*. 2026; 333: 115093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115093>.

12. Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J. For. Res.* 2021; 32: 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.

13. Pei F., Zhou Y., Xia Y. Application of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the Detection of Extreme Precipitation Change. *Forests*. 2021; 12(5): 594. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12050594>.

14. Asam S., Eisfelder C., Hirner A., Reiners P., Holzwarth S., Bachmann M. AVHRR NDVI Compositing Method Comparison and Generation of Multi-Decadal Time Series—A TIMELINE Thematic Processor. *Remote Sens.* 2023; 15(6): 1631. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15061631>.

15. Балдина Е.А., Илюшина П.Г., Васильев П.К. Оценка космических снимков разного спектрального разрешения для анализа состояния растительного покрова // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2025. – Т. 31. – Ч. 2. – С. 5–20. – DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-5-20. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=88577486>.

16. Drechsel J., Forkel M. Remote sensing forest health assessment – a comprehensive literature review on a European level. *Central European Forestry Journal*. 2025; 71(1): 14-39. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2024-0022>.

17. Pivovar M., Näsi R., Honkavaara E., Blaženec M., Skvarenina J., Modlinger R., Rožnovský J., Jakuš R. Spectral signatures discrimination of Norway spruce trees under experimentally induced drought and acute thermal stress using hyperspectral imaging. *Forest Ecology and Management*. 2025; 586: 122692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122692>.

18. Попова В.В., Бокучава Д.Д., Матвеева Т.А. Экстремальная засуха на восточно-европейской равнине в период потепления середины XX столетия: климатические характеристики и аналоги в условиях современного климата // Аридные экосистемы. – 2023. – Т. 29. – № 2 (95). – С. 3-11. – DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-3-11. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54312207>.

19. Иванова Е.А., Данилова М.А., Смирнов В.Э., Ершов В.В. Сравнительная оценка скорости разложения растительного опада в еловых и сосновых лесах на северном пределе распространения // Вопросы лесной науки. – 2023. – Т. 6. – № 3. – Статья № 132. – DOI: 10.31509/2658-607x-202363-132. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67224208>.

20. Багаев Е.С., Чудецкий А.И., Макаров С.С. Оценка возможности использования быстрорастущих форм осины для закладки лесосырьевых плантаций с коротким оборотом рубки // Лесохозяйственная информация. – 2023. – № 1. – С. 55–67. – DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.05. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50372387>.

21. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Часовских В.П. Сравнительный мета-анализ аллометрических моделей биомассы быстрорастущих лиственных пород // Биосфера. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 7-20. – DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v15i1.789>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53211437&ysclid=mnaly8c9lk71965818>.

22. Pukinskaya M.Yu. *Tree Species Change in Nemoral Spruce Forests of the Central Forest Reserve*. Biology Bulletin. 2021; 48(10): 1912-1923. DOI: 10.1134/S1062359021100216.

References

1. Agafonova T.N., Iteshina N.M., Zalesov S.V. *Sostoyanie elovyh nasazhdenij v Udmurtskoj Respublike pri menyayushchemsya climate* [State of spruce stands in the Udmurt Republic under the changing climate]. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2025; 2(82): 36-42. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_2_36-42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82539202>.

2. Merzlenko M.D., Melnik P.G., Tishkov A.S. *El' evropeyskaya kak lesoobrazovatel' na Smolensko-Moskovskoy vozvyshennosti* [Forest forming species of European spruce in Smolensk-Moscow uplands]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin = Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*. 2024; 28(1): 5–13. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2024-1-5-13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=63776263>.

3. Hlásny T., König L., Krokene P., Lindner M., Montagné-Huck C., Müller J., Qin H., Raffa K.F., Schelhaas M.-J., Svoboda M., Viiri H., Seidl R. *Bark beetle outbreaks in Europe: State of knowledge and ways forward for management*. *Current Forestry Reports*. 2021; 7: 138–165. DOI: 10.1007/s40725-021-00142-x.

4. Chebakova N.M., Bazhina E.V., Parfenova E.I., Senashova V.A. *V poiskah faktora "iks": obzor publikacij po probleme usyhaniya temnohvojnyh lesov Severnoj Evrazii* [In search of an x factor: a review of publications on the issue of dark-needled forest decline/dieback in Northern Eurasia]. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2022; 5: 123-140. (In Russ.). DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-123-140. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49308019&ysclid=mmojpa8sdc199641569>.
5. Ivanchina L., Kovalev V., Makurin D., Poplyakov E., Solontsov O., Korotaeva N. *The influence of the type of forest and the type of forest growing conditions on the stability of spruce stands in the zone of coniferous-deciduous forests of the Perm Krai*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023; 15(4): 92-111. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-92-111>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=57709453>.
6. Nardi D., Jactel H., Pagot E., Samalens J.-C., Marini L. *Drought and stand susceptibility to attacks by the European spruce bark beetle: A remote sensing approach*. *Agricultural and Forest Entomology*. 2023; 25(1): 119-129. DOI: 10.1111/afe.12536.
7. Pukinskaya M.YU. *Rekonstrukciya dinamiki temnohvojnyh lesov Teberdinskogo zapovednika i perspektivy ih estestvennogo vosstanovleniya posle massovogo usyhaniya* [Reconstruction of the dynamics of the dark coniferous forests of the Teberdinsky Nature Reserve and prospects for their natural recovery after mass drying out]. *Povolzhskij ehkologicheskij zhurnal = Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2022; 4: 431-451. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-4-431-451>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49948485&ysclid=mmokvr7oto15650276>.
8. Isoaho A., Elo M., Marttila H., Rana P., Lensu A., Räsänen A. *Monitoring changes in boreal peatland vegetation after restoration with optical satellite imagery*. *The Science of the total environment*. 2024; 957: 177697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177697>.
9. Mashala M.J., Dube T., Mudereri B.T., Ayisi K.K., Ramudzuli M.R. *A Systematic Review on Advancements in Remote Sensing for Assessing and Monitoring Land Use and Land Cover Changes Impacts on Surface Water Resources in Semi-Arid Tropical Environments*. *Remote Sensing*. 2023; 15(16): 3926. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15163926>.
10. Podryadchikova E.D., Martynova N.G., Kustysheva I.N., Raeva I.V. *Monitoring rastitel'nogo pokrova na osnove dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli* [Vegetation cover monitoring based on earth remote sensing data]. *Mezhdunarodnyj sel'skohozyajstvennyj zhurnal = International agricultural journal*. 2025; 4 (406): 420-423. (In Russ.). DOI: 10.55186/25876740_2025_68_4_420. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82885663>.
11. Ikkala L., Ismail I., Wolff F., Marttila H., Ronkanen A.-K., Alekseychik P., Rana P., Kohv M., Tahvanainen T., Tolvanen A., Haghighi A.T., Kumpula T., Osborne C., Ilmonen J., Haapalehto T., Kløve B., Räsänen A. *Remote sensing applications for monitoring restoration outcomes in boreal forestry-drained peatlands - Reviewed applications and future potential*. *Remote Sensing of Environment*. 2026; 333: 115093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115093>.
12. Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G. *A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing*. *Journal of Forestry Research*. 2021; 32: 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.
13. Pei F., Zhou Y., Xia Y. *Application of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the Detection of Extreme Precipitation Change*. *Forests*. 2021; 12(5): 594. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12050594>.
14. Asam S., Eisfelder C., Hirner A., Reiners P., Holzwarth S., Bachmann M. *AVHRR NDVI Compositing Method Comparison and Generation of Multi-Decadal Time Series—A TIMELINE Thematic Processor*. *Remote Sens.* 2023; 15(6): 1631. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15061631>.
15. Baldina E.A., Ilyushina P.G., Vasiliev P.K. *Ocenka kosmicheskikh snimkov raznogo spektral'nogo razresheniya dlya analiza sostoyaniya rastitel'nogo pokrova* [Evaluation of satellite images with different spectral resolution for analyzing the vegetation cover condition]. *Interkarto. InterGIS = InterCarto. InterGIS*. 2025; 31: 5-20. (In Russ.). DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-5-20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=88577486>.
16. Drechsel J., Forkel M. *Remote sensing forest health assessment – a comprehensive literature review on a European level*. *Central European Forestry Journal*. 2025; 71(1): 14-39. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2024-0022>.
17. Pivovar M., Näsi R., Honkavaara E., Blaženec M., Skvarenina J., Modlinger R., Rožnovský J., Jakuš R. *Spectral signatures discrimination of Norway spruce trees under experimentally induced drought and acute thermal stress using hyperspectral imaging*. *Forest Ecology and Management*. 2025; 586: 122692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122692>.
18. Popova V.V., Bokuchava D.D., Matveeva T.A. *Ehkstremal'naya zasuha na vostochno-evropejskoj ravnine v period potepleniya serediny HH stoletiya: klimaticheskie harakteristiki i analogi v usloviyah sovremennogo klimata* [Extreme drought on the East European plain during the heat wave in the middle of the 20th century: climatic characteristics and analogues in the modern climate conditions]. *Aridnye ehkosistemy = Arid Ecosystems*. 2022; 2(95): 3-11. (In Russ.). DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-3-11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54312207>.
19. Ivanova E.A., Danilova M.A., Smirnov V.E., Ershov V.V. *Sravnitel'naya ocenka skorosti razlozheniya rastitel'nogo opada v elovyh i sosnovyh lesah na severnom predele rasprostraneniya* [Comparative assessment of the

decomposition rate of plant litterfall in spruce and pine forests at the northern distribution limit]. *Voprosy lesnoj nauki = Forest science issues*. 2023; 6 (3): 132. (In Russ.). DOI: 10.31509/2658-607x-202363-132. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67224208>.

20. Bagaev E.S., Chudetsky A.I., Makarov S.S. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya bystrorastushchikh form osiny dlya zakladki lesosyr'evykh plantatsii s korotkim oborotom rubki* [Evaluation of the Possibility of the Use of Fast-growing Aspen Forms for Laying Timber Plantations with a Short Turnover of Felling]. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Forestry information*. 2023; 1: 55–67. (In Russ.). DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.05. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50372387>.

21. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Chasovskikh V.P. *Sravnitel'nyi meta-analiz allometricheskikh modelei biomassy bystrorastushchikh listvennykh porod* [Comparative meta-analysis of allometric models of fast-growing hardwood biomass]. *Biosfera = Biosfera*. 2023; 15 (1): 7–20. (In Russ.). DOI: 10.24855/biosfera.v15i1.789. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53211437&ysclid=mnaly8c9lk71965818>.

22. Pukinskaya M.Yu. *Tree Species Change in Nemoral Spruce Forests of the Central Forest Reserve*. *Biology Bulletin*. 2021; 48(10): 1912–1923. DOI: 10.1134/S1062359021100216.

Сведения об авторах

✉ **Иванчина Людмила Александровна** – кандидат с.-х. наук, зав. лабораторией Устойчивого лесопользования Естественного института, доцент кафедры биогеоценологии и охраны природы ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9476-8683>, e-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru.

Макурин Дмитрий Владиславович – инженер лаборатории Устойчивого лесопользования Естественного института ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1173-8946>, e-mail: 1-0-0@bk.ru.

Савостин Егор Сергеевич – лаборант лаборатории Устойчивого лесопользования Естественного института ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6981-184X>, e-mail: savostin.egor2014@yandex.ru.

Деменев Артем Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии техногенных процессов ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1086-178X>, e-mail: demenevartem@gmail.com.

Максимович Николай Георгиевич – кандидат геолого-минералогических наук, заслуженный эколог РФ, зав. лабораторией геологии техногенных процессов ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6220-2730>, e-mail: nmax54@gmail.com.

Information about the authors

✉ **Ludmila A. Ivanchina** – Cand. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory of sustained yield forest Management of Natural Science Institute, Associate Professor of Department of Biogeocoenology and environment Conservancy, Perm State University, Bukireva str., 15, Perm, Russian Federation, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9476-8683>, e-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru.

Dmitrii V. Makurin – Engineer of the Laboratory of sustained yield forest Management of Natural Science Institute, Perm State University, Bukireva str., 15, Perm, Russian Federation, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1173-8946>, e-mail: 1-0-0@bk.ru.

Egor S. Savostin – Laboratory assistant of the Laboratory of sustained yield forest Management of Natural Science Institute, Perm State University, Bukireva str., 15, Perm, Russian Federation, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6981-184X>, e-mail: savostin.egor2014@yandex.ru.

Artem D. Demenev – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Natural Science of Perm State University, Bukireva str., 15, Perm, Russian Federation, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1086-178X>, e-mail: demenevartem@gmail.com.

Nikolay G. Maksimovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Honored Ecologist of the Russian Federation, Head of the Research Laboratory, Institute of Natural Science of Perm State University, Bukireva str., 15, Perm, Russian Federation, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6220-2730>, e-mail: nmax54@gmail.com.

✉ Для контактов / Corresponding author