Научная статья
УДК 630*231(470.13-924.82)
DOI: 10.37482/0536-1036-2026-5-44-59

Особенности естественного возобновления на вырубках ельников черничных южной части Тиманского кряжа (Республика Коми)

И.Н. Кутявин*[1]✉*, д-р биол. наук; ResearcherID: P-9829-2015,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7840-1934
Р.А. Нечаев*[1, 2]*, лаборант-исследователь; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1237-8473
Ю.А. Дубровский*[1]*, канд. биол. наук; ResearcherID: P-9741-2015,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7219-054X
О.Н. Тюкавина*[3]*, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: H-2336-2019,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4024-6833
А.А. Дымов*[1]*, д-р биол. наук, доц.; ResearcherID: P-9571-2015,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1284-082X
[1]Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, ГСП-2, г. Сыктывкар, Россия; ivan.kutyawin@yandex.ru✉, roman11lxsn@mail.ru, dubrovsky@ib.komisc.ru, aadymov@gmail.com
[2]Сыктывкарский лесной институт – филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, г. Сыктывкар, Россия; roman11lxsn@mail.ru
[3]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; o.tukavina@narfu.ru

Поступила в редакцию 24.05.25 / Одобрена после рецензирования 19.08.25 / Принята к печати 22.08.25

Аннотация. Понимание естественных лесовосстановительных процессов на измененных человеком территориях является основой ведения хозяйства и прогноза формирования вторичных насаждений в современных условиях возрастающей антропогенной нагрузки и меняющегося климата. На вырубках разных лет установлены закономерности динамики лесовозобновительных процессов в условиях Южно-Тиманской горной гряды северо-востока европейской части России. Учет естественного возобновления на вырубках проводился на постоянных пробных площадях размером 50×50 м с закладкой на них учетных площадок радиусами 2 и 10 м^2. Под пологом ельников черничных и на вырубках первых лет в составе подроста преобладают ель сибирская и пихта сибирская общей густотой от 2,5 до 6,2 тыс. шт./га с небольшой примесью березы – до 1,1 тыс. шт./га. На 4-й год после рубки в возобновлении количество березового подроста увеличивается до 11 тыс. шт./га, через 8–11 лет численность вида достигает 46 тыс. шт./га. Возобновление ели последующей генерации протекает слабо и не носит массового характера. При сильной захламленности порубочными остатками технологических элементов вырубки возобновление отсутствует или протекает слабо, даже через 18 лет после рубки. Лучшее возобновление отмечается по краям и в межколейном пространстве волоков, где вследствие смешивания минерального и органогенного горизонтов с искусственно созданным дренажем при трелевке леса образуются наиболее благоприятные условия. На протяжении всего наблюдаемого периода (18 лет) отмечена высокая вариация высоты (<40 %) деревьев хвойного и лиственного подроста, что свидетельствует об активном заселении ими вырубок.

Ключевые слова: средняя тайга, ельники черничные, вырубки, естественное возобновление, подрост, Республика Коми

© Кутявин И.Н., Нечаев Р.А., Дубровский Ю.А., Тюкавина О.Н., Дымов А.А., 2026
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания по теме «Средообразующая роль и продуктивность лесных и болотных экосистем Европейского Северо-Востока России» №125020501547-8; «Почвы и почвенные ресурсы Европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов» № 125021902454-1.

Для цитирования: Кутявин И.Н., Нечаев Р.А., Дубровский Ю.А., Тюкавина О.Н., Дымов А.А. Особенности естественного возобновления на вырубках ельников черничных южной части Тиманского кряжа (Республика Коми) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 5. С. 44–59. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-5-44-59

Original article

Natural Reforestation Patterns at the Felling Sites of Blueberry Spruce Forests in the Southern Part of the Timan Ridge (Komi Republic)

Ivan N. Kutyavin[1]✉***,*** *Doctor of Biology;* ResearcherID: P-9829-2015,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7840-1934
Roman A. Nechaev[1,2]***,*** *Laboratory Research Assistant;*
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1237-8473
Yuriy A. Dubrovskiy[1]***,*** *Candidate of Biology;* ResearcherID: P-9741-2015,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7219-054X
Olga N. Tyukavina[3]***,*** *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;* ResearcherID: H-2336-2019,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4024-6833
Alexey A. Dymov[1]***,*** *Doctor of Biology, Assoc. Prof.;* ResearcherID: P-9571-2015,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1284-082X
[1]Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia; ivan.kutyawin@yandex.ru✉, roman11lxsn@mail.ru, dubrovsky@ib.komisc.ru, aadymov@gmail.com
[2]Syktyvkar Forest Institute – Branch of Saint Petersburg State Forest Technical University, Syktyvkar, Russia; roman11lxsn@mail.ru
[3]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; o.tukavina@narfu.ru

Received on May 24, 2025 / Approved after reviewing on August 19, 2025 / Accepted on August 22, 2025

Abstract. Understanding natural reforestation patterns in anthropogenically disturbed areas is crucial for forest management and predicting the development of secondary stands under current conditions of increasing human impact and climate change. The reforestation dynamics patterns have been found in the felling areas (different age) in the South Timan Ridge of the European Russia Northeast (Komi Republic). Natural reforestation at the felling areas was surveyed on permanent sample plots sized 50×50 m, with observation plots (2 and 10 m^2 radius) laid out there. Siberian spruce and Siberian fir (with an overall density ranging from 2,500 to 6,200 trees per hectare) and a small admixture of birch (up to 1,100 trees per hectare) predominate under the canopy of blueberry spruce stands and in first-year felling areas as part of the undergrowth. The number of young birch trees increases to 11,000 per hectare in the regeneration area by the fourth year after felling, and the population of this species reaches 46,000 trees per hectare after 8–

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

11 years. Regeneration of the spruce next generation is slow and insignificant. Regeneration does not occur or proceeds very slowly, even 18 years after the harvest when logging sites become contaminated with logging debris. The best regrowth occurs along the edges and in the spaces between the skid trails, where the mixing of mineral and organic horizons, combined with the artificial drainage created during timber skidding, results in the most favorable conditions. Throughout the entire observation period (18 years), high height variation (<40 %) was observed among coniferous and deciduous undergrowth, indicating that they are actively colonizing the felling areas.

Keywords: Middle taiga, blueberry spruce forests, felling sites, natural reforestation, undergrowth, Komi Republic

Funding: The work was carried out as part of the government-funded research projects No. 125020501547-8, entitled “The Environment-Shaping Role and Productivity of Forest and Wetland Ecosystems in the European Northeast of Russia”, and No. 125021902454-1, entitled “Soils and Soil Resources of Northeastern European Russia in Modern Climate Change Conditions, Anthropogenic Pressure, and Socioeconomic Challenges”.

For citation: Kutyavin I.N., Nechaev R.A., Dubrovskiy Yu.A., Tyukavina O.N., Dymov A.A. Natural Reforestation Patterns at the Felling Sites of Blueberry Spruce Forests in the Southern Part of the Timan Ridge (Komi Republic). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 5, pp. 44–59. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-5-44-59

Введение

Вопросы естественного возобновления на фоне растущей антропогенной нагрузки и изменения климата актуальны и представляют важную экологическую проблему [29, 31–34, 38]. В современных условиях большое воздействие на характер возобновления леса имеет применение машин и технологий лесозаготовки, которые, в свою очередь, влияют на почвы и напочвенный покров [6, 8, 23, 26, 36]. За последние десятилетия масса колесных лесозаготовительных машин по сравнению с массой советской гусеничной техники возросла в 2–3 раза, что привело к увеличению нагрузки на почвенную составляющую биогеоценоза. Их деструктивное влияние на грунты обусловливает необходимость разработки современных конструкций лесозаготовительных машин и технологий лесозаготовки [30, 37, 38]. После рубки экосистема претерпевает ряд серьезных изменений. Увеличение уровня солнечной радиации приводит к зарастанию вырубки злаковыми видами, что затрудняет естественное возобновление [5, 22]. Исследования вырубок европейского Севера России показали, что растительный покров на вырубках и других безлесных территориях находится в постоянной динамике, отличаясь «калейдоскопийным» или «мозаичным» характером размещения в пространстве и во времени [16, 17, 22]. На технологических участках (волоки) колейного пространства увеличивается переуплотненность и продавливаемость почв, изменяется их химический состав [6, 8, 27, 28]. Сильная захламленность лесосеки порубочными остатками снижает интенсивность лесовозобновительного процесса [7, 11, 12, 20, 22, 24]. Многолетние обследования вырубки в подзоне средней тайги Республики Коми показали, что в первые годы заселение древесной растительности идет сначала на участках с несильным продавливанием колей волока и достаточной минерализацией [11].

Искусственное лесовосстановление не всегда высокоэффективно, является трудоемким, требует больших финансовых вложений [4, 22]. Однако данный

способ совершенствуется с применением новых технологий создания лесных культур [9]. Естественное лесовозобновление наиболее подходит для бореальных лесов и выражается в жестком конкурентном отборе, что повышает устойчивость насаждений [22]. Оценка как предварительного, так и последующего возобновления леса на вырубках позволяет спрогнозировать продуктивность древостоев в будущем [15]. Следовательно, наблюдения за динамикой лесовосстановительных процессов антропогенно нарушенных территорий в условиях меняющегося климата и с применением современных лесозаготовительных технологий актуальны.

Цель работы – оценка динамики и особенностей естественных лесовосстановительных процессов на вырубках разных лет в условиях северо-востока европейской части России.

Объекты и методы исследования

Обследование вырубок разных лет проводилось на территории Усть-Куломского района (Усть-Немского лесничества) в подзоне средней тайги южной части Тиманского кряжа (61°46′ с. ш. 54°20′ в. д.). Данная возвышенность располагается на северо-востоке Восточно-Европейской равнины в Республике Коми и Архангельской области [1]. Тиманский кряж представляет собой размытую и разрушенную древнюю горную страну, пересекающую центральную часть Республики Коми в направлении с северо-северо-запада на восток-юго-восток. Объекты исследования относятся к Тимано-Печорской подпровинции Южно-Тиманскому елово-пихтовому округу [25], к еловому, пихтово-еловому, березово-еловому лесорастительному району Южного Тимана [13]. По геологическому сложению Тиманский кряж представлен преимущественно палеозойскими породами, состоящими из кварцитов, песчаников, доломитов, известняков, мергелей и глин [3]. Южная часть Тиманского кряжа – это серия рассеченных высоких гряд и холмов, с абсолютными высотами 250–350 м над ур. м., называемых Пармами. В условиях холмистого рельефа преобладающими являются типичные подзолистые почвы. Они формируются в основном под таежными темнохвойными лесами с мохово-кустарничковым живым напочвенным покровом в условиях промывного (периодически промывного) режима. Почвообразующими породами служат суглинисто-глинистые однородные и слоистые отложения различного генезиса [2]. Климат района исследования характеризуется как умеренно континентальный, умеренно холодный с коротким и прохладным летом, холодной и продолжительной зимой с устойчивым снежным покровом [1]. В целом район исследования по орографическим, климатическим условиям близок к предгорным частям Уральской горной страны.

Исследование выполнялось в 2017 и 2024 гг. на 9 вырубках разных лет ельников чернично-зеленомошных. Площадь вырубок изменяется от 7 до 12 га. По характеру живого напочвенного покрова объекты относятся ко 2-му типу вырубок, когда после рубки идет относительно быстрая смена травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов другими видами [16]. Под пологом ельника черничного в составе травяно-кустарничкового яруса преобладают черника (*Vaccinium myrtillus* L.), щитовник картузианский (*Dryopteris carthusiana* (Vill.) H.P. Fuchs), голокучник обыкновенный (*Gymnocarpium*

dryopteris (L.) Newman). Мохово-лишайниковый покров состоит в основном из гилокомия блестящего (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.), плеврициума Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.) и кукушкина льна (*Polytrichum commune* Hedw.). Через 8 лет после рубки живой напочвенный покров представлен смешанным составом: преимущественно (40–60 %) голокучником обыкновенным, черникой, хвощом лесным (*Equisetum sylvaticum* L.), кипрем узколистным (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.). Общее проективное покрытие мохово-лишайникового яруса составляет 60–80 % и сформировано зелеными мхами: плеврициумом, гилокомиумом, кукушкиным льном. На 18-летних вырубках живой напочвенный покров вследствие высокого опада листвы носит больше мертвопокровный характер с наличием голокучника обыкновенного, черники, осоки шаровидной (*Carex globularis* L.). Моховой покров составляет 20–60 % от общего проективного покрытия. Исследуемые вырубки развиваются без воздействия пирогенного фактора.

Рубка и трелевка деревьев на всех вырубках проводились с применением многооперационной лесозаготовительной техники (харвестер–форвардер). Исследование лесовозобновительных процессов на вырубках разных лет осуществлялось согласно методике ОСТ 56-69–83 «Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки» [19]. На вырубках закладывались пробные площади (ПП) 50×50 м, далее проба разбивалась на сеть квадратов 10×10 м (25 шт.). По разбитой сети ПП в центре каждого квадрата в зависимости от густоты возобновления закладывались круговые учетные площадки: радиусом 0,8 м (2 м^2) при густоте подроста 10 тыс. шт./га и более; и радиусом 1,78 м (10 м^2) при густоте возобновления менее 10 тыс. шт./га. В зависимости от площади вырубки количество учетных площадок варьировало от 25 до 100 шт. У деревьев подроста измерялась высота, на 18-летних вырубках – диаметр на уровне 1,3 м, при высоте деревьев ниже 1,5 м – только высота. Оценивалось жизненное состояние деревьев [35]. На каждой пробной площади отбиралось по 15 модельных деревьев подроста ели и 20 – березы. Для определения характеристик подроста у модельных деревьев извлекали спилы на высоте 0; 1,3 м, ½ высоты ствола. На подготовленных образцах древесины измерение ширины годичных колец проводилось на приборе Lintab V.

Для оценки таксационных показателей древостоев ельников, пройденных вырубками разных лет, и предварительного возобновления под пологом древостоя ельника черничного (контроль) в разных частях выдела заложено 5 постоянных пробных площадей (ППП) размером 50×50 м с общей площадью обследования насаждения 1,25 га. Для учета естественного возобновления под пологом ельника черничного на каждой ППП закладывалось по 5 круговых площадок радиусом 1,78 м (10 м^2). У подроста определялись высота и состояние.

Коренной (контрольный участок) древостой ельника черничного является смешанным по составу, в древесном ярусе доминируют ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) с примесью пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.), березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.). Средний диаметр ели составляет 18,4 см, средняя высота – 13,3 м (табл. 1). Включенная в состав древостоя рябина достигает 30 см в диаметре и 20,5 м в высоту. Общий запас стволовой древесины елового насаждения равняется 237,2 м^3/га, сухостойных деревьев – 46,7 м^3/га, по породному составу по-

следние – это преимущественно ель и пихта. Возраст хвойных деревьев – 60–230 лет. По составу, запасу и возрасту насаждение исследованного ельника близко к коренным елово-пихтовым насаждениям юго-восточной части Республики Коми [18].

Таблица 1

Краткая таксационная характеристика контрольного насаждения ельника черничного
Brief Inventory Characteristics of a Reference Blueberry Spruce Stand

Элемент леса	Средние			Густота, шт./га		Запас, м³/га	
	возраст (минимальный–максимальный), лет	с ошибкой		живые	сухие	живые	сухие
		диаметр, см	высота, м				
Ель	155 (70–240)	18,4±0,5	13,3±0,3	372	34	124,4	19,5
Пихта	105 (80–130)	17,9±0,5	13,0±0,3	258	99	72,1	21,4
Береза	–	30,0±1,8	19,4±1,4	68	3	32,6	5,4
Рябина	–	10,6±0,5	8,4±0,3	120	3	8,1	0,4
			Итого	818	139	237,2	46,7

Примечание: Состав насаждения – 5Е3Пх2Б+Ряб. Прочерк – данные не установлены.

Результаты исследования и их обсуждение

Под пологом ельника чернично-зеленомошного (контрольный участок) и на вырубках первых лет в составе подроста преобладают хвойные деревья ели и пихты, занимающие от 70 до 100 % общего состава древостоя. Доля березы в числе подроста не превышает 30 %. На 4–8-й годы после рубки количество березы значительно возрастает, достигая 80–90 %, участие хвойного подроста изменяется от 7 до 21 %. На 11- и 18-летних вырубках доля хвойных пород увеличивается в основном за счет последующего возобновления ели. Количество березы снижается до 70–85 % в результате естественного самоизреживания отставших в росте деревьев. Осина в подросте начинает появляться только на 4-й год после рубки, однако ее количество не превышает 3–11 % (табл. 2). В отличие от березы, единичный осиновый подрост представлен деревьями семенного происхождения, что свидетельствует о заносе семян с других удаленных участков. Так, по данным исследований естественного возобновления под пологом среднетаежных ельников черничных Архангельской области П.Н. Львовым с соавторами [14], в подросте осина отсутствует, тогда как на вырубках в составе естественного возобновления ее не более 10 %. На 18-летних вырубках прослеживается формирование древостоя, где некоторая часть елового и березового подроста достигла диаметра 6 см и более. Средние диаметры ели составляют 5,7 см, березы – 3,3 см.

Количество подлеска на вырубках изменяется от 6,0 до 31,2 тыс. шт./га. На 4–8-летних вырубках идет интенсивное возобновление рябиной, которая занимает 68–97 % от общего количества подлесочных видов. Средние высоты рябины и ивы схожи с высотой березы и осины и изменяются от 0,4 до 1,8 м. Через 18 лет после рубки подлесочные породы представлены преимущественно рябиной – 95–100 % с количеством особей от 6,5 до 10,9 тыс. шт./га, ива занимает от 2 до 5 %. Средние диаметры рябины изменяются от 1,4 до 1,8 см,

высоты – от 3,0 до 3,7 м. Ива представлена крупными экземплярами со средними диаметрами деревьев 9,3 см и высотами 5,9 м.

Таблица 2

Характеристика естественного возобновления на контрольном участке ельника черничного и вырубках
Characteristics of Natural Regrowth in the Reference Blueberry Spruce Forest Area and at the Felling Sites

Номер ППП	Состав	Порода	Средние		Густота, тыс. шт./га		Встречаемость на вырубке, %
			диаметр, см	высота, м	живые	сухие	
К*	66Е25 Пх9Б	Ель	–	0,9	4,50	0	92
		Пихта	–	1,3	1,70	0,10	
		Береза	–	0,8	0,65	0	
		Итого	–		6,85	0,10	
1-1	70Е16 Б14Пх	Ель	–	0,9	4,69	0,60	40
		Береза	–	0,7	1,07	0	
		Пихта	–	1,4	0,94	0,10	
		Итого	–		6,70	0,70	
1-2	74Е26Пх	Ель	–	1,3	2,50	0	45
		Пихта	–	1,3	0,90	0	
		Итого	–		3,40	0	
1-3	52Е31Б 17Пх	Ель	–	1,5	2,50	0	50
		Пихта	–			0	
		Береза	–	0,5	1,10	0	
		Итого	–		3,60	0	
4-1	87Б13Е	Береза	–	2,1	11,30	0	75
		Ель	–	1,1	1,70	0	
		Итого	–		13,00	0	
4-2	74Б23Е 3Ос	Береза	–	1,0	9,30	0	68
		Ель	–	1,1	2,90	0	
		Осина	–	1,7	0,40	0	
		Итого	–		12,50	0	
4-3	74Б20Е 4Пх3Ос	Береза	–	0,8	10,20	0	76
		Ель	–	0,9	2,80	0	
		Пихта	–	1,2	0,60	0	
		Осина	–	0,5	0,40	0	
		Итого	–		13,90	0	
8-1	90Б7Е 2Ос1Пх	Ель	–	1,1	5,60	0,20	98
		Пихта	–	0,9	0,80	0	
		Береза	–	1,4	45,00	1,00	
		Осина	–	1,7	0,56	0	
		Итого	–		51,96	1,20	
8-2	79Б9Пх 12Е	Ель	–	1,6	2,80	0,20	96
		Пихта	–	1,0	2,20	–	
		Береза	–	1,3	19,20	–	
		Итого	–	–	24,20	0,20	
11-1	85Б11Е 4Пх	Береза	–	2,6	23,30	0	99
		Ель	–	1,7	3,00	0	
		Пихта	–	1,7	1,10	0	
		Итого	–	–	27,30	0	

Окончание табл. 2

Номер ППП	Состав	Порода	Средние		Густота, тыс. шт./га		Встречаемость на вырубке, %
			диаметр, см	высота, м	живые	сухие	
11-2	71Б16Е 11Ос3Пх	Береза	–	1,4	14,20	0	98
		Ель	–	1,5	3,20	0	
		Осина	–	0,6	2,20	0	
		Пихта	–	1,5	0,60	0	
		Итого	–	–	20,20	0	
11-3	76Б14Е 8Пх1С1Ос	Береза	–	3,1	9,70	0	100
		Ель	–	2,0	1,80	0	
		Пихта	–	0,5	1,00	0	
		Сосна	–	0,9	0,10	0	
		Осина	–	0,5	0,10	0	
		Итого	–	–	12,80	0	
18-1	80Б17Е3Пх ед,Ос	Береза	3,3	4,5	12,10	0,27	99
		Ель	4,3	4,3	2,50	0,19	
		Пихта	5,3	5,0	0,40	0,04	
		Осина	4,5	5,3	0,10	1,08	
		Итого	3,4	4,5	15,10	0,22	
18-2	83Б11Е 6Пх	Береза	3,3	4,3	8,70	0,16	96
		Ель	5,7	5,0	1,20	0	
		Пихта	3,4	2,5	0,60	0	
		Итого	–		10,56	0,16	

Примечание:* – естественное возобновление под пологом ельника; ППП 8-1 – первая цифра указывает на количество лет после рубки, вторая – на номер обследуемой вырубки.

На 18-летних вырубках под пологом крупного березового подроста на волоках идет слабое возобновление ели. Кустарниковая и крупнотравная растительность больше вытесняются крупным лиственным подростом и начинают группироваться в местах скопления неразложившихся порубочных остатков.

При обследовании 8- и 11-летних вырубок на пасеках отмечено значительное скопление плохо разложившихся порубочных остатков, т. е. порубочные остатки не укладывались харвестером на волок, а раскидывались на пасеке («Руководство по технологии и организации лесосечных работ...»). Данный способ привел к задержке последующего возобновления на пасеках пионерных мелколиственных пород, к зарастанию этих участков крупными травянистыми видами (кипрей) и кустарниковой растительностью (малина, шиповник).

Отсутствие порубочных остатков на плохо укрепленных волоках по всей их длине ведет к образованию сплошной глубокой колеи до 0,5–0,8 м (рис. 1). Через 18 лет после рубки колея становится менее глубокой или частично затягивается. Несмотря на высокое разложение крупных древесных остатков на сильнозахламленных участках волоков и пасек, возобновление здесь протекает слабо или отсутствует. По наблюдениям, при более равномерном распределении порубочных остатков на волоке глубина колеи не превышала 0,3 м. При трелевке древесины такое распределение порубочных остатков способствует их более равномерному перемешиванию с минеральной частью почвы, что повышает эффективность возобновления на волоках.



а *б*

в *г*

Рис. 1. Вырубки ельников черничных различных лет: *а* – вырубка 1-го года (2016 г.); *б* – через 7 лет (2024 г.); *в* – 11-летняя вырубка, оставленные крупные деревья рябины; *г* – 18-летняя вырубка

Fig. 1. Felling sites of blueberry spruce forests of different years: *а* – 1-year-old felling site (2016); *б* – 7-year-old felling site (2024); *в* – 11-year-old felling site with large rowan trees left standing; *г* – 18-year-old felling site

Подрост ели и пихты на вырубках представлен в основном предварительным возобновлением. Количество хвойного подроста остается на сравнительно стабильном уровне как под пологом ельника черничного, так и на вырубках первых лет, изменяясь от 2 до 6 тыс. шт./га (рис. 2). Максимум возобновления лиственных пород приходится на 8-летний период после рубки, достигая 45,6 тыс. шт./га. Через 11 лет после рубки отмечается снижение численности лиственных пород до 10–23 тыс. шт./га, в 18 лет – до 9–12 тыс. шт./га. Вследствие высокой густоты подроста на вырубках, даже при снижении численности березы через 18 лет, последующее возобновление хвойных протекает относительно слабо и не носит массового характера. Встречаемость естественного возобновления на вырубках разных типов в условиях Республики Коми для елового подроста предварительного возобновления изменяется от 21 до 28 %, последующего – от 8 до 15 %, встречаемость возобновления березы варьирует от 42 до 84 % [13]. По нашим данным, общая встречаемость подроста на контрольном участке ельника черничного составила 92 %, изменяясь в 1-й год от 40 до 50 %

и составив 70–80 % через 4 года. На 8- и 18-летних вырубках встречаемость естественного возобновления достигает 95–100 %. Коэффициент вариации численности возобновления на учетных площадках под пологом ельника черничного составил 77 %. Наибольшее варьирование густоты подроста отмечается на вырубках первых лет, где данный показатель изменяется от 100 до 200 %. При достижении максимальной густоты и более равномерного распределения деревьев по площади вариация густоты снижается и составляет 57–98 %.

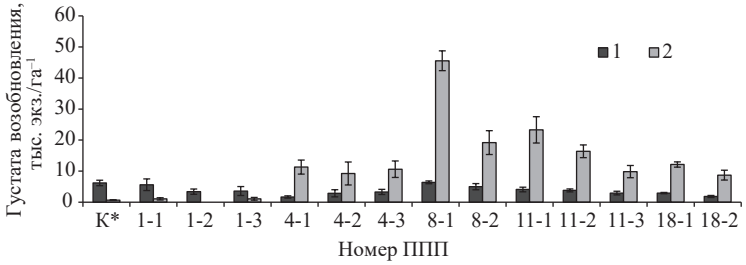


Рис. 2. Динамика изменения количества подроста на вырубках разных лет: 1 – хвойный подрост; 2 – лиственный подрост (здесь и на рис. 3, 5: К* – контроль)

Fig. 2. Dynamic patterns in the amount of naturally regenerated trees at the felling sites of different years: 1 – coniferous undergrowth; 2 – deciduous undergrowth (here and in fig. 3, 5: К* – reference)

«Правилами лесовосстановления…» для перевода вырубок в лесопокрытые земли для подроста ели установлены следующие критерии: возраст 10 лет, густота – 1,5 шт./га, средняя высота – 0,7 м. На исследуемых 8–11-летних вырубках хвойный подрост предварительного и последующего возобновления достигает густоты 2,8–6,4 тыс. шт./га, средние высоты изменяются от 1,1 до 2,0 м. На всех вырубках выявлен преимущественно благонадежный подрост ели. Следовательно, густота хвойного подроста на обследованных вырубках превышает нормативную в несколько раз, высота – в 1,5–3,0 раза.

Исследование естественного возобновления [14] показало, что на 20-летних вырубках Архангельской области количество подроста и тонкомерных деревьев, начинающих формировать древостой, достигает 18,5 тыс. шт./га. Согласно данным многолетнего исследования вырубок влажных ельников черничных этой же области, количество хвойного подроста через 5–8 лет после рубки достигает 15 тыс. шт./га, лиственного – 50–70 тыс. шт./га [8]. По данным автора, наибольшее количество возобновления сосредоточено на пасеках, наименьшее – в колеях и межколийном пространстве. Как показали погодичные исследования среднетаежной вырубки хвойно-лиственного насаждения в условиях Республики Коми [11], на 3-й год после рубки общее количество возобновления достигает более 40 тыс. шт./га. При этом возобновительный процесс лучше идет в колеях с наибольшей нарушенностью напочвенного покрова.

Средняя высота хвойного подроста на контрольном участке ельника черничного и на вырубке 1-го года схожая – 1,1–1,5 м. Через 4–8 лет она снижается, изменяясь от 1,0 до 1,3 м, что говорит о массовом появлении новых особей лиственного и хвойного подроста, заполняющих свободное пространство вырубок (рис. 3). На 11–18-летних вырубках отмечаются хорошие темпы прироста в высоту у хвойных пород: средний показатель достигает 1,5–5,0 м, иногда превышая среднее для березы.

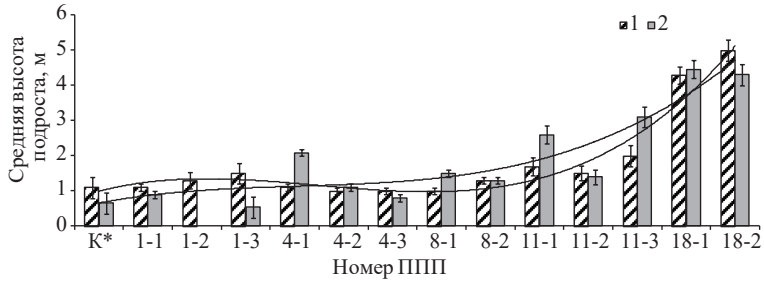


Рис. 3. Динамика изменения средней высоты подроста на вырубках разных лет: 1 – хвойный подрост; 2 – лиственный подрост

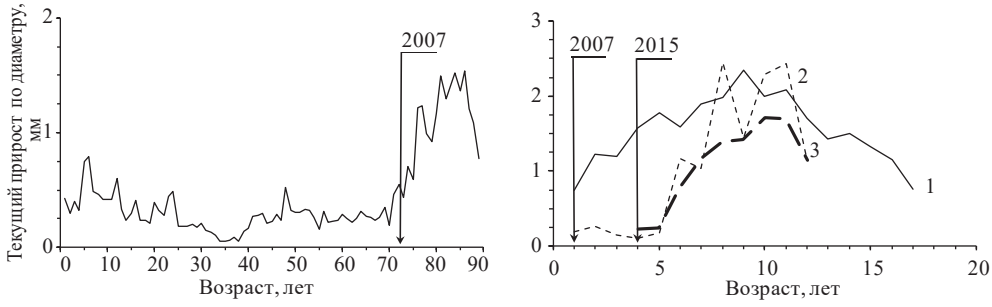
Fig. 3. Dynamic patterns in the average height of naturally regenerated trees at the felling sites of different years: 1 – coniferous undergrowth; 2 – deciduous undergrowth

По Н.И. Казимирову [10], в условиях Карелии на 8-летних вырубках ельников черничных количество подроста составляет 11,1 тыс. шт./га, из них на долю ели приходится 40 % (2,3 тыс. шт./га), остальные 60 % принадлежат мелколиственным породам. Средняя высота ели 1,7 м, лиственных пород – 0,5 м. Исследования автора показали, что при сохранении 15–20-летнего хвойного подроста (до 1 тыс. шт./га) появившиеся всходы лиственных уступают в росте ели. Через 45 лет ель способна сформировать 1-й ярус древостоя. Однако при одновременном появлении березы и ели на вырубке в течение всего цикла развития доминирует береза.

Текущий прирост является одним из основных показателей продуктивности леса, выступает маркером динамики его развития и состояния [15]. Анализ текущего периодического прироста по диаметру модельных деревьев ели и березы, развивающихся на месте вырубок, показал относительно высокие темпы прироста после рубки. Возраст елового подроста под пологом ельников черничных до рубки достигает 70 лет (рис. 4, *а*). На протяжении всего развития под пологом древостоя средний прирост ели не превышает 0,8 мм в год. После рубки 2007 г. темпы прироста ели предварительного возобновления начинают увеличиваться. Однако, как показало измерение ширины годичных колец, у большинства особей ели на протяжении 3–5 лет прирост сохраняется на уровне роста до рубки.

Исследование хвои подроста ели в условиях средней тайги Республики Коми [21] выявило, что фотосинтетическая способность хвои ели, развивающейся на вырубке, в 1,5 раза превышает способность фотосинтеза хвои подроста ели под пологом ельника черничного, что говорит о более высоком накоплении ассимилятов и, как следствие, о более интенсивных ростовых процессах. Подрост ели на вырубке обладает превосходящей поглотительной способностью CO_2.

Процесс возобновления березы на вырубках начинается на следующий год после рубки. Амплитуда колебания минимального и максимального возраста деревьев березы, возобновляющейся после рубки на 18-летних вырубках, составила 12–17 лет. Береза предварительного возобновления имеет схожие темпы роста, что и подрост ели под пологом ельников (рис. 4, *б*). После рубки она, как и ель, увеличивает прирост, достигая максимума через 3–4 года – до 1,8 мм в год. Более высокие темпы роста по диаметру после рубки отмечаются у березы последующей генерации с максимумами прироста более 2 мм в год.



а *б*

Рис. 4. Текущий прирост по диаметру деревьев подроста на вырубках ельников черничных: *а* – ели предварительного возобновления; *б* – березы (1 – последующее возобновление на 18-летней вырубке; 2 – предварительное возобновление; 3 – последующее возобновление на 8-летней вырубке. Стрелками указывается год рубки)

Fig. 4. Current annual increment by diameter of naturally regenerated trees: *a* – advance regeneration spruce; *б* – birch (1 – subsequent regeneration at the 18-year-old felling site; 2 – advance regeneration; 3 – subsequent regeneration at the 8-year-old felling site. The arrows indicate the felling year)

Коэффициенты варьирования высоты хвойного подроста под пологом ельника черничного и на вырубках независимо от давности рубки характеризуются большой изменчивостью (63–100 %). Высокая вариация высоты свидетельствует о большой растянутости высот накопленного хвойного подроста и его неравномерного развития после рубки (рис. 5). Варьирование высоты последующего возобновления березы, хотя и несколько ниже в отличие от ели, также характеризуется значительной вариацией (40–90 %).

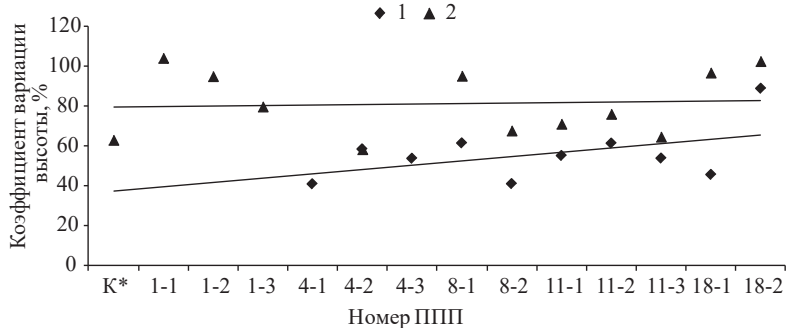


Рис. 5. Динамика изменения коэффициентов варьирования высоты подроста на вырубках разных лет: 1 – березовый подрост; 2 – еловый подрост

Fig. 5. Dynamic patterns in the height variation coefficients of undergrowth at the felling sites of different years: 1 – birch undergrowth; 2 – spruce undergrowth

Заключение

Обследование хода естественного возобновления на вырубках разных лет Южного Тимана показало неоднородность в количестве и составе подроста. Через 4–8 лет после рубки в составе начинает преобладать береза, которая опережает ель в росте, однако через 18 лет после рубки ель может опережать ростовые показатели березы. Максимум возобновления на вырубках прихо-

дится на 8–11-летний период, когда численность возобновления достигает 52 тыс. шт./га. Варьирование густоты и высоты подроста на учетных площадках значительное, что свидетельствует об активном формировании антропогенно нарушенных фитоценозов.

На технологических элементах вырубки наибольшее количество подроста отмечается в межколейных участках и краях волоков. В колеях возобновление почти не наблюдается, за исключением участков на склонах колей с хорошим дренажем. При отсутствии достаточного стока и глубоких колей на таких участках вода задерживается 8 лет и более, что, в свою очередь, препятствует возобновлению. В пасечном пространстве возобновление состоит преимущественно из хвойных пород предварительного и реже последующего возобновления. Большая захламленность порубочными остатками волоков и пасек также мешает возобновлению. Отсутствие или недостаточное количество порубочных остатков приводят к сильному продавливанию волока. Однако такое нарушение, наоборот, улучшает возобновление на краях волоков и межколейного пространства в результате искусственно созданного дренажа и перемешивания верхних горизонтов на волоке форвардера при трелевке древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Атлас по климату и гидрологии Республики Коми. М.: Дрофа; ДиК, 1997. 116 с.

Climate and Hydrology Atlas of the Komi Republic. Moscow, Drofa Publ., 1997. 116 p. (In Russ.).

2. Атлас почв Республики Коми / под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. Сыктывкар: Коми республиканская типография, 2010. 356 с.

Soil Atlas of the Komi Republic. Ed. by G.V. Dobrovolsky, A.I. Taskaev, I.V. Zaboeva. Syktyvkar, Komi Republic Publ., 2010. 356 p. (In Russ.).

3. Атлас Республики Коми. М.: Феория, 2011. 448 с.

Atlas of the Komi Republic. Moscow, Feoria Publ., 2011. 448 p. (In Russ.).

4. *Башегуров К.А., Гавриленко А.Н., Розинкина Е.П., Попов А.С., Залесов С.В., Предеина И.В.* Естественное лесовосстановление на вырубках в северо-таежном равнинном районе Западной Сибири // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 58–70.

Basheguroy K.A., Gavrilenko A.N., Rozinkina E.P., Popov A.S., Zalesov S.V., Predeina I.V. Natural Reforestation in the Felling Sites in the North Taiga Lowland Area of Western Siberia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 58–70. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-58-70

5. *Глазунов Ю.Б., Полякова Г.А., Коротков С.А., Лежнев Д.В.* Естественное возобновление на вырубках в Серебрянском опытном лесничестве // Сиб. лесн. журн. 2024. № 2. С. 74–83.

Glazunov Yu.B., Polyakova G.A., Korotkov S.A., Lezhnev D.V. Natural Reforestation in Clearcut Area in Serebryanoborsky Experimental Forestry. *Sibirskij Lesnoj Zurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2024, no. 2, pp. 74–83. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/SJFS20240209

6. *Дымов А.А.* Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми: моногр. М.: ГЕОС, 2020. 336 с.

Dymov A.A. *Soil Successions at Boreal Forests of the Komi Republic*. Moscow, GEOS Publ., 2020. 336 p. https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828

7. *Ильинцев А.С.* Влияние современных лесозаготовок на нарушение почвы, состояние живого напочвенного покрова и последующее возобновление деревьев в бореальных лесах России // Изв. русск. геогр. общ-ва. 2023. Т. 155, № 3-4. С. 62–73.

Ilintsev A.S. The Impact of Modern Logging on Soil Disturbance, the State of Ground Cover and the Subsequent Regeneration of Trees in Boreal Forests of Russia. *Bulletin of the Russian Geographical Society*, 2023, vol. 155, no. 3-4, pp. 62–73. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S0869607123030072

8. *Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н.* Образование колейности при проходе лесозаготовительной техники в ельниках на двучленных породах // Изв. СПбЛТА. 2021. Вып. 237. С. 168–182.

Ilintsev A.S., Nakvasina E.N. Rut Formation after the Passage of Logging Machinery in Spruce Forests on Binomial Soils. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2021, iss. 237, pp. 168–182. (In Russ.). https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.237.168-182

9. *Ильинцев А.С., Романов Е.М., Воронин В.В., Богданов А.П.* Современная практика искусственного лесовосстановления в таежной зоне европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 52–64.

Ilintsev A.S., Romanov E.M., Voronin V.V., Bogdanov A.P. Modern Practice of Artificial Reforestation in the Taiga Zone of the European Part of Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 52–64. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-52-64

10. *Казимиров Н.И.* Лесоводственная роль елового подроста: автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Л., 1961. 15 с.

Kazimirov N.I. *Silvicultural Role of Spruce Undergrowth*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Leningrad, 1961. 15 p. (In Russ.).

11. *Кутявин И.Н., Манов А.В., Старцев В.В., Дымов А.А.* Влияние лесозаготовительной техники на динамику естественного возобновления леса после рубки хвойно-лиственного насаждения средней тайги // Теоретич. и прикладн. экология. 2024. № 3. С. 123–132.

Kutyavin I.N., Manov A.V., Startsev V.V., Dymov A.A. The Logging Equipment Effect on the Dynamics of Natural Reforestation after Cutting Mixed Coniferous-Deciduous Stand in the Middle Taiga. *Theoretical and Applied Ecology*, 2024, no. 3, pp. 123–132. (In Russ.). https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-3-123-132

12. *Лазарев И.П., Зябченко С.С.* Воздействие лесозаготовительной техники на почву при рубке сосновых лесов // Влияние хозяйственных мероприятий на лесные почвы Карелии. Петрозаводск: КФ АН СССР, Ин-т леса, 1983. С. 112–129.

Lazarev I.P., Zyabchenko S.S. Impact of Logging Equipment on Soil during Hurvesting of Pine Forests. *The Impact of Management Practices on Forest Soils of Karelia*. Petrozavodsk, KF AN SSSR Publ., 1983, pp. 112–129. (In Russ.).

13. Лесное хозяйство и лесные ресурсы Республики Коми / отв. ред. Г.М. Козубов, А.И. Таскаев. М.: ДИК, 2000. 512 с.

Forestry and Forest Resources of the Komi Republic. Ed. by G.K. Kozubov, A.I. Taskaev. Moscow, DIK Publ., 2000. 512 p. (In Russ.).

14. *Львов П.Н., Ипатов Л.Ф., Плохов А.А.* Лесообразовательные процессы и их регулирование на Европейском Севере. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 112 с.

Lvov P.N., Ipatov L.F., Plokhov A.A. *Forest-Forming Processes and Their Regulation in the European North*. Moscow, Lesnya promyshlennost' Publ., 1980. 112 p. (In Russ.).

15. *Львов П.Н., Панов А.А.* Содействие естественному лесовозобновлению в таежной зоне. М.: Гослесбумиздат, 1962. 112 с.

Lvov P.N., Panov A.A. *Promoting Natural Reforestation in the Taiga Zone*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1962. 112 p. (In Russ.).

16. *Мелехов И.С.* О теоретических основах типологии вырубок // Изв. вузов. Лесн. журн. 1958. № 1. С. 27–38.

Melekhov I.S. On the Theoretical Foundations of the Logging Typology. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1958, no. 1, pp. 27–38. (In Russ.).

17. *Ниценко А.А.* Типология мелколиственных лесов европейской части СССР. Л.: Ленинградск. ун-т, 1972. 140 с.

Nitsenko A.A. *Typology of Deciduous Forests in the European Part of the USSR*. Leningrad, Leningrad University Publ., 1972. 140 p. (In Russ.).

18. *Пахучий В.В.* Коренные леса Республики Коми: состояние и проблемы охраны // Лесоведение. 2002. № 2. С. 8–13.

Pakhuchiy V.V. Primary Forests of the Komi Republic: Current Status and Conservation Issues. *Lesovedenie* = Forest Science, 2002, no. 2, pp. 8–13. (In Russ.).

19. *Побединский А.В.* Изучение лесовосстановительных процессов. Красноярск, 1962. 63 с.

Pobedinskiy A.V. *Study of Reforestation Processes*. Moscow, Nauka Publ., 1962. 63 p. (In Russ.).

20. *Побединский А.В.* Рубки и возобновление в таежных лесах СССР. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 199 с.

Pobedinskiy A.V. *Logging and Reforestation in the USSR Taiga Forests*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 199 p. (In Russ.).

21. *Тужилкина В.В.* Функциональная характеристика хвои подроста ели сибирской под пологом и на вырубке ельника черничного в подзоне средней тайги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 107–116.

Tuzhilkina V.V. Functional Characteristics of Siberian Spruce Undergrowth Needles under the Canopy and in the Cutting of Bilberry Spruce Forest in the Middle Taiga Subzone. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 107–116. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-107-116

22. *Цветков В.Ф.* Лесовозобновление: природа, закономерности, оценка, прогноз: моногр. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. 212 с.

Tsvetkov V.F. *Reforestation: Nature, Patterns, Assessment, and Prospects*: Monograph. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 212 p. (In Russ.).

23. *Цветков В.Ф.* Потенциал лесовозобновления на вырубках европейского Севера России // Лесоведение. 2010. № 3. С. 3–14.

Tsvetkov V.F. Reforestation Potential in Felling Areas of the European North of Russia. *Lesovedenie* = Forest Science, 2010, no. 3, pp. 3–14.

24. *Цветков В.Ф., Семенов Б.А.* Сосняки Крайнего Севера. М.: Агропромиздат, 1985. 116 с.

Tsvetkov V.F., Semenov B.A. *Pine Forests of the Far North*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 116 p. (In Russ.).

25. *Юдин Ю.П.* Темнохвойные леса // Производительные силы Коми АССР. М.: АН СССР, 1954. Т. 3. Ч. 1. С. 42–125.

Yudin Yu.P. Dark Coniferous Forests. *Productive Forces of the Komi ASSR*. Moscow, AN SSSR Publ., 1954, vol. 3, part 1, pp. 42–125. (In Russ.).

26. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The Impact of Heavy Traffic on Forest Soils: A Review. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 338, pp. 124–138. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022

27. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutyavin I.N., Osipov A.F., et al. Changes in Soil and Vegetation with Different Number of Passes of Wheeled Forestry Equipment (Middle Taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55, pp. 1633–1646. https://doi.org/10.1134/S1064229322110023

28. Huth F., Wehnert A., Wagner S. Natural Regeneration of Scots Pine Requires the Application of Silvicultural Treatments such as Overstorey Density Regulation and Soil Preparation. *Forests*, 2022, vol. 13(6). https://doi.org/10.3390/f13060817

29. Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Zhuk A.Y., Kunitskaya O.A., et al. Environment-Friendly Logging in the Context of Water Logged Soil and Knob-and-Ridge Terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 22–27. https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2018.22.27

30. Jacobson S., Hannerz M. Natural Regeneration of Lodgepole Pine in Boreal Sweden. *Biological Invasions*, 2020, vol. 22, pp. 2461–2471. https://doi.org/10.1007/s10530-020-02262-0

31. Knocke H.C., Axer M., Hamkens H.F., Fischer C., Hansen J.H., Nagel R.-V., et al. *Quo vadis* Scots Pine Forestry in Northern Germany: How do Silvicultural Management and Climate Change Determine an Uncertain Future? *European Journal of Forest Research*, 2024, vol. 143, pp. 1477–1497. https://doi.org/10.1007/s10342-024-01701-0

32. Kyrö M.J., Hallikainen V., Valkonen S., Hyppönen M., Puttonen P., Bergsten U., et al. Effects of Overstory Tree Density, Site Preparation, and Ground Vegetation on Natural Scots Pine Seedling Emergence and Survival in Northern Boreal Pine Forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 52(5), pp. 860–869. https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0101

33. Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical Site Preparation for Forest Restoration. *New Forests*, 2012, vol. 43, pp. 825–848. https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x

34. Lula M., Langvall O., Karlsson C. Regeneration Methods for Scots Pine and Lodgepole Pine: A Comparison in Central Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2025, vol. 40, iss. 2, pp. 128–137. https://doi.org/10.1080/02827581.2025.2466576

35. *Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests*. Hamburg, Germany, UNECE ICP Forests, 2010. 49 p.

36. Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Teterevleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Y.Z., et al. Theoretical Approaches to Logging Trail Network Planning: Increasing Efficiency of Forest Machines and Reducing Their Negative Impact on Soil and Terrain. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16(4), pp. 61–75. https://doi.org/10.3233/AJW190049

37. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., et al. Forest Disturbances under Climate Change. *Nature Climate Change*, 2017, vol. 7, pp. 395–402. https://doi.org/10.1038/nclimate3303

38. Werder M., Bont L.G., Schweier J., Thees O. A Comprehensive Analysis of Time Investment in Skid Trail Planning for Forest Access. *PLoS ONE*, 2025, vol. 20(2), art. e0317963. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317963

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the manuscript