

Научная статья

УДК 630*231:630*17:582.475.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-33-51

Использование многофакторного анализа данных в оценке состояния предварительного и последующего возобновления сосняков после выборочных рубок

Д.А. Семенякин¹, канд. биол. наук, мл. науч. сотр.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2102-0516>

И.В. Тихонова^{2✉}, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [V-3735-2017](https://orcid.org/0000-0001-6929-9491),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6929-9491>


¹Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; denis8880@inbox.ru

²Западно-Сибирское отделение Института леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», ул. Жуковского, д. 100/1, г. Новосибирск, Россия, 630082; selection@ksc.krasn.ru✉

Поступила в редакцию 14.10.21 / Одобрена после рецензирования 19.01.22 / Принята к печати 23.01.22

Аннотация. Проведены исследования количественных и качественных характеристик возобновления после 1-го приема экспериментальной выборочной рубки интенсивностью 20–50 % в сосняках северной части Красноярской лесостепи. Часть насаждений за 5–10 лет до рубки пройдена низовым пожаром. Цель работы – обобщенный анализ состояния возобновления с учетом типа леса, густоты древостоя и воздействия огня до рубки, нарушенности почвенного и состояния живого напочвенного покровов, микроклиматических условий на вырубках. Использованы метод главных компонент, а также корреляционный и дисперсионный анализ по отдельным признакам. Показаны преимущества многомерного анализа данных методом главных компонент для получения более полной информации по вкладу и совместному влиянию разных экологических факторов на возобновление сосны на вырубках. Доля объясняемой дисперсии учтенных показателей составляет 87 %. Наиболее значимыми для возобновления сосны были тип леса (вырубки) и воздействие огня, на 2-м месте по значению – густота древостоя до рубки и интенсивность рубки. Из опосредованных ими факторов важными оказались освещенность и влажность почвы. Исходя из характеристик 4 главных компонент, установлены 2 варианта сочетания основных факторов для лучшего возобновления насаждений: 1) большая первоначальная густота спелых древостоев, а также умеренное развитие мхов и злаков в живом напочвенном покрове позволяют выбрать любую интенсивность рубки (в исследуемых пределах), желательно в сочетании с предварительным выжиганием части подстилки (либо частичной минерализацией почвы) за 5 лет до рубки умеренно-высокой и высокой интенсивности; 2) при меньшей исходной густоте древостоев и значительном развитии живого напочвенного покрова необходимы предварительное выжигание части подстилки либо минерализация почвы и выбор меньшей интенсивности 1-го приема рубки (до 20 %). Анализ изменчивости линейных приростов высотно-возрастных групп подроста подтвердил выводы, сделанные по результатам анализа количества и качества возобновления, показал различия в реакции разных групп подроста на изменение микроклиматических условий на вырубках.

© Семенякин Д.А., Тихонова И.В., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Отмечено сходство северной лесостепи с южной тайгой по условиям возобновления сосны. Результаты исследования могут быть использованы для уточнения требований к рубкам и достижения лучшего возобновления сосняков.

Ключевые слова: экологическое лесоведение, возобновление сосняков, комплексный анализ возобновления сосняков, северная лесостепь, рубки ухода, рубки переформирования

Благодарности: Исследование выполнено в рамках бюджетного проекта ФГБНУ ИЛ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН № 0287-2022-0010. Авторы выражают благодарность сотрудникам института В.В. Иванову, Д.С. Собачкину, Р.С. Собачкину, Н.М. Ковалевой за помощь в работе.

Для цитирования: Семенякин Д.А., Тихонова И.В. Использование многофакторного анализа данных в оценке состояния предварительного и последующего возобновления сосняков после выборочных рубок // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 33–51. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-33-51>

Original article

The Use of Multivariate Data Analysis in Assessing the State of Advance and After-Regeneration of Pine Forests after Selective Felling

*Denis A. Semenyakin*¹, Candidate of Biology, Junior Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2102-0516>

*Irina V. Tikhonova*², Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [V-3735-2017](https://orcid.org/0000-0001-6929-9491), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6929-9491>

¹Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; denis8880@inbox.ru

²West-Siberian Branch of V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, ul. Zhukovskogo, 100/1, Novosibirsk, 630082, Russian Federation; selection@ksc.krasn.ru

Received on October 14, 2021 / Approved after reviewing on January 19, 2022 / Accepted on January 23, 2022

Abstract. A research of qualitative and quantitative characteristics of regeneration after the first selective felling with an intensity of 20 to 50 % in pine forests of the northern part of the Krasnoyarsk forest-steppe has been carried out. Some of the plantations were covered by a ground fire 5 to 10 years before the felling. The aim of this research is a generalized analysis of the regeneration state in view of the forest type, the density of forest stand and exposure to fire before felling, as well as the disturbance of soil cover, the state of forest live cover and the microclimatic conditions in the felling areas. The methods of principal component analysis as well as correlation analysis and variance analysis for individual characteristics have been used. The advantages of multivariate data analysis using the method of principal component analysis for obtaining more information on the contribution and combined effects of various environmental factors on pine regeneration in felling areas are shown. The share of explained variance of the considered factors has equaled 87 %. The most significant factors for pine regeneration have turned out to be the type of forest (felling area) and exposure to fire. The second place in terms of importance has been taken by the density of forest stand before felling and the intensity of felling. Of the factors mediated by them, illumination intensity and



soil moisture have turned out to be important. Based on the characteristics of the 4 main components, 2 options for combining the main factors for better regeneration of plantations have been established: 1) the large initial density of mature forest stands, as well as the moderate development of mosses and grasses in forest live cover make it possible to choose any felling intensity (within the studied limits), preferably in combination with preliminary burning of a part of the litter (or partial soil mineralization) 5 years before moderately-high or high intensity felling, 2) in case of lower initial density of the forest stand in forest types with significant development of forest live cover, preliminary burning of part of the litter or mineralization of the soil and the choice of a lower intensity of the the first felling (up to 20 %) are required. Analysis of the variability of linear increases in height-and-age groups of undergrowth confirmed the conclusions drawn from the analysis of the quantity and quality of regeneration, showed differences in the response of different groups of undergrowth to changes in microclimatic conditions in felling areas. The similarity of the northern forest-steppe with the southern taiga in terms of pine regeneration conditions has been noted. The results of the study can be used to clarify the requirements for felling and achieve better regeneration of pine forests.

Keywords: ecological forest science, pine forest regeneration, complex analysis of pine forest regeneration, northern forest-steppe, improvement felling, conversion felling

Acknowledgements: This research was carried out as part of a budget project of Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” no. 0287-2022-0010. The authors are grateful for the help in work to the following employees of the institute: V.V. Ivanov, D.S. Sobachkin, and N.M. Kovaleva.

For citation: Semenyakin D.A., Tikhonova I.V. The Use of Multivariate Data Analysis in Assessing the State of Advance and After-Regeneration of Pine Forests after Selective Felling. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 33–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-33-51>

Введение

Сосняки лесостепей подвержены значительной антропогенной нагрузке. Их доля в северной части Красноярской лесостепи невелика, преобладают вторичные березовые и сосново-березовые леса. Лесистость района – в среднем 30 %. Из-за рубок и пожаров большая часть лесов представлена одновозрастными насаждениями. В частности, в Погорельском бору сосняки занимают 68 % площади (29 % – березняки), в т. ч. одновозрастные 100–120-летние насаждения – 45 %. Такой возрастной состав, значительная доля березняков, рекреационная нагрузка на живой напочвенный покров (ЖНП), более короткий оборот рубки, свойственные пригородным лесам, ведут к увеличению рисков для полноценного возобновления сосняков и меньшей потенциальной устойчивости насаждений [5, 7, 19, 31]. Учитывая эти обстоятельства, а также средообразующее и хозяйственное значение сосновых лесов, особенно важно иметь полную объективную информацию о влиянии лесопользования на возобновление сосняков и на ее основе подбирать оптимальные способы рубки, обеспечивающие надежное и качественное возобновление хвойных лесов.

Действующими правилами в защитных лесах разрешены только рубки ухода (в их числе – рубки обновления и переформирования) [22]. В условиях лесостепей в настоящее время лесозаготовителям рекомендованы к использованию несплошные постепенные рубки, т. к. они позволяют сохранить часть семенных деревьев и лесной обстановки для возобновления основной породы [2, 3, 5, 8, 40, 43]. Однако применение выборочных рубок не всегда обеспечивает хорошее возобновление и устойчивость из-за недоучета местных лесорастительных

условий, наличия или отсутствия предварительного возобновления основной и сопутствующей породы, состояния ЖНП, урожайности семян деревьев накануне рубки и др. [2, 14, 30, 33, 42]. Даже в таежной зоне рубки нередко приводят к смене хвойных малоценными лиственными породами, затягиванию процессов лесовосстановления, большим пожарам, ветровалам, а в некоторых случаях – к эрозии почв, образованию пустырей, пересыханию мелких рек, заболачиванию [6, 18, 23, 31, 34, 37]. Справедливой критике подвергается практика постепенного сокращения возраста спелости древостоя и его отведения под рубку, недостаточного для полноценного воспроизводства поколений леса [31]. В решении этого вопроса ориентиром, на наш взгляд, мог бы служить период стабилизации роста естественных сосновых древостоев разных бонитетов – от 100–110 до 130–140 лет [12].

Несмотря на то, что для изучения процессов возобновления сосняков после рубок, в т. ч. в условиях лесостепей, сделано немало, остается ряд нерешенных вопросов. Одна из причин этого – большое разнообразие лесорастительных условий: определенные методические трудности при сравнении вариантов опыта возникают в связи с отсутствием 2 идентичных по характеристикам естественных насаждений, влиянием на возобновление основной породы не только варианта рубки, но и множества неучтенных естественно-исторических факторов.

Цель – комплексная оценка влияния 1-го приема 2-приемной выборочной рубки разной интенсивности, а также предваряющих рубку и последующих характеристик насаждений, микроклиматических условий, сформировавшихся на опытных участках сосняков после рубки в Погорельском бору Красноярской лесостепи.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в Погорельском бору, его площадь 1992 га, условия произрастания сосняков типичны для сосновых боров Красноярской лесостепи. Бор расположен в 40 км от г. Красноярска на водоразделе с небольшими уклонами (2–3°, абсолютная высота – 280 м над ур. м.), основа рельефа (от увалистого до микрозападного и выположенного) – покровное галечниковое плато, преобладают дерново-подзолистые почвы. Климат резко континентальный, умеренно холодный, умеренно засушливый: в годы исследования индекс континентальности изменялся от 80 до 89, среднегодовая температура – от –0,6 °С до +2,3 °С, среднегодовое количество осадков – от 410 до 595 мм (рис. 1).

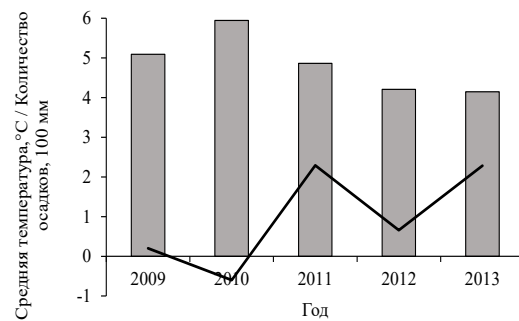


Рис. 1. Динамика среднегодовых температуры воздуха — и суммы осадков ■ в районе исследования в 2009–2013 гг. по данным метеостанции «Красноярск»

Fig. 1. Dynamics of average annual air temperature — and total precipitation ■ in 2009–2013 in the study area according to the «Krasnoyarsk» weather station

Объектами исследования были чистые по составу 100–120-летние разнотравно-зеленомошные и бруснично-разнотравно-зеленомошные высокополнотные сосняки послепожарного происхождения, растущие на дерново-подзолистых легкосуглинистых и супесчаных почвах, полнота – 1,0–1,2, средний диаметр ствола – 30–39 см, высота – 25–30 м, запас – 372–570 м³/га. Заложено 6 постоянных пробных площадей размером 0,5–0,8 га. Первый прием экспериментальной выборочной рубки интенсивностью 20, 30, 35 и 50 % по запасу был проведен зимой 2008–2009 гг. Рубка выполнена методом узких лент шириной 30–40 м, соответствующей 3/2 средней высоты древостоя (пасека), ширина волока – 5–7 м. Использованы бензодвигательные пилы Stihl-360 и Stihl-250 для валки деревьев и обрезки сучьев; трактора, колесный МТЗ-82 и гусеничный ТТ-4, для трелевки хлыстов.

На каждой пробной площади учитывали сохранность предварительного и последующего возобновления (%), встречаемость подроста (%), количество и жизненное состояние предварительной и последующей генераций естественного возобновления. Учет количества и качества возобновления проводили с 2009 по 2013 гг. 3 раза (в год рубки, через 3 и 5 лет после нее) на площадках 1 и 2 м² (42–80 площадок для каждой пробной площади), размещенных на волоках и пасеках перпендикулярно длинной стороне пробной площади. При анализе данных в дальнейшем рассматривали только здоровые и ослабленные растения по 5 высотным группам: всходы, самосев (до 0,1 м), подрост (мелкий – до 0,5 м, средний – 0,5–1,5 м, крупный – более 1,5 м) – согласно шкале оценки естественного возобновления главных пород [23]. Возраст мелкого подроста составил 5–12 лет, среднего – 8–17 лет, крупного – 13–21 год. Ввиду разного распределения высотно-возрастных групп возобновления сосны на участках для их сравнения рассчитывали также число условно крупного подроста с коэффициентами 0,5 и 0,75 для пересчета количества соответственно мелкого и среднего подроста в условно крупный подрост. У 330 моделей 3 групп подроста были измерены линейные приросты стволика за последние 5–10 лет. Для определения качества возобновления использовали метод оценки жизненного состояния в каждой представленной высотной группе подроста: здоровый – 1-я категория, ослабленный – 2-я, усыхающий – 3-я, сухой – 4-я.

Определяли степень захламленности поверхности почвы, нарушенности почвы и ЖНП, его численность, видовой состав, фитомассу и состояние. Степень захламленности поверхности почвы и ее нарушенности оценивали в год рубки соответственно по относительной площади, покрытой порубочными остатками, и доле площадок с поврежденным почвенным покровом от общего числа учетных площадок, выделяя 4 категории: от незахламленной/ненарушенной поверхности (до 20 %) и слабоминерализованной/слабозахламленной (30–40 %) до средне- и сильнозахламленной / средне- и сильноминерализованной (50–70 и 80–100 % соответственно). Видовой состав и фитомассу ЖНП на каждом участке определяли на 20 площадках по 1 м² (отдельно на пасеке и волоке по 10 шт.) через 1 год и через 5 лет после рубки.

Измерения освещенности проводили над вершинами подроста на высоте 1,5 м через 1–2 м в безоблачную погоду с 12:00 до 14:00 относительно открытого места. В течение 5 дней в сухую ясную погоду с 12:00 до 14:00 фиксировали температуру и влажность воздуха на высоте 10 см и 2 м, подстилки, порубочных

остатков и почвы на поверхности, в подстилке и на глубине почвы 0–10 см в 5-кратной повторности. Влажность воздуха определяли с помощью аспирационного психрометра Ассмана, почвы и подстилки – весовым методом и высушиванием образцов в сушильном шкафу в течение 6–12 ч при температуре 105 °С до абсолютно сухой массы.

Поскольку в районе исследования доминирующие вейники, осочки и мхи в сообществах с высокими проективным покрытием и фитомассой ЖНП нередко препятствуют появлению и сохранению всходов сосны после рубок и пожаров, а брусника, багульник, рододендрон, лишайники, кипрей и ряд других видов, относимых к мелкому разнотравью, наоборот, благоприятствуют сохранению возобновления [4, 14, 18, 21, 23, 25], была сделана качественная оценка состава растительности на вырубках. Типу леса на каждой пробной площади присваивали баллы: 1 – в ЖНП преобладают вейники, мхи и осочки; 2 – доля мхов, осоки и вейников не превышает 40–50 %; 3 – преобладают кустарнички (брусника, черника), разнотравье (мелкое разнотравье и кипрей), мхов – до 40 %. Оценки для каждого участка приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика сосняков на исследованных экспериментальных участках до и после рубки
Characteristics of pine forests in the experimental study areas before and after felling

Уча- сток	Тип леса / вырубки	Состав древостоя	Густота, шт./га	Полнота	Интен- сивность рубки	Встречаемость подроста (до/после рубки)
			(до/после рубки)			
P1	P-з ² / p-в-з ²	10С	390/290	1,1/0,8	35	48/55
P2*	Ч-б-р-з ³ / б-в-з-р ³	10С	310/220	1,0/0,7	35	67/85
P3*	Б-р-з ³ / б-в-р ³	10С	400/230	1,0/0,5	50	73/81
P4*	Б-р-з ³ / в-р-б ³	10С	430/300	1,0/0,7	35	76/88
P5	P-з ² / p-в-з ¹	10СедБ	420/310	1,1/0,8	30	57/62
P7*	Б-р-з ³ / б-з-р ³	10С	650/530	1,2/1,0	20	75/90
К	P-з ²	10С	440	1,2	–	65

Примечание: К – контроль; р – разнотравный, з – зеленомошный, в – вейниковый, ч – черничный, б – брусничный; ¹⁻³ – качественная оценка типа леса (вырубки). * За 5 и 10 лет до рубки участок пройден низовым пожаром.

Летом 3 раза в самый жаркий месяц года измеряли температуру и влажность в верхнем слое почвы 5–10 см, на поверхности почвы, в подстилке и на высоте 2 м, а также относительную (к открытому месту) освещенность с помощью люксметра в 10-кратной повторности. Использовали метеорологические данные метеостанции «Красноярск». Статистическую обработку данных проводили в программах Excel и Statistica, применяя корреляционный, дисперсионный и многофакторный анализ (метод главных компонент) [10]. Метод главных компонент позволяет, наряду с множеством других возможностей, установить характер и степень влияния внешних и внутренних факторов на количество и качество объектов, их распределение в пространстве, динамику, а также отобрать наиболее значимые из них [10]. Он, как и другие методы многомерного анализа, применяется также для решения лесоводственных задач [38, 41].

Результаты исследования и их обсуждение

Условия для естественного возобновления сосны в Погорельском бору. Как показали результаты обследования участков до рубки, численность жизнеспособного (без усыхающих и сухих экземпляров) подроста составляла 4,3–10,2 тыс. шт./га. Соответственно, значительная часть обследованных древостоев с преобладающим возрастом деревьев 110–120 лет, несмотря на высокую полноту, потенциально готова к появлению возобновления с периодичностью 3–5 лет, постепенно отмирающего в условиях недостаточного освещения. Высокие количественные показатели возобновления естественных спелых сосняков приводятся для многих таежных лесорастительных районов Сибири, в т. ч. для Красноярской лесостепи [4, 6, 11, 15, 23, 25, 30]. Недостаточное возобновление отмечается в спелых насаждениях ленточных лесостепных боров Западной Сибири [2, 14, 27].

Пробные площади до рубки различались по густоте, полноте и запасу древостоев, обилию и состоянию предварительного возобновления (табл. 1, рис. 2). После рубки относительная полнота древостоев уменьшилась до 0,5–1,0, густота – до 220–530 дер./га, запас – до 177–408 м³/га.

Рис. 2. Численность возобновления на участках в Погорельском бору: возобновление (1), в т. ч. подрост (2), до рубки; возобновление (3), в т. ч. подрост (4) и условно крупный подрост (5), после рубки

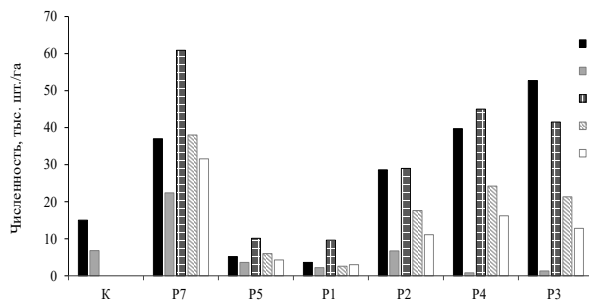


Fig. 2. The number of regeneration in the areas of Pogorelsky pine forest: regeneration (1), including undergrowth (2), before felling; regeneration (3), including undergrowth (4) and conditionally large undergrowth (5) after felling

Известно, что наилучшее возобновление сосны наблюдается при сомкнутости материнского полога 0,6–0,7 [6, 23]. Оптимальное освещение для появления всходов и роста сеянцев и подроста сосны под пологом леса составляет 25–50 % по сравнению с открытым местом, влажность подстилки – 15–25 % [20, 25, 45]. Лучшее состояние подроста сосны в засушливых условиях лесостепи отмечено в экотопах с определенной разницей температур воздуха и почвы, что обеспечивается оптимальным затенением почвы кронами деревьев, подстилкой и травяной растительностью, после полного удаления которых сокращается численность и рост возобновления вследствие иссушения или вымораживания почвы [20, 27, 41].

На исследуемых участках после рубки относительная освещенность увеличилась с 23 до 40–62 % на пасаках и до 42–74 % на волоках, температура воздуха на высоте 2 м, в подстилке и почве в июле повысилась на 1–4 °C по сравнению с контролем, температура подстилки (порубочных остатков) была на 6–9, а почвы – на 8–11 °C ниже, чем температура воздуха на высоте крупного подроста (табл. 2). Влажность приземного слоя воздуха – 57–66 % на пасаках и 58–70 % на волоках – изменялась без определенной тенденции к росту или уменьшению на разных участ-

ках. Влажность подстилки на пасаках в среднем составляла 40–48 % (на волоках – 41–51 %), влажность почвы – 12–18 % на пасаках и 13–20 % на волоках. Исходя из приведенных характеристик оптимума, сложившиеся условия в целом можно считать достаточно благоприятными для возобновления сосны на дерново-подзолистых суглинистых и супесчаных почвах.

Состояние возобновления на экспериментальных участках. Так как рубки проводились зимой, сохранилась большая часть подроста (66–75 %), ЖНП и почвенного покрова (70–78 %), захламленность порубочными остатками на всех участках была невысокой (20–34 % средне- и сильнозахламленных площадок). В течение 3–5 лет после рубки фитомасса ЖНП быстро восстановилась. На пасаках исследуемых участков она варьировала от 130 до 210 г/м², на участке P2 составила 570 г/м², на волоках – от 122 до 153 (260 – для P2) г/м². На участках P1–P5 в травяном покрове увеличилась доля вейников (*Calamagrostis arundinacea* и *C. epigeios*) и разнотравья (с преобладанием кипрея).

Таблица 2

Температура и влажность в приземном слое воздуха на высоте 2 м, в подстилке/ порубочных остатках, в верхнем слое почвы на экспериментальных участках Погорельского бора в июле 2013 г.
Temperature and humidity in the bottom layer of air at a height of 2 m, in litter/ felling residues, in the top layer of soil in the experimental areas of the Pogorelskiy pine forest in July 2013

Уча- сток	Температура, °С			Влажность			Освещенность
	воздуха на высоте 2 м	под- стилки	почвы	воздуха на высоте 2 м	под- стилки	почвы	
%							
<i>Пасака</i>							
К	22,9	14,3	12,8	65	42	13	22,6
P1	23,8	18,0	13,0	66	44	13	41,8
P2	22,5	15,3	12,2	64	48	16	37,5
P3	24,0	18,1	15,7	64	41	18	62,4
P4	23,7	17,5	14,1	57	40	14	48,3
P5	25,6	18,6	15,8	66	42	13	58,0
P7	22,4	14,2	12,3	65	47	12	21,1
<i>Волок</i>							
P1	24,3	18,0	13,0	60	41	17	45,3
P2	23,2	15,7	12,1	63	44	15	41,7
P3	25,8	18,8	15,7	58	50	20	73,6
P4	23,9	15,4	13,2	59	51	13	56,2
P5	25,0	17,1	13,4	70	43	17	51,5
P7	–	–	–	–	–	–	–

В течение 5 лет после рубки на всех участках появилось возобновление. При этом на волоках было значительно меньше подроста, но в 3 раза больше всходов и самосева, чем на пасаках. На участке с высокой интенсивностью рубки (P3) в 1-е два года после рубки наблюдалось достоверно большее сокращение числа подроста предварительной генерации по сравнению с остальными участками ($p < 0,038$), а лучшие сохранность и состояние подроста отмечены после

рубков меньшей интенсивности ($r = -0,64$ и $-0,57$). Через 5 лет после рубки пробные площади достоверно различались по числу всходов и самосева ($p < 0,050$), по числу условно крупного подроста ($p < 0,0003$). Следует отметить, что на участках P2–P4, P7 соответственно за 5 и 10 лет до рубки прошел низовой пожар, уничтоживший подрост и вызвавший появление большого числа всходов и самосева, чем во многом объясняются различия между указанными участками в возрастном составе возобновления. К моменту рубки численность жизнеспособного возобновления сосны на этих участках достигла 24–52 тыс. шт./га, а после рубки увеличилась до 29–61 тыс. шт./га. На участках P1 и P5 на стволах деревьев также были видны следы нагара от старого низового пожара, прошедшего, предположительно, 25–30 лет назад, после рубки численность возобновления сосны на них увеличилась с 3,6 до 9,4 тыс. шт./га и с 5,2 до 10,1 тыс. шт./га соответственно (рис. 2). Встречаемость подроста после рубки составила 55–90 % (табл. 1): на 4 участках из 6 подрост относительно равномерно распределен по площади.

Корреляционный анализ данных подтвердил достоверное сокращение суммарной численности возобновления через 5 лет после рубки с увеличением доли вейников ($r = -0,43$) и рост численности мелкого подроста с повышением доли брусники и кипрея ($r = 0,51$ и $0,48$) в составе ЖНП, что согласуется с результатами многих исследований, проведенных в разных природно-климатических условиях [1, 6, 14, 16, 21, 23, 25, 29, 40].

Многофакторный анализ данных. Как видно из рис. 2, низовой пожар оказал сильное стимулирующее воздействие на возобновление сосны до рубки. При помощи стандартных методов статистического анализа данных сложно отделить от такого мощного фактора другие и оценить их влияние, т. к. только 1–2 из них можно управлять для закладки опыта с повторностями и проведения, например, 4-факторного дисперсионного анализа, чтобы определить долю воздействия каждого фактора. Трудно также ответить на вопрос, что стало причиной лучших показателей возобновления на участке P7 – низкая интенсивность рубки или большая продолжительность послепожарного периода до рубки.

Для установления взаимосвязей между всеми показателями (зависимыми и независимыми переменными) был использован метод главных компонент (множественных факторов). Выделено 4 главных компоненты, объясняющих 87 % изменчивости данных (табл. 3). Согласно коэффициентам при 1-й главной компоненте с наибольшим весом (37 %), увеличение интенсивности рубки в сочетании с предварительным огневым воздействием в лучших типах леса и вырубке (по качественным характеристикам состава ЖНП) не оказывает угнетающего воздействия на возобновление в древостоях большей густоты до рубки – наблюдается увеличение числа жизнеспособного возобновления сосны всех возрастных групп в периоды до и через 5 лет после рубки.

Вторая главная компонента (28 %) выявила следующую зависимость: в более редких древостоях, не пройденных низовым пожаром, увеличение интенсивности рубки ведет к росту освещенности и массы ЖНП, температуры и влажности подстилки и почвы, но при этом численность возобновления (особенно подроста) сокращается до и после рубки.

Третья главная компонента (13 %) показала, что предварительное воздействие огня на напочвенный покров и проведение рубки меньшей интенсивности в более редких древостоях, даже с преобладанием в составе растительности мхов и злаков, сопровождается увеличением численности возобновления до и после рубки, а также большей равномерностью его распределения на площади.

Таблица 3

**Характеристика главных компонент при оценке возобновления сосняков
Погорельского бора**
**Characteristics of the main components in assessing the regeneration of pines
in the Pogorelskiy pine forest**

Показатель	Компонента			
	1	2	3	4
Тип леса*	0,754	0,071	-0,471	0,016
Тип вырубki**	0,858	-0,123	-0,610	-0,204
Густота древостоя*	0,398	-0,758	-0,628	0,167
Интенсивность рубки	0,451	0,723	-0,365	0,506
Воздействие огня*	0,906	-0,446	0,523	-0,032
Освещенность**	0,299	0,735	0,440	0,423
Фитомасса ЖНП**	-0,127	0,519	0,205	-0,427
Температура подстилки/порубочных остатков**	-0,522	0,470	-0,429	0,317
Температура почвы**	0,043	0,609	-0,317	0,240
Влажность подстилки/порубочных остатков**	0,382	0,614	-0,530	0,338
Влажность почвы**	0,467	0,785	-0,018	0,219
Подрост*	0,260	-0,887	0,431	-0,154
Самосев*	0,893	0,281	0,586	-0,085
Подрост**	0,702	-0,572	0,511	-0,457
Самосев**	0,815	-0,390	0,378	0,580
Встречаемость подростa*	0,724	-0,212	0,489	0,023
Встречаемость подростa**	0,566	-0,348	0,332	-0,541
Общая дисперсия	6,33	4,81	2,11	1,43
Доля общей дисперсии, %	37,2	28,3	13,0	8,4

*, ** До и после рубки соответственно.

Четвертая главная компонента (9 %) дополнила 1-ю и установила связи между увеличением интенсивности рубки с одной стороны и повышением освещенности, температуры почвы, уменьшением массы ЖНП и количества подростa, но увеличением числа всходов и самосева после рубки с другой. Очевидно, это также относится к волокaм, которые были включены в анализ наряду с пaсеками. Появление большого числа самосева на волокaх отмечали исследователи [6, 25, 26].

Проведенный анализ позволил отобрать наиболее значимые факторы для качества возобновления сосны на вырубках в Погорельском бору, установить эффекты их совместного влияния, а также оценить относительный вклад и достоверность влияния каждого из них. В целом результаты подтвердили наибольшее (определяющее) значение низового пожара, а также типа леса (и типа вырубki) для возобновления сосны на исследуемых участках Погорельского бора (1-я компонента). Следующими по значимости являются исходная густота древостоя и интенсивность рубки (2-я компонента). Фактор «интенсивность рубки» включается в характеристики 1–4-й главных компонент. Как видно из табл. 3, влияние относительного показателя интенсивности рубки неотделимо от воздействия исходной густоты древостоя (в 1–3-й главных компонентах), вместе они форми-

руют условия освещения и степень развития ЖНП, что согласуется с выводами ряда авторов [17, 22, 24, 41]. Вовлечение в анализ других показателей – освещенности, влажности почвы – тоже существенно, однако самостоятельного значения для района исследований они не имеют и опосредованы изменением основных характеристик. Наиболее значимые факторы вместе объясняют около 67 % изменчивости численности возобновления на вырубках, в т. ч. примерно 24 % обусловлено влиянием пожара, 21 % – типом леса и вырубке, 13 % – густотой древостоя, 9 % – интенсивностью рубки.

Следует также отметить, что в результате этого исследования был сделан вывод о том, что сохранность предварительного возобновления обратно коррелирована с численностью последующего возобновления: с увеличением интенсивности рубки больше повреждается подрост, но складываются условия, благоприятные для появления и роста всходов и самосева. Это естественно и обнаруживается при сравнении наиболее подходящих условий для 1-х стадий развития молодого поколения сосны [25]. Однако установление такой связи, недостоверной по результатам корреляционного анализа, с помощью метода главных компонент свидетельствует о возможности использования данного метода в разделении реакции лесных экосистем в ответ на влияние множества факторов.

Корреляции годовых линейных приростов возобновления с погодными условиями Красноярской лесостепи. Количественные и качественные показатели возобновления, линейный рост подроста – это разные проявления реакции лесных фитоценозов на изменение условий среды. Анализ динамики развития подроста и связи этого явления с погодными условиями позволил сравнить особенности изменения условий роста на участках в течение всего периода исследований в отличие от данных по микроклиматическим наблюдениям только за июль. Результаты корреляционного анализа подтвердили разные требования возрастных групп подроста к условиям произрастания. На участках, пройденных выборочными рубками, прирост подроста был тесно связан со среднегодовой температурой воздуха ($r = 0,74-0,90$, $p < 0,001$), со средними температурами января, февраля, мая–сентября ($r = 0,63-0,85$, $p < 0,001$), с годовым индексом сухости ($r = 0,81-0,98$, $p < 0,001$). При этом коэффициенты корреляции линейных приростов с климатическими характеристиками у разных возрастных групп подроста различались по знаку. Например, достоверно отрицательно с годовой суммой осадков коррелировали приросты мелкого подроста ($r = -0,67...-0,95$, $p < 0,001$) и, частично, среднего ($r = -0,93-0,91$, $p < 0,38-0,001$). Наоборот, приросты крупного подроста положительно связаны с суммами осадков месяцев вегетации ($r = 0,50-0,92$, $p < 0,05-0,001$) и за год ($r = 0,71-0,99$, $p < 0,001$). Для мелкого подроста коэффициент корреляции приростов со среднегодовой температурой составил $r = 0,78$ ($p < 0,001$), он имел отрицательные значения при сравнении с температурой первых месяцев вегетации – апреля, мая, когда рост и транспирация растений с неглубокой корневой системой начинаются при замерзшей почве ($r = -0,71...-0,82$, $p < 0,001$). Средний подрост, менее чувствительный к высоким температурам вегетационного периода, отличался положительной связью со среднегодовой температурой воздуха ($r = 0,74$, $p < 0,001$) и средними температурами всех месяцев вегетационного сезона на экспериментальных участках ($r = 0,60-0,89$,

$p < 0,05-0,001$). У крупного подроста корреляции с температурами тех же месяцев изменялись от $-0,72$ до $0,51$ ($p < 0,85-0,001$) и отличались большей индивидуальной изменчивостью, что, по-видимому, связано с его вступлением в период интенсивного роста и большим участием в совместном развитии групп подроста.

Возрастные группы подроста различались также по тесноте корреляции между линейными приростами и условиями вегетационного сезона на разных участках. Например, у мелкого подроста на участках P1 и P5, не пройденных пожаром, линейный прирост увеличивался с повышением температуры в апреле и мае ($r = 0,59-0,82$), а на участках P3 и P4 – с повышением температуры в июне и августе ($r = 0,69-0,75$). На наш взгляд, это связано с разницей между участками по времени схода снежного покрова и оттаивания почвы, более ранних на P1 и P5, вследствие множества возможных причин (от неодинакового механического состава почвы до состава и массы ЖНП и густоты/сомкнутости крон древостоя). Кроме того, приросты мелкого подроста более тесно коррелируют с суммами осадков месяцев вегетации на всех пробных площадях, а среднего и крупного – только на 3. Интересно, что для крупного подроста наиболее тесная связь прироста с температурами вегетационного сезона установлена на участке P3, это подтверждает более мягкое влияние климата на подрост в малонарушенных лесах по сравнению с действием на подрост вырубок большей интенсивности.

У лесоводов сложилось двойственное отношение к пожарам и их роли в возобновлении сосняков: на юге они нередко приводят к иссушению почвы и образованию остепненных пустошей [14, 34], а в таежной зоне, особенно на вечной мерзлоте, наоборот, лучшее возобновление отмечается при более сильном прогревании почвы и удалении (выгорании) подстилки [1, 11, 16, 26, 28, 30], поэтому рубку там рекомендуют проводить летом, чтобы обеспечить большую минерализацию поверхности почвы [8, 14]. Частичную минерализацию поверхности почвы используют в качестве аналога контролируемому выжиганию как методу содействия естественному возобновлению [6, 8, 14, 25, 26, 36], но для лучшего результата минерализацию надо проводить в годы с наивысшим урожаем семян и в сроки перед опадением семян [9], при этом оставлять достаточное число семенных деревьев [4, 6, 14, 21]. Учитывая эколого-географические условия местности, можно приблизительно рассчитать процентное соотношение выжигания либо минерализации и прочих дополнительных условий стимулирования возобновления. В связи с этим одной из задач данного исследования было уточнить положение Погорельского бора в экологическом ряду условий возобновления сосняков.

Красноярская лесостепь расположена на широте, соответствующей зоне южной тайги, окружена ею и занимает промежуточное положение между двумя крайними характеристиками возобновления хвойных лесов по соотношению тепло- и влагообеспеченности. Результаты проведенной работы показали сильное стимулирующее влияние огня невысокой интенсивности на возобновление сосны в условиях северной лесостепи, что отмечали исследователи [1, 16, 25], в т. ч. проводившие экспериментальные выжигания [11, 15, 46]. При этом более равномерным распределением по площади и лучшим состоянием отличались появившиеся в большом числе до рубки всходы и самосев в сосняках бруснично-разнотравных, на всех 4 участках, пройденных низовым пожаром 5–10-летней давности. Анализ изменчивости линейных приростов подроста также подтвердил недостаток тепла и избыток влаги для мелкого подроста.

То есть данные свидетельствуют о большей близости условий произрастания в Погорельском бору к условиям южной тайги, чем к южной лесостепи.

Выборочные рубки в Погорельском бору активизируют процессы возобновления сосняков, хотя их вклад из 4 основных факторов оказался наименьшим. По мнению некоторых исследователей, в условиях лесостепи разреживание само по себе не приводит к появлению достаточного возобновления сосны [2, 14, 30], это подтверждают также результаты нашей работы, здесь требуется дополнительная минерализация почвы.

Таким образом, используя методы многомерного анализа данных, можно уточнить алгоритм планирования лесохозяйственных мероприятий для разных сочетаний исходных параметров лесных фитоценозов, уменьшить связанные с рубками экологические риски, повысить качество возобновления, особенно когда исследование проводится с участием множества нерегулируемых факторов.

Чтобы выбрать лучший вариант решения проблемы повышения устойчивости одновозрастных насаждений Погорельского бора, на наш взгляд, целесообразно проведение дополнительного исследования возобновления с использованием следующих вариантов рубки обновления и переформирования спелых одновозрастных древостоев: 1) 2-приемная рубка через 15–20 лет методом сплошных узких 30-метровых лент на пасаках шириной 100–150 м (чересполосно-постепенная или групповая выборка), более удобная для осуществления лесоводственных мероприятий по сравнению с равномерно-выборочной; 2) равномерно-выборочная в 2 приема с интервалом 5 лет на пасаках шириной 30 м, но с перерывом 20 лет между разными участками для формирования группово-разновозрастных древостоев (в разных масштабах площади для 2 предлагаемых вариантов). Учитывая, что возобновление на волоках в несколько раз выше, чем на пасаках, для его сохранения целесообразно во 2-й прием рубки новые волокна размещать посередине пасаек, а прежние оставлять нетронутыми. Это позволит в 1-м варианте ограничиться одним приемом рубки для конкретных площадей, т. к. каждый из последующих приемов равномерно-выборочной рубки неизбежно приведет к сокращению численности возобновления и сведет на нет все усилия предыдущего этапа по стимулированию возобновления, потребует новых затрат, растянет период восстановления, сократит генетическое разнообразие нового поколения леса [29]. Во 2-м варианте период между рубками уменьшен по той же причине – чтобы снизить потери крупного подроста, который хуже приспосабливается к резкой смене условий. Достаточно обоснованно для целей устойчивого лесоводства предложение некоторых лесоводов использовать дифференцированный подход в определении пространственного размещения и периодичности рубки, исходя из структуры и режима естественных повреждений в малонарушенных лесах, особенно к тем участкам бореальных лесов, где пожары благоприятствуют развитию одновозрастных насаждений [9, 13, 16, 19, 25, 32, 35, 37, 39, 44].

Заключение

Использование одного из вариантов многофакторного анализа – метода главных компонент – для оценки совместного влияния разных факторов на возобновление сосны в сосняках Красноярской лесостепи позволило выявить несколько комплексных, не коррелированных между собой главных компонент и подобрать их лучшие сочетания для достижения полноценного возобновления

сосны на вырубках при разных исходных параметрах насаждений. В частности, установлено, что низовой пожар за 5–10 лет до рубки оказывает в 2,5 раза большее стимулирующее воздействие на возобновление сосны, чем рубка, вместе с типом леса они объясняют превосходящую часть изменчивости численности возобновления на участках. Различия по численности и встречаемости возобновления между участками, пройденными пожаром за 5–10 и 25–30 лет до рубки, свидетельствуют о быстром ослабевании со временем стимулирующего действия огня и усыхании преобладающей части послепожарного возобновления, если не происходит увеличения освещенности. Так как мелкий подрост лучше адаптируется к изменениям условий после рубки, оптимальный период проведения работ по содействию естественному возобновлению – 3–5 лет до рубки, а промежутков между приемами равномерно-выборочной рубки – 5 лет.

Интенсивность рубки тесно связана с исходной густотой древостоя, и последнюю необходимо учитывать в прогнозах последствий выборочных рубок для возобновления насаждений и при определении интенсивности рубки. В более редких спелых (возможно, ранее прореженных рубками ухода) древостоях со значительным развитием живого напочвенного покрова (видов, препятствующих возобновлению) необходимо использовать приемы стимулирования возобновления. Здесь требуется приложение определенных усилий по обеспечению оптимальной для возобновления сосны доли сохраненной подстилки и живого напочвенного покрова.

Совокупную реакцию возобновления сосны на изменение внешних факторов можно применять в качестве биоиндикатора, который свидетельствует, что в экологическом ряду условий возобновления сосняков северная Красноярская лесостепь имеет сходство с южной тайгой и существенно отличается от южной лесостепи. Поэтому для данных условий лучше подходят приемы содействия естественному возобновлению, используемые в южной тайге, но с учетом принадлежности к защитной категории пригородных лесов и большой доли березняков в составе насаждений. Отмечено, что климатические условия Красноярской лесостепи достаточно благоприятны для возобновления сосны, но недостаток тепла наряду с избытком влаги в почве ограничивает развитие мелкого подроста.

Для лучшего возобновления сосняков в Красноярской лесостепи, сокращения периода лесовосстановления на конкретных участках, уменьшения затрат и негативных последствий рубок (переуплотнение почвы, неоднократные повреждения подроста), удобства проведения лесоводственных мероприятий и формирования группово-разновозрастной структуры древостоев предлагается провести исследования с использованием других вариантов рубок обновления и переформирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алесенков Ю.М. Особенности лесовозобновительного процесса после рубок леса в Северном Зауралье // Аграр. вестн. Урала. 2008. № 12(54). С. 77–81.
Alesenkov Yu. M. Particularities of Wood Renewing Process after Chopping Wood in North Zauralie. *Agrarnyj vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2008, no. 12(54), pp. 77–81. (In Russ.).

2. Башегуров К.А., Залесова Е.С., Толстиков А.Ю., Усов М.В. Последствия группово-выборочных рубок в сосняках ленточных боров Алтая // Успехи соврем. естествознания. 2019. № 9. С. 13–18.

Bashegurov K.A., Zalesova E.S., Tolstikov A.Yu., Usov M.V. Consequence of Group-Selective Felling in Stripe Pine Forests of Altay. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances of Modern Natural Science, 2019, no. 9, pp. 13–18. (In Russ.).

3. Бобров Р.В. Несплошные рубки в лесах РСФСР // Лесн. хоз-во. 1977. № 2. С. 34–37.

Bobrov R.V. Partial Cuttings in the Forests of the RSFUR. *Lesnoe khozyaistvo* = Russian Forestry, 1977, no. 2, pp. 34–37. (In Russ.).

4. Бугаева К.С., Оскорбин П.А. Послепожарная динамика лесных насаждений в Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2008. № 4. С. 28–33.

Bugaeva K.S., Oskorbin P.A. The Postfire Dynamics of Forest Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Russian Forest Sciences*, 2008, no. 4, pp. 28–33. (In Russ.).

5. Бузыкин А.И., Иванов В.В. Экологически безопасное лесопользование в бассейне озера Байкал // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2007. № 17. С. 106–109.

Buzykin A.I., Ivanov V.V. Environmentally Safe Forest Management in the Lake Baikal Basin. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* = Current Problems of the Forestry Complex, 2007, no. 17, pp. 106–109. (In Russ.).

6. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С. Возобновление и рост хвойных на вырубках южно-таежных лесов Среднего Приангарья // География и природ. ресурсы. 1997. № 3. С. 124–133.

Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S. Renewal and Growth of Conifers in Clearings of Southern Taiga Forests of the Middle Angara Region. *Geography and Natural Resources*, 1997, no. 3, pp. 124–133. (In Russ.).

7. Верхунов П.М. Генезис и возрастное строение современных сосновых лесов Сибири // Лесоводственные исследования в лесах Сибири: сб. ст. / отв. ред. канд. с.-х. наук Н.П. Поликарпов; АН СССР. Сиб. отд.-ние. Ин-т леса и древесины им. В.Н. Сукачева. Красноярск, 1970. Вып. 2. С. 7–58.

Verkhunov P.M. Genesis and Age Structure of Modern Pine Forests of Siberia. *Lesovodstvennye issledovaniya v lesakh Sibiri* = Silvicultural Research in the Forests of Siberia. 1970, iss. 2, pp. 7–58. (In Russ.).

8. Видякин А.И. Естественное возобновление сосны при проведении постепенных рубок в подзоне хвойно-широколиственных лесов Вятско-Камского междуречья // Аграр. вестн. Урала. 2012. № 11-1(103). С. 56–57.

Vidyakin A.I. Natural Regeneration of Pine at Carrying out Gradual Felling in Subzone of Mixed Coniferous Broad Leafed Forests in the Vyatka-Kama Interfluve. *Agrarnyy vestnik Urala*, 2012, no. 11-1(103), pp. 56–57. (In Russ.).

9. Денисов А.К. Естественному возобновлению – глубокий анализ и содействие // Лесн. хоз-во. 1984. № 11. С. 21–23.

Denisov A.K. Natural Regeneration – In-Depth Analysis and Assistance. *Lesnoe khozyaistvo* = Russian forestry, 1984, no. 11, pp. 21–23. (In Russ.).

10. Ефимов В.М., Ковалева В.Ю. Многомерный анализ биологических данных. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2007. 75 с.

Efimov V.M., Kovaleva V.Yu. Multivariate Analysis of Biological Data. Gorno-Altaiisk, RIO GAGU, 2007. 75 p. (In Russ.).

11. Жила С.В., Иванова Г.А., Иванов В.А., Цветков П.А. Лесовозобновление после пожаров разной интенсивности в сосняках Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2019. № 6. С. 53–62.

Zhila S.V., Ivanova G.A., Ivanov V.A., Tsvetkov P.A. Reforestation after Fires of Different Intensity in Pine Forests of Central Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2019, no. 6, pp. 53–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20190606>

12. Загреев В.В. Географические закономерности роста и продуктивности древостоев. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 240 с.

Zagreev V.V. Geographical Patterns of Growth and Productivity of Forest Stands. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 240 p. (In Russ.).

13. Иванов В.В., Кузьмичев В.В., Оскорбин П.А. Изменение структуры темнохвойных древостоев при выборочных рубках // Лесн. таксация и лесоустройство. 2005. № 2. С. 39–44. (In Russ.).

Ivanov V.V., Kuz'michev V.V., Oskorbin P.A. Changes in the Structure of Dark Coniferous Stands during Selective Felling. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroistvo* = Forest Taxation and Forest Management, 2005, no. 2, pp. 39–44. (In Russ.).

14. Ишутин Я.Н., Ключников М.В., Бушков Н.Т., Ильичев Ю.Н., Тараканов В.В., Маскаев В.Н. Применение генетически улучшенного посадочного материала при облесении вырубок в горельниках Приобских боров // Хвойные бореал. зоны. 2007. Т. 24, № 2-3. С. 187–192.

Ishutin Ya.N., Klyuchnikov M.V., Bushkov N.T., Il'ichev Yu.N., Tarakanov V.V., Maskaev V.N. The Use of Genetically Improved Planting Material for Afforestation of Clearings in the Burnt Forests of the Ob Forests. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Zone, 2007, vol. 24, no. 2-3, pp. 187–192. (In Russ.).

15. Ковалева Н.М., Собачкин Р.С., Екимова Е.Ю. Динамика нижних ярусов растительности после экспериментальных пожаров в сосновых древостоях // Сиб. лесн. журн. 2018. № 2. С. 61–70.

Kovaleva N.M., Sobachkin R.S., Ekimova E.Yu. Dynamics of Ground Layers after Experimental Fires in Pine Forests. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2018, no. 2, pp. 61–70. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15372/SJFS20180206>

16. Колесников Б.П., Санникова Н.С., Санников С.Н. Влияние низового пожара на структуру древостоя и возобновление древесных пород в сосняках черничном и бруснично-черничном // Горение и пожары в лесу: материалы координац. совещ., Красноярск, 18–22 мая 1971 г. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР, 1973. С. 301–321.

Kolesnikov B.P., Sannikova N.S., Sannikov S.N. The Influence of Ground Fire on the Structure of the Forest Stand and the Regeneration of Tree Species in Blueberry and Lingonberry-Blueberry Pine Forests. *Gorenie i pozhary v lesu* = Burning and Fires in the Forest. Krasnoyarsk, Izd-vo IFW SB AS USSR, 1973, pp. 301–321. (In Russ.).

17. Маслаков Е.Л. Эколого-ценотические факторы возобновления и формирования (организации) насаждений сосны: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Свердловск, 1981. 50 с.

Maslakov E.L. *Ecological and Cenotic Factors of Renewal and Formation (Organization) of Pine Plantations*: Doct. Biol. Sci. Dis. Abs. Sverdlovsk, 1981. 50 p. (In Russ.).

18. Мелехов И.С. Лесоводство 3-е изд., испр. и доп. М.: МГУЛ, 2005. 324 с.

Melekhov I.S. *Forestry*. Moscow, MGUF, 2005. 324 p. (In Russ.).

19. Морозов Г.Ф. О лесоводственных устоях (копия статьи Морозов Г.Ф. О лесоводственных устоях. М.: Гослесбуиздат, 1962. 28 с.) // Лесоводственные устои / сост. Ю.П. Дорошин и др. М., 2006. С. 64–88.

Morozov G.F. About Silvicultural Foundations (copy of the article by Morozov G.F. About Silvicultural Foundations. Moscow: Goslesbumizdat, 1962. 28 p.). *Silvicultural Foundations* / compiled by Yu.P. Doroshin et al., 2006, pp. 64–88. (In Russ.).

20. Мякушко В.К., Вольвач Ф.В., Плюта П.Г. Экология сосновых лесов. Киев: Урожай, 1989. 248 с.
Myakushko V.K., Vol'vach F.V., Plyuta P.G. *Ecology of Pine Forests*. Kiev, Urozhai Publ., 1989. 248 p. (In Russ.).
21. Обыдёнников В.И., Волков С.Н., Коротков С.А. Эколого-географические аспекты лесоводственных систем // Лесн. вестн. 2016. № 2. С. 6–16.
Obydennikov V.I., Volkov S.N., Korotkov S.A. Ecological and Geographical Aspects of the Silvicultural Systems. *Lesnoi vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, no. 2, pp. 6–16. (In Russ.).
22. Онучин А.А., Иванов В.В., Евдокименко М.Д., Борисов А.Н., Петренко А.Е. Практические рекомендации по применению рубок обновления и переформирования в лесах бассейна озера Байкал Республики Бурятия. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2016. 25 с.
Onuchin A.A., Ivanov V.V., Evdokimenko M.D., Borisov A.N., Petrenko A.E. *Practical Recommendations for the Use of Renewal and Reformation Fellings in the Forests of the Lake Baikal Basin of the Republic of Buryatia*. Krasnoyarsk: V.N. Sukachev Institute of forest SB RAS, 2016. 25 p. (In Russ.).
23. Побединский А.В. Изучение лесовосстановительных процессов: метод. указ. / АН СССР. Сиб. отд.-ние. Ин-т леса и древесины. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1966. 64 с.
Pobedinskii A.V. *Study of Reforestation Processes: Guidelines*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 64 p. (In Russ.).
24. Рогозин М.В., Разин Г.С. Развитие древостоев. Модели, законы, гипотезы. Пермь: ПГНИУ, 2015. 249 с. Режим доступа: <https://elis.psu.ru/node/299089> (дата обращения: 14.12.23).
Rogozin M.V., Razin G.S. *Development of Forest Stands. Models, Laws, Hypotheses*. Perm', PGNIU Publ., 2015. 249 p. (In Russ.).
25. Санников С.Н., Санникова Н.С., Петрова И.В. Естественное лесовозобновление в Западной Сибири. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 199 с.
Sannikov S.N., Sannikova N.S., Petrova I.V. *Natural Reforestation in Western Siberia*. Ekaterinburg, UrB RAS, 2004. 199 p. (In Russ.).
26. Седых В.Н. Лесообразовательный процесс. Новосибирск: Наука, 2009. 164 с.
Sedykh V.N. *Forest Forming Process*. Ed. by E.S. Petrenko. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 164 p. (In Russ.).
27. Смирнов В.Е. Полувековой опыт лесовосстановления в ленточных борах Казахстана и Алтая / под ред. Л.Н. Грибанова. Алма-Ата: Кайнар, 1966. 131 с. (Тр. Казах. науч.-исслед. ин-та лесн. хоз-ва / М-во сел. хоз-ва Казах. ССР; Т. 5, вып. 3).
Smirnov V.E. *Half a Century of Experience in Reforestation in Belt Forests of Kazakhstan and Altai*. Ed. by L.N. Gribanova. Alma-Ata, Kainar, 1966. 131 p. (In Russ.).
28. Софронов М.А. Лесообразовательный процесс в лесах на холодных почвах и его связь с пожарами // Эколого-географические проблемы сохранения и восстановления лесов Севера: тез. докл. Всесоюз. науч. конф., Архангельск, 26–28 нояб. 1991 г. Архангельск, 1991. С. 169–171.
Sofronov M.A. Forest Formation Process in Forests on Cold Soils and its Connection with Fires. *Ecological and Geographical Problems of Conservation and Restoration of Forests of the North*: Abstracts. dokl. All-Union scientific conference. Arkhangel'sk, 1991, pp. 169–171. (In Russ.).
29. Тихонова И.В., Экарт А.К., Кравченко А.Н., Тихонова Н.А., Семенякин Д.А. Влияние рубок разной интенсивности на генетическое разнообразие подроста сосны в северной лесостепи Средней Сибири // Лесоведение. 2021. № 4. С. 379–392.

Tikhonova I.V., Ekart A.K., Kravchenko A.N., Tikhonova N.A., Semenyakin D.A. Impact of Different Intensity Fellings on the Genetic Diversity of Pine Undergrowth in the Northern Forest-Steppes of Central Siberia. *Russian Forest Sciences*, 2021, no. 4, pp. 379–392. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821040094>

30. Чижов Б.Е., Харлов И.Ю., Козинец В.А., Агафонов Е.Ю. Зонально-типологические особенности естественного возобновления сосняков Западной Сибири // Лесн. вестн. 2011. № 3. С. 25–29.

Chizhov B.E., Kharlov I.Y., Kozinets V.A., Agafonov E.Y. Zonal-Typological Particularities of Natural Renewal of West Siberia Pine Forests. *Lesnoi vestnik* = Forestry Bulletin. 2011, no. 3, pp. 25–29. (In Russ.).

31. Шутов И.В. Деградация лесного хозяйства России. СПб.: СПбНИИЛХ, 2006. 97 с.

Shutov I.V. *Degradation of Russian Forestry*. Sankt-Peterburg, SPbSRIF Publ., 2006. 97 p.

32. Bergeron Y., Leduc A., Harvey B., Gauthier S. Natural Fire Regime: a Guide for Sustainable Forest Management of the Canadian Boreal Forest. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, pp. 81–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.14214/sf.553>

33. Bose A.K., Harvey B.D., Brais S., Beaudet M., Leduc A. Constraints to Partial Cutting in the Boreal Forest of Canada in the Context of Natural Disturbance-Based Management: A Review. *Forestry*, 2014, vol. 87, pp. 11–28. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt047>

34. Danilin I.M., Tselitan I.A. Dynamics of Forest Ecosystems Regenerated on Burned and Harvested Areas in Mountain Regions of Siberia: Characteristics of Biological Diversity, Structure and Productivity. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 6, pp. 60–72. <https://doi.org/10.15372/SJFS20160606>

35. Drever C.R., Peterson G., Messier C., Bergeron Y., Flannigan M. Can Forest Management Based on Natural Disturbances Maintain Ecological Resilience? *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, vol. 36, pp. 2285–2299. <https://doi.org/10.1139/x06-132>

36. Drössler L., Fahlvik N., Wysocka N.K., Hjelm K., Kuehne C. Natural Regeneration in a Multi-Layered *Pinus sylvestris* – *Picea abies* Forest after Target Diameter Harvest and Soil Scarification. *Forests*, 2017, vol. 8, 35 p. <https://doi.org/10.3390/f8020035>

37. Franklin J.F., Forman T.T. Creating Landscape Patterns by Forest Cutting: Ecological Consequences and Principles. *Landscape Ecology*, 1987, vol. 1, pp. 5–18. <https://doi.org/10.1007/BF02275261>

38. Kooch Y., Jalilvand H., Bahmanyar M.A., Pormajidian M.R. The Use of Principal Component Analysis in Studying Physical, Chemical and Biological Soil Properties in Southern Caspian Forests (North of Iran). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2008, vol. 11, pp. 366–372. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.366.372>

39. Kuuluvainen T. Forest Management and Biodiversity Conservation Based on Natural Ecosystem Dynamics in Northern Europe: The Complexity Challenge, AMBIO. *A Journal of the Human Environment*, 2009, vol. 38, no. 6, pp. 309–315. <https://doi.org/10.1579/08-A-490.1>

40. Maleki K., Allogo F.N., Lafleur B. Natural Regeneration Following Partial and Clear-Cut Harvesting in Mature Aspen-Jack Pine Stands in Eastern Canada. *Forests*, 2020, vol. 11, 741 p. <https://doi.org/10.3390/f11070741>

41. Moreno-Fernández D., Cañellas I., Barbeito I., Sánchez-González M., Ledo A. Alternative Approaches to Assessing the Natural Regeneration of Scots Pine in a Mediterranean Forest. *Annals of Forest Science*, 2015, vol. 72, pp. 569–583. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0479-4>

42. Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F. How and How Much Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands? *Current Forestry Reports*, 2020, vol. 6, pp. 115–126. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00113-8>

43. Sukhbaatar G., Nachin B., Purevragchaа B., Ganbaatar B., Mookhor Kh., Tseveen B., Gradel A. Which Selective Logging Intensity is Most Suitable for the Maintenance of Soil Properties and the Promotion of Natural Regeneration in Highly Continental Scots Pine Forests? Results 19 Years after Harvest Operations in Mongolia. *Forests*, 2019, vol. 141, no. 10. 22 p. <https://doi.org/10.3390/f10020141>

44. Van Wagner C.E. Age-Class Distribution and the Forest Fire Cycle. *Canadian Journal of Forest Research*, 1978, vol. 8, pp. 220–227. <https://doi.org/10.1139/x78-034>

45. Wetzel S., Burgess D. Understorey Environment and Vegetation Response after Partial Cutting and Site Preparation in *Pinus strobus* L. Stands. *Forest Ecology and Management*, 2001, vol. 151, pp. 43–59. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00695-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00695-2)

46. Wienk C.L., Sieg C.H., McPherson G.R. Evaluating the Role of Cutting Treatments, Fire and Soil Seed Banks in an Experimental Framework in Ponderosa Pine Forests of the Black Hills, South Dakota. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 192, pp. 375–393. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.004>

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