

ЕСТЕСТВЕННОЕ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ НА НАРУШЕННЫХ ЛЕСНЫХ УЧАСТКАХ В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ЛЕСА И ТИПАХ ЛЕСОРАСТИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПОДЗОНЫ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ

А. А. Камашев¹, В. А. Савченкова¹, М. И. Хорькова²

¹Мытищинский филиал МГТУ им Н. Э. Баумана

Российская Федерация, Московская область, 141005, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1

E-mail: aakamashev@rambler.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства

Российская Федерация, Московская область, 141202, г. Пушкино, ул. Институтская, 15

Аннотация. Целью исследования является оценка структуры нарушенных лесных участков подзоны северной тайги посредством кластерного анализа для сегментации нарушенной площади на однородные лесорастительные выделы. Объект исследования – подрост светлохвойных лесообразующих пород на участке площадью 147,87 га, нарушенном при строительстве площадки шламохранилища в Сосногорском лесничестве Республики Коми. Натурное обследование проведено выборочным методом: заложено по 30 пробных площадок (10×10 м) в каждом из четырёх типов лесорастительных условий с учётом трёх категорий удалённости от прилегающего лесного насаждения (до 50 м, 51–100 м, более 100 м). Установлено, что после вырубki ельников долгомошников (55,8 %), сосняков сфагновых (25,3 %) и сосняков долгомошных (18,3 %) сформировались сосняки бруснично-зеленомошно-лишайниковые (66,2 %), кустарничково-долгомошные (18,8 %), голубично-зеленомошно-сфагновые (14,7 %) и осоково-чернично-долгомошные (0,3 %). Выявлено, что на расстоянии до 50 м от стены леса густота естественного возобновления достигает 3,9 тыс. шт./га, на расстоянии 51–100 м – до 2,2 тыс. шт./га, а далее 100 м снижается до 0,6 тыс. шт./га. Кластеризация методом KMeans и иерархическая кластеризация методом Уорда позволили выделить четыре кластера, различающихся по продуктивности: наиболее продуктивный кластер (кластер 1) характеризуется наивысшими значениями густоты по всем типам лесорастительных условий (СБЗЛ – 102,5, СКД – 54,5, СГЗС – 63,3, СОЧД – 59,8 шт./га). Корреляционный анализ показал наиболее тесную положительную связь между СКД и СГЗС ($r = 0,64$). На основании полученных результатов сделан вывод о необходимости проведения мероприятий по искусственному лесовосстановлению в сосняках долгомошных, сфагновых и черничных при удалённости участков от прилегающего насаждения более 50 м.

Ключевые слова: лесорастительные условия; лесной участок; таёжная зона; кластерный анализ; корреляция; сегментация; естественное лесовосстановление; северная тайга.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 107–119

NATURAL REFORESTATION IN DISTURBED FOREST AREAS IN VARIOUS TYPES OF FOREST AND TYPES OF FOREST-GROWING CONDITIONS OF THE NORTHERN TAIGA SUBZONE

A. A. Kamashev¹, V. A. Savchenkova¹, M. I. Khorkova²

¹Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University

1, 1st Institutskaya str., Mytishchi, 141005, Moscow region, Russian Federation

E-mail: aakamashev@rambler.ru

²All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization

15, Institutskaya str., Pushkino, 141202, Moscow region, Russian Federation

Abstract. The purpose of the study is to assess the structure of disturbed forest areas in the northern taiga subzone using cluster analysis to segment the disturbed area into homogeneous forest areas. The object of the study is the undergrowth of light coniferous forest-forming species in an area of 147.87 hectares that was disturbed during the construction of a slurry storage facility in the Sosnogorsk Forestry District of the Komi Republic. The field survey was conducted using a selective method: 30 test sites (10×10 m) were established in each of the four types of forest conditions, taking into account three categories of distance from the adjacent forest plantation (up to 50 m, 51–100 m, and more than 100 m). It was found that after the cutting of spruce-long-moss forests (55.8 %), pine-sphagnum forests (25.3 %), and pine-long-moss forests (18.3 %), lingonberry-green-moss-lichen forests (66.2 %), shrub-long-moss

forests (18.8 %), blueberry-green-sphagnum forests (14.7 %), and sedge-blueberry-long-moss forests (0.3 %). It was found that at a distance of up to 50 m from the forest wall, the density of natural regeneration reaches 3.9 thousand plants per hectare, at a distance of 51-100 m, it reaches 2.2 thousand plants per hectare, and beyond 100 m, it decreases to 0.6 thousand plants per hectare. KMeans clustering and hierarchical Ward clustering allowed us to identify four clusters that differ in productivity: the most productive cluster (cluster 1) has the highest values of density in all types of forest conditions (102.5, 54.5, 63.3, and 59.8 units/ha, respectively). Correlation analysis showed the closest positive relationship between SCD and SGS ($r = 0.64$). Based on the results obtained, it was concluded that it is necessary to carry out measures for artificial reforestation in long-moss, sphagnum, and blueberry pine forests when the distance between the sites and the adjacent plantation is more than 50 m.

Keywords: Forest conditions; forest area; taiga zone; cluster; correlation; segmentation.

ВВЕДЕНИЕ. В настоящее время в современных экономических условиях восстановление нарушенных лесных участков имеет большое значение вследствие прямого воздействия человека. Вместе с тем функционирование и развитие промышленного производства не всегда способствует организации рационального землепользования [Лиханова и др., 2014]. Речь идет о видах хозяйственной деятельности, связанных с нарушением земной поверхности. В результате такой деятельности образуются большие массивы нарушенных земель, к которым относятся земли, утратившие свою хозяйственную ценность в связи с изменением почвенного и растительного покрова, гидрологического режима, образование техногенного рельефа в результате производственной деятельности промышленного назначения. В связи с чем особую актуальность для таежных лесов, которые более чувствительны к любому воздействию, приобретает повышение эффективности мероприятий по лесовосстановлению в целях повышения продуктивности молодняков, биологического потенциала восстановленных лесных участков и сокращения срока восстановления лесных ресурсов [Брыжко, 2017; Зарипов и др., 2020; Лиханова, 2004; Копцева и др., 2013]. В условиях таежной зоны естественное возобновление имеет определенное преимущество над искусственным лесовосстановлением, особенно в тех случаях, когда речь идет об отдельных видах нарушенных лесных участков и типах лесорастительных условиях: устойчивость деревьев к неблагоприятным факторам в конкретных лесорастительных условиях, более конкурентоспособны по сравнению с лесными культурами и требует меньших ресурсов, чем искусственное. Однако многолетние наблюдения, проводимые авторами, позволяют предположить, что не во всех условиях таежной зоны целесообразно отдавать предпочтение естественному возобновлению лесов [Башегуров и др., 2020; Нгуен Ван Зинь и др., 2018; Сунгурова и др., 2014].

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с изложенным возникла необходимость формирования цели исследования, а именно, оценка структуры нарушенных участков посредством кластерного анализа для сегментации всей нарушенной площади на однородные части, вновь сформированные лесорастительные выделы. Соответственно задача состоит в изучении особенностей возобновления основных лесобразующих пород на нарушенных землях лесного фонда в различных типах лесорастительных

условиях подзоны северной тайги, включая анализ его распределения в зависимости от расстояния до прилегающего к молоднякам насаждения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование проводилось на лесном участке, нарушенном при промышленном производстве, а именно, при строительстве площадки шламохранилища (147,87 га) планирующего использовать при складировании отходов производства – красного шлама, который образуется при переработке боксита. Территория района исследования относится к таежной лесорастительной зоне северо-таежного лесного района европейской части Российской Федерации [Лесохозяйственный регламент..., 2017; Мартыненко и др., 2006].

Климат в районе исследований формируется под влиянием арктических и полярных воздушных масс, с весьма развитой циклонической деятельностью. В холодный период года территория испытывает наибольшее влияние Атлантики. При продвижении на восток и северо-восток влияние Атлантики заметно ослабевает, обуславливая понижение температуры воздуха в указанном направлении. Среднегодовая температура воздуха в разные годы понижалась от $-3,8$ до $+2,5$ °C. В данных климатических условиях района исследования сформирован таежный лесной район.

Согласно данным материалов лесоустройства и государственного лесного реестра на территории района исследования нарушению подверглись следующие типы леса: ельники долгомошники (55,8 %), сосняки сфагновые (25,3 %), сосняки долгомошные (18,3 %) и сосняки брусничники (0,6 %). Для них характерны группы типов почв: песчаные и супесчаные, иллювиально-железисто-гумусовые на песке и супеси; торфянисто-подзолистые супесчаные и песчаные на глееватых суглинках; торфяно-глеевые, торфяно-верховые на оглеенных валунных суглинках и торфянисто-подзолистые глееватые супесчаные, суглинистые на суглинках и глинах.

В ходе натурного обследования установлено, после вырубki указанных типов леса образуются сосняки бруснично-зеленомошно-лишайниковые (далее – С.бр.-зел.-лиш.) 66,2 %, сосняки кустарничково-долгомошные (далее – С.куст.-дм.) 18,8 %, сосняки голубично-зеленомошно-сфагновые (далее – С.голуб.-зел.-сф.) 14,7 % и сосняки осоково-чернично-долгомошные (далее – С.оск.-чер.-дм.) 0,3 % от общей площади нарушенного участка.

Натурное обследование проводилось выборочным методом, при котором определялись количественные (количество деревьев основных пород, тыс.шт/га, высота) и качественные (древесная порода, состав насаждения, полнота) характеристики обследуемого участка, которые распространялись на весь лесной участок. Принимая во внимание актуальность разработки практических рекомендаций в части целесообразного выбора способа лесовосстановления нарушенных участков, в рамках настоящего исследования принято решение придерживаться методики закладки пробных площадок утвержденной Инструкцией по сохранению подростов..., 1983. С учетом удаленности от границы прилегающего к исследуемому участку лесного насаждения (категории расстояния до 50 м, от 51 до 100 м и более 100 м определены на основании экспериментальных данных, приведенных в табл. 2) заложено по 30 пробных площадок в каждом типе лесорастительных условий.

Пробные площадки располагались на равном расстоянии друг от друга, имели квадратную форму размером 10×10 м и составляли площадь 100 м² каждая. При этом весь подрост и самосев делился по группам высот (до 0,2 м; 0,21–0,5 м; 0,6–1,0 м; 1,1–1,5 м; более 1,5 м). Таким образом, общая площадь заложённых пробных площадок составляет 3,6 га, что составляет 2,4 % от общей площади исследуемого участка [Об утверждении Порядка отнесения земель..., 2019].

Объектом исследования является подрост светлых хвойных лесобразующих пород на нарушенных лесных участках.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе анализа таксационных описаний исследуемого лесного участка до рубки произрастали хвойные и мягколиственные насаждения в брусничных, долгомошных, сфагновых и травяно-болотных типах леса. Среди указанных типов леса на брусничные и травяно-болотные совокупно приходится лишь 0,9 %. Принимая во внимание незначительный (менее 1 %) объем указанных типов леса в структуре нарушенных участков, в рамках настоящего исследования принято решение их не учитывать. Средние таксационные показатели насаждений лесного участка до рубки приведены в табл. 1.

Со всей территории нарушенных участков снят плодородный слой почвы и сдвинут к периметру участка. В дальнейшем лесной участок по целевому назначению не использовался и был возвращен по истечении 12 лет в лесной фонд после естественного зарастания хвойными и мягколиственными породами деревьев [Постановление..., 2018; Правила лесоразведения..., 2021].

Данные о количественных и качественных показателях восстанавливаемого насаждения, в зависимости от удаленности от источника обсеменения, приводятся в табл. 2.

Таблица 1

Средние таксационные показатели насаждений лесного участка до рубки

Состав	Средний возраст, лет	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Бони- тет	Полно-та	Средний запас, м ³ /га			
						молод- няки	средне- возрас- тные	приспе- вающие	спелые и пере- стойные
Хозяйство – хвойное									
8С2Б+Е	70	12	9	5А	0.5	12	80	–	65
7Е1С2Б	120	14	11	5А	0.5	5	–	–	80
Хозяйство – мягколиственное									
8Б2Е+С	20	4	3	5А	0.6	5	–	–	–

Таблица 2

Характеристика молодняка, сформировавшегося после рубки

Тип лесорастительных условий	Коэффициент состава	Удаленность от прилегающего лесного насаждения, м	Полнота	Количество экземпляров всего (числитель), в т.ч. главной породы (знаменатель) шт/га				
				до 0,2 м	0,21–0,5 м	0,6–1,0 м	1,1–1,5 м	Более 1,5 м
С.бр.-зел.-лиш.	8С1Б1Ос ед.Е ед.Л	до 50 м	0,9	30 16	133 63	383 233	1327 940	3159 2706
С.куст.-дм.	7С3Б+Ос	до 50 м	0,6	–	317 220	600 350	603 427	333 207
С.голуб.-зел.-сф.	7С3Б ед.Е	до 50 м	0,4	–	137 100	340 250	613 383	560 413
С.оск.-чер.-дм.	6С2Е2Б+Ос ед.Л	до 50 м	0,6	30 30	193 180	377 310	583 430	1013 677
С.бр.-зел.-лиш.	6С2Б2Ос ед.Е ед.Л	от 51 до 100 м	0,7	74 44	203 80	454 234	1233 743	1609 1136
С.куст.-дм.	6С4Б ед.Ос	от 51 до 100 м	0,4	–	243 90	480 247	500 320	290 207

Окончание табл. 2

Тип лесорастительных условий	Коэффициент состава	Удаленность от прилегающего лесного насаждения, м	Полнота	Количество экземпляров всего (числитель), в т.ч. главной породы (знаменатель) шт/га				
				до 0,2 м	0,21–0,5 м	0,6–1,0 м	1,1–1,5 м	Более 1,5 м
С.голуб.-зел.-сф.	6СЗБ1Ос ед.Е	от 51 до 100 м	0,3	–	170 83	353 190	397 213	403 260
С.оск.-чер.-дм.	5С1ЕЗБ1Ос	от 51 до 100 м	0,4	17 17	137 107	266 166	516 290	814 514
С.бр.-зел.-лиш.	3СЗБ4Ос ед.Е ед.Л	более 100 м	0,4	180 40	260 63	443 170	396 146	370 163
С.куст.-дм.	5С5Б	от 51 до 100 м	0,2	–	350 137	407 197	246 143	100 53
С.голуб.-зел.-сф.	6БЗС1Ос ед.Е	от 51 до 100 м	0,1	–	196 73	330 113	306 123	116 33
С.оск.-чер.-дм.	4СЗБЗОс+Е	от 51 до 100 м	0,2	60 60	194 120	337 137	556 170	130 60

Сведения из табл. 2 наглядно показывают, что естественное лесовосстановление на нарушенном лесном участке протекает крайне медленно, неравномерно и имеет существенное различие по густоте. При этом в составе хвойного молодняка преобладает сосна и не в значительном количестве присутствует ель и лиственница. Среди мягколиственных доминирует береза и осина [Морозов и др., 2021, Осипенко и др., 2021].

По внешнему периметру исследуемого участка: на расстоянии до 50 м в глубину отмечено наличие достаточного естественного возобновления основных лесобразующих пород в количестве до 3.9 тыс.шт. на 1 га и от 51 до 100 м – до 2.2 тыс. шт. на 1 га. Состояние его удовлетворительное. Густое охвоение, зеленая окраска хвои, заметно выраженная мутовчатость, конусообразная симметричная средней густоты крона протяженностью 1/3 ствола в группах и 1/2 ствола – при одиночном размещении, прирост по высоте за последние 3–5 лет не утрачен, прирост вершинного побега не менее прироста боковых ветвей половины кроны, прямые неповрежденные стволы, мелкощуччатая кора [Об утверждении Правил лесовосстановления..., 2021].

Однако следует заметить, что далее 100 метров от прилегающего к нарушенному участку насаждения (в глубину участка) отмечено недостаточное количество подроста и молодняка – до 0,6 тыс.шт. на 1 га, во многих случаях его отсутствие. Необходимо отметить, что данные показатели являются средними для всех типов лесорастительных условий, так как в каждом отдельном случае они будут зависеть от многих факторов, в том числе почвенных, гидрологических, а также положение участка в рельефе [Борко, 2012].

Учитывая изложенное в целях разработки рекомендаций, повышающих эффективность лесовосстановления нарушенных участков, принято решение провести анализ структуры нарушенных участков посредством кластерного анализа для сегментации всей нарушенной площади на однородные части – лесорастительные выделы.

В ходе кластерного анализа экспериментальные данные объединены по указанным категориям, значе-

ния суммированы в каждой группе. При этом удалены пропущенные нулевые значения.

Кластеризация проведена методом KMeans с тремя кластерами. Создан Pairplot с цветовой маркировкой по кластерам [Kaufman, 2009].

В целях детальной сегментации экспериментальных данных, полученных на постоянных пробных площадях и загруженных из файла TREE2.xlsx, проведено их отфильтровывание по типам лесорастительных условий, получен график для категорий лесорастительных условий сосняк кустарниково-долгомошный (далее – СКД), сосняк голубично-зеленомошно-сфагновый (далее – СГЗС), сосняк бруснично-зеленомошно-лишайниковый (далее – СБЗЛ), сосняк осоково-чернично-долгомошный (далее – СОЧД) (рис. 1). Проведенная сегментация позволяет лучше «увидеть» скрытые подгруппы внутри данных.

На рис. 1 можно видеть, что в ходе сегментации экспериментальных данных сформировано 4 основных кластера родственных элементов статистической совокупности: СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД).

Наглядным результатом сегментации всей нарушенной площади на однородные части – лесорастительные выделы, является дендрограмма, которая построена с использованием метода Ward, минимизирующего разброс внутри кластеров.

На рис. 2 приведена иерархия кластеров, объединяющая похожие объекты на разных уровнях. Построения дендрограммы проведено на основании суммированных экспериментальных данных на постоянных пробных площадках по 4 категориям: СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД [Bholowalia, 2014].

На дендрограмме применено условное обозначение, приведенное в табл. 3.

В ходе построения иерархии кластеров суммированы экспериментальные данные по 4 категориям: СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД.

Сегментация нарушенных участков проведена с учетом следующих оценочных критериев: тип лесорастительных условий, количество жизнеспособных экземпляров древесной растительности на 1 га, удаленность от прилегающего насаждения и высоты.

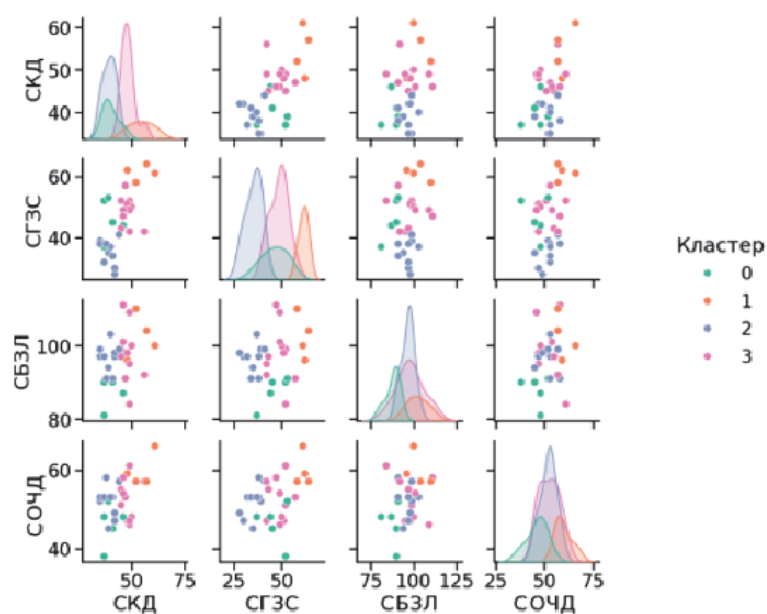


Рис. 1. Распределение значений по типам лесорастительных условий (категориям)

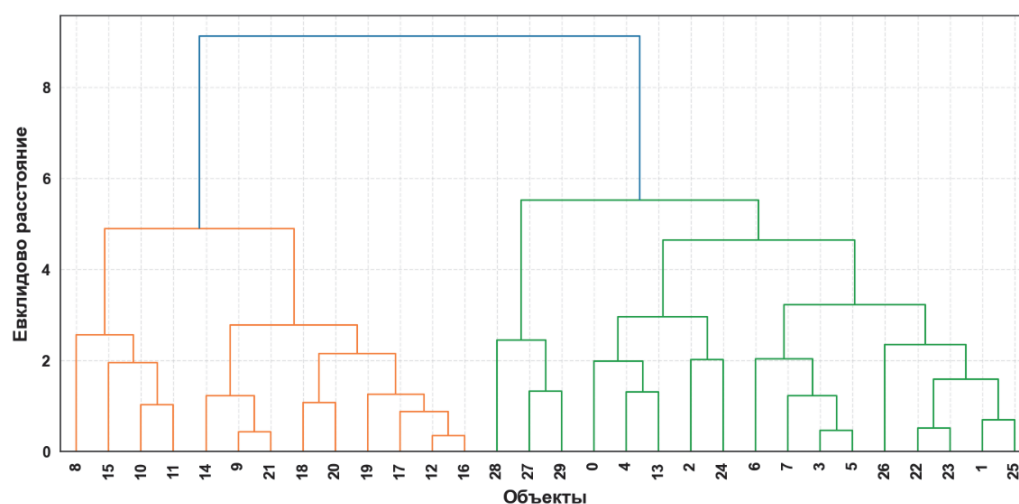


Рис. 2. Дендрограмма: иерархическая кластеризация типов лесовосстановления

Таблица 3

Условные обозначения дендрограммы

№ п/п	Объект	СКД	СГЭС	СБЗЛ	СОЧД	Кластер
0	0	48	62	96	59	1
1	1	45	52	99	51	3
2	2	49	52	84	61	3
3	3	48	51	98	47	3
4	4	47	57	91	53	3
5	5	50	50	100	48	3
6	6	49	49	109	46	3
7	7	49	42	95	47	3
8	8	37	52	90	38	0
9	9	42	30	97	47	2
10	10	46	44	87	48	0
11	11	41	45	90	45	0
12	12	35	39	99	52	2
13	13	39	53	91	52	0
14	14	39	35	94	45	2
15	15	37	37	81	48	0
16	16	35	38	97	53	2
17	17	37	32	97	53	2

Окончание табл. 3

№ п/п	Объект	СКД	СГЗС	СБЗЛ	СОЧД	Кластер
18	18	41	34	91	53	2
19	19	40	37	103	53	2
20	20	38	38	91	58	2
21	21	42	28	98	49	2
22	22	45	43	97	55	3
23	23	44	41	99	57	2
24	24	56	42	92	57	3
25	25	46	49	101	54	3
26	26	46	47	111	58	3
27	27	57	64	104	57	1
28	28	61	61	100	66	1
29	29	52	58	110	57	1

Кластер	Объект
0	[8, 10, 11, 13, 15]
1	[0, 27, 28, 29]
2	[9, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23]
3	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 22, 24, 25, 26]

Дендрограмма демонстрирует группировку схожих объектов в кластеры по мере увеличения допустимого расстояния между ними (например, евклидово расстояние по оси Y) в исследуемых типах лесорастительных условий:

Оранжевая группа объединяет участки с определенным набором лесорастительных условий характеризующихся, как правило, умеренными (1,7 шт/га) значениями СГЗС и СБЗЛ, а также низкими (1,1 шт/га) или средними (1,3 шт/га) значениями СКД и СОЧД.

Зеленая группа включает участки с (более 2,0 шт/га) значениями СГЗС и СОЧД, а также умеренными (2,0 шт/га) высокими (более 2,0 шт/га) СБЗЛ и СКД. Это участки с высокой густотой молодняка (более 2,0 шт/га). Количество деревьев основных пород в количестве 2,0 шт/га принято за основу в связи с требованиями (критериями) к молоднякам, площади которых подлежат отнесению к землям, на которых расположены леса утвержденные приказом Минприроды России от 29.12.2021 г. № 1024. Таким образом, зеленая группа отражает участки с более интенсивными и благоприятными условиями для роста и развития молодого поколения основных лесобразующих пород.

В целях не допустить погрешность из-за влияния разных единиц измерения, экспериментальные данные масштабированы (стандартизированы), т. е. критерии преобразованы так, чтобы они имели сравнимую шкалу. Это важно, потому что в многомерных алгоритмах (например, кластеризация, Principal Component Analysis – метод основных компонент, применяемый для снижения размерности данных и выделения главных направлений вариации, признаки с большими значениями могут искусственно «перетягивать» расстояния и влиять на результат. В связи с этим все исследуемые параметры (СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД) были преобразованы в единую шкалу, в которой каждый признак имеет среднее значение, равное нулю, и стандартное отклонение, равное единице.

Без стандартизации признаки с большими абсолютными значениями (например, десятки или сотни)

могут искусственно «перетягивать» евклидовы расстояния, тем самым искажая результат: один параметр будет доминировать над остальными, даже если его влияние объективно меньше. Поэтому стандартизация обеспечивает сравнимость параметров, корректность расстояний и объективность полученных кластеров.

Это нужно:

- чтобы все признаки влияли на анализ одинаково;
- чтобы расстояния между объектами (в дендрограмме, k – средних и т. д.) были честными;
- чтобы результаты кластеризации отражали суть, а не просто масштаб чисел.

Существует два основных подхода и критерия при определении оптимального количества кластеров:

1. Визуальный анализ дендрограммы. Проводя горизонтальную линию на дендрограмме, смотрим, на каком уровне происходит резкое объединение двух больших групп. Оптимальным «срезом» является – чуть ниже этого уровня. Это аналог метода локтя, но только для иерархии.

2. Метод локтя (Elbow method) (для KMeans и других метрик). Строится график зависимости инерции (WSS) от числа кластеров. Ищем «локоть» – точку, после которой добавление кластеров почти не уменьшает ошибку.

На рис. 3 показано распределение значений по категориям (Boxplot).

Наиболее выраженными отличиями сильнее всех выделяется кластер 1, для которого наивысшие значения по всем показателям. Особенно заметно по СКД (54,5), СГЗС (63,3), СБЗЛ (102,5) и СОЧД (59,8). Эта группа отражает наиболее продуктивные и развитые лесорастительные условия, благоприятные для роста древостоя.

Наименее выраженным является кластер 2 характеризующийся наименьшими значениями СГЗС (35,2) и СКД (39,3), умеренными значениями СБЗЛ (96,6) и нормальными показателями СОЧД (52,0). Эта группа с редким и слабо выраженным зарастанием древостоя, характерным для начальной стадии восстановления.

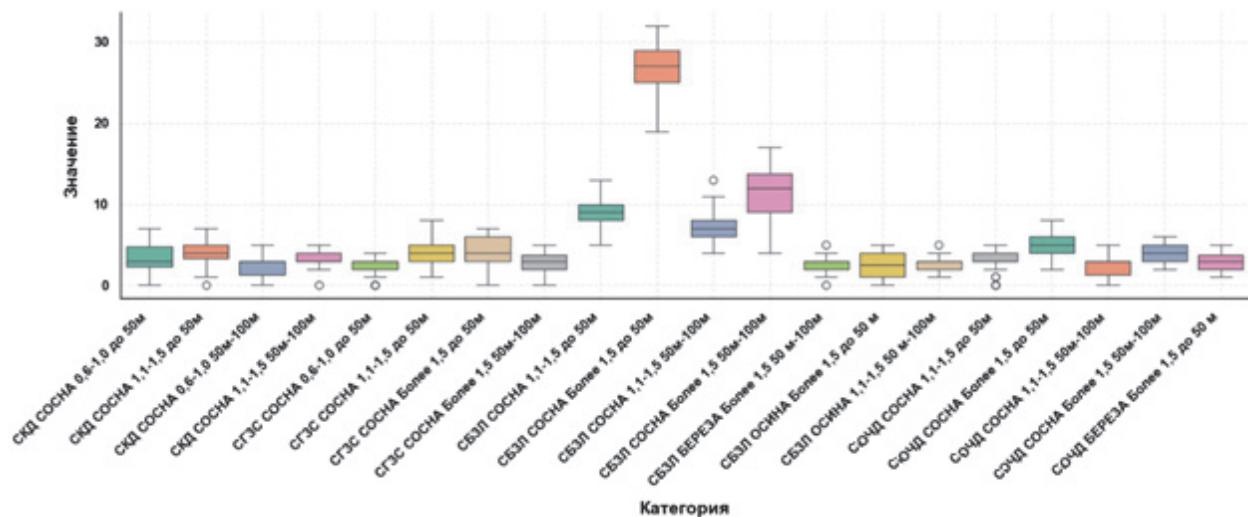


Рис. 3. Распределение значений по категориям (Boxplot)

Сходными являются кластеры 2 и 0 так как очень похожи по СКД (около 40), однако в кластере 0 выше СГЗС (46,2 против 35,2). Это характеризуется разным стадиям развития на схожих участках.

Кроме того, сходным и является кластер 3 и 1. Оба довольно «сильные» по значениям, но в кластере 3 СКД = 48,2, тогда как в кластере 1 = 54,5. У 3 кластера СГЗС = 48,5, а кластере 1 = 61,3. Кластер 3 – умеренно развитый, немного уступает кластеру 1, возможно, следующая стадия после 1 или разные породы либо среда.

Кластер 1 значительно отличается от всех остальных, объединяя участки с наиболее выраженными лесорастительными условиями: высоким СКД, СГЗС и СОЧД. В то время как кластеры 0 и 2 представляют собой менее развитые участки, схожие по СКД, но различающиеся по плотности зарастания (СГЗС). Кластер 3 занимает промежуточное положение и, несмотря на близость к кластеру 1, остаётся отдельной группой благодаря немного сниженным значениям СГЗС и СКД. Это подчёркивает чувствительность метода к комплексному профилю признаков.

Учитывая изложенное, целесообразно провести анализ состояния молодого поколения леса естест-

венного происхождения в зависимости от расстояния до ближайшего лесного участка, на котором произрастает приспевающее и спелое насаждение в состоянии репродукции (далее – расстояние до семенников).

На рис. 4, 5, 6 отражено сравнение пород по расстояниям.

Графики на рис. 4, 5, 6 показывают количество деревьев по породам для каждой категории (СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД). На котором видно, какие породы доминируют в разных диапазонах. Вертикальные линии на столбцах – это показывают ошибки (стандартное отклонение или доверительный интервал), которые Seaborn строит по умолчанию при использовании sns.barplot.

Они показывают разброс данных – насколько сильно изменяются значения внутри категории. Чем длиннее вертикальная линия, тем больше разброс (данные сильно варьируются). Если вертикальная линия короткая, значит, значения внутри категории стабильны.

На рис. 7, 8, 9, 10 показано распределение деревьев по породам и расстоянию. Категория: СКД, СГЗС, СБЗЛ, СОЧД.

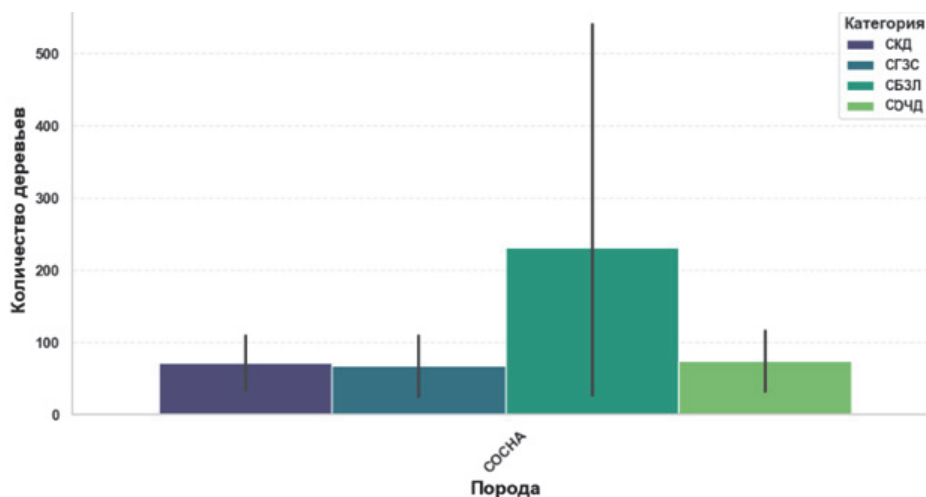


Рис. 4. Сравнение пород по расстояниям (до 50 м)

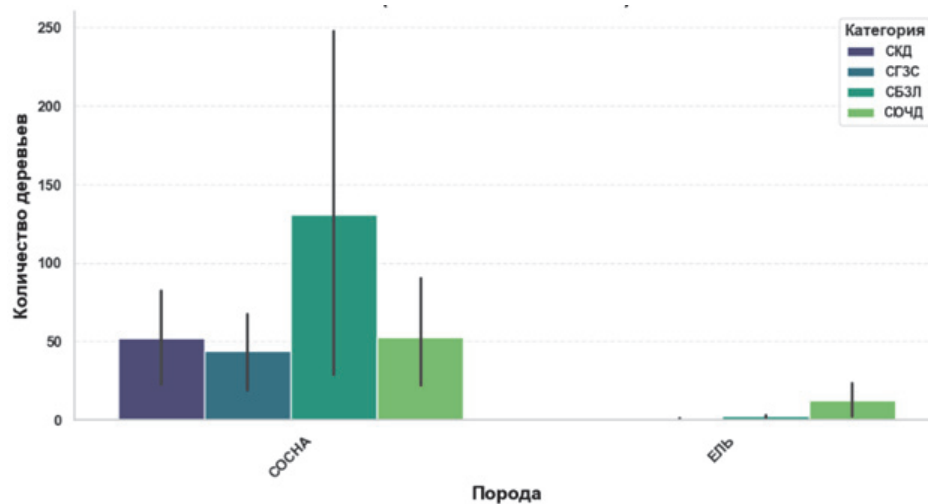


Рис. 5. Сравнение пород по расстояниям (от 50 до 100 м)

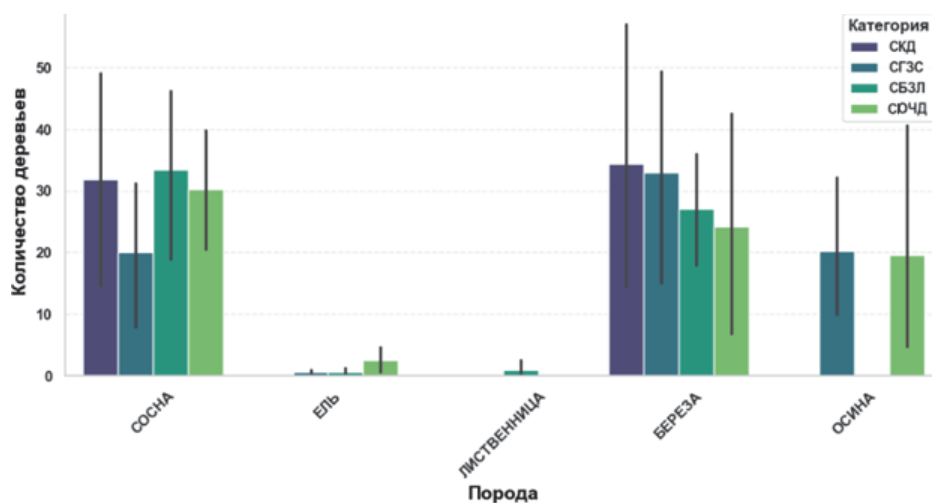


Рис. 6. Сравнение пород по расстояниям (более 100 м)

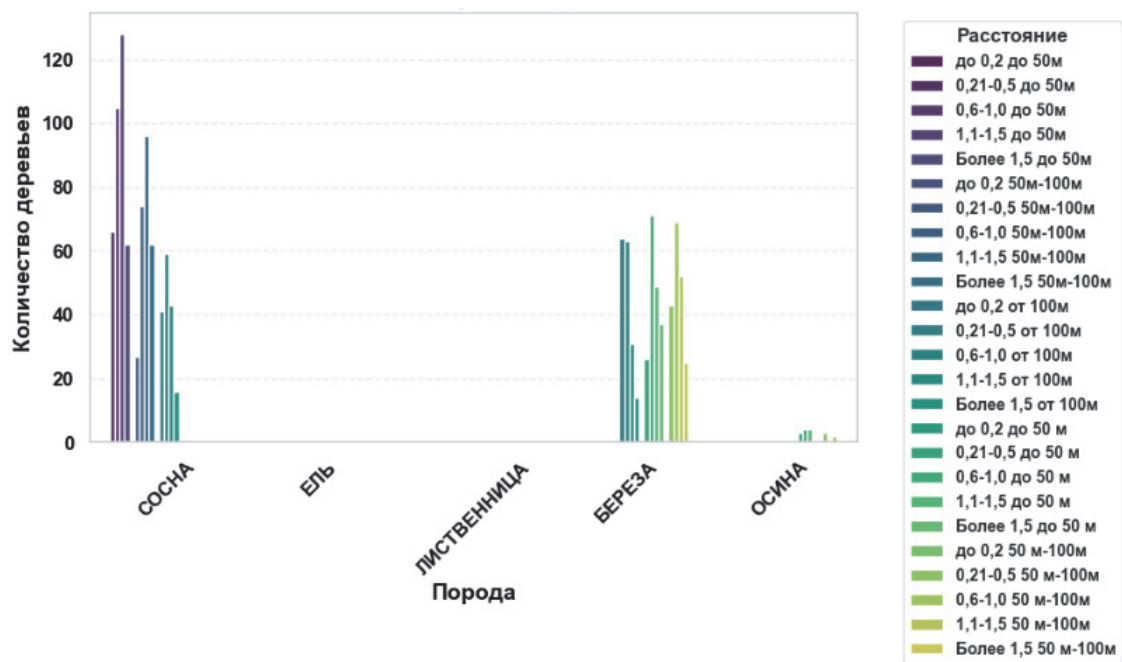
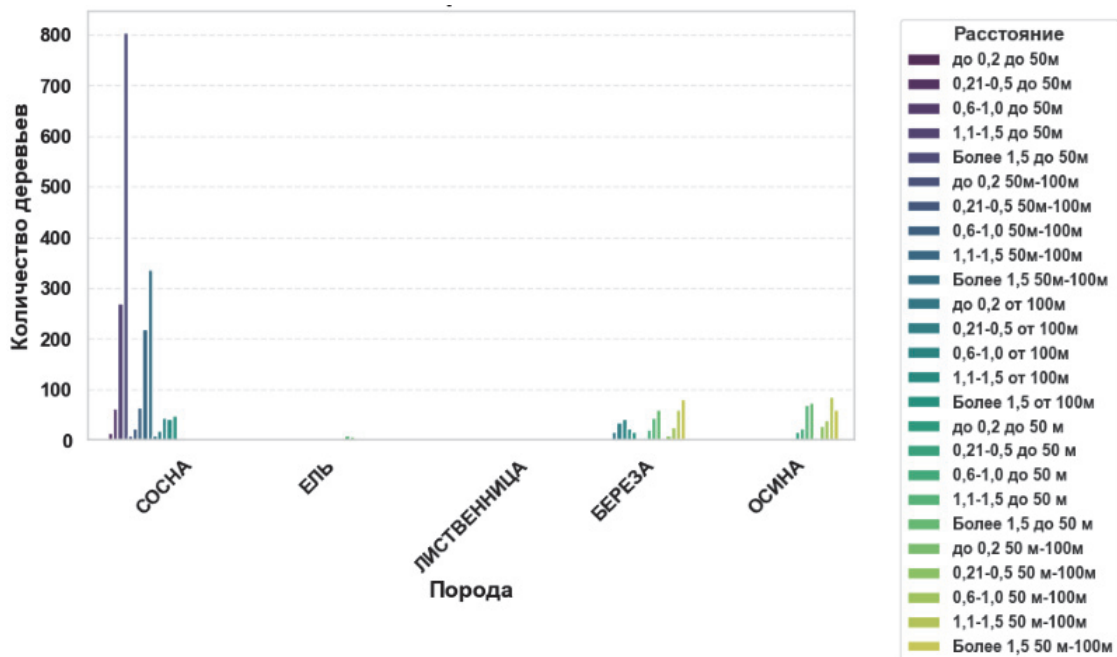
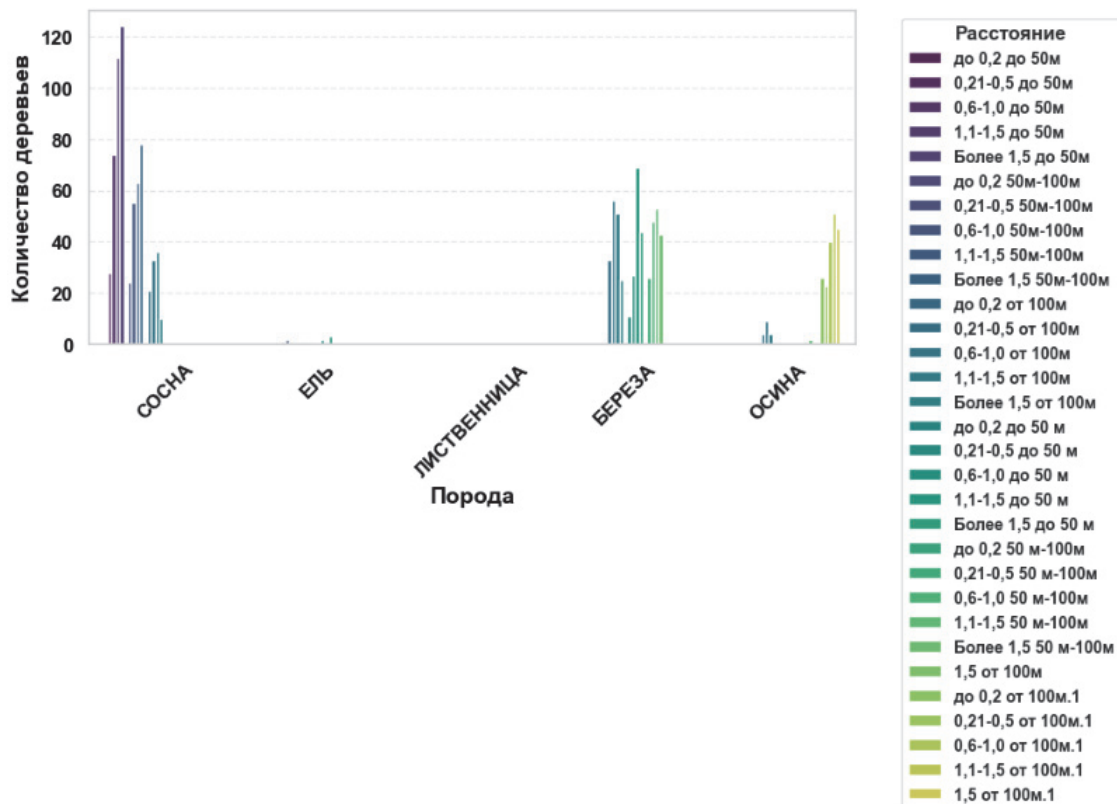


Рис. 7. Распределение деревьев по породам и расстоянию. Категория: СКД



Ось Y отображает количество деревьев, зафиксированных для каждого типа лесорастительных условий в определённой категории и породе:

– ось X – сочетания вида ТЛУ + порода + расстояние (пример: СКД СОСНА 0,6–1,0 до 50 м);

– ось Y – сколько деревьев было зафиксировано в этой подкатегории.

По оси X представлены конкретные сочетания породы и расстояния (до 50 м, 50–100 м и т. д.), а по оси Y – количество учтённых деревьев в данной категории.

На рис. 7, 8, 9, 10 можно видеть степень разброса экспериментальных данных по различным категориям. Чем больше диапазон разброса (ширина «ящика» и длина «усов»), тем выше вариативность признака в данной категории, что может свидетельствовать о неоднородности условий, сильном влиянии внешних факторов. Исследование указанных факторов не входит в задачу настоящей работы. Чем меньше разброс, тем более стабильны и однородны значения признака (густота, расстояние до семенников, высот-

ная группа подроста) в данной категории, что может указывать на одинаковую природу наблюдаемых объектов, устойчивость условий среды или стандартные методы формирования выборки. В частности, лесные участки координально отличаются от земельных участков на иных категориях земли тем, что на них имеются в наличии переходных условий между определенными и принятыми к рассмотрению ранее в работе 4-мя группами лесорастительных условий (СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД). Это позволяет дополнить схемы распределения площадей сосновых насаждений подвергшихся вырубке в результате разработки карьеров, строительства скважин и производственных площадок за 20-летний период, опубликованные в статье [Оценка восстановления нарушенных лесных

участков подзоны северной тайги], являющихся промежуточными этапами под названием «переходные условия».

На рис. 11 изображена корреляционная связь между установленными в рамках настоящего исследования группами лесорастительных условий (СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД).

Таблица на рис. 12 показывает, насколько два признака связаны между собой в каждой ячейке. Значения лежат в диапазоне от -1 до 1 : $1,0$ – идеальная положительная связь; $0,0$ – отсутствует линейная связь; $-1,0$ – идеальная отрицательная связь.

В табл. 4 дано краткое описание признаков с учетом коэффициента СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД.

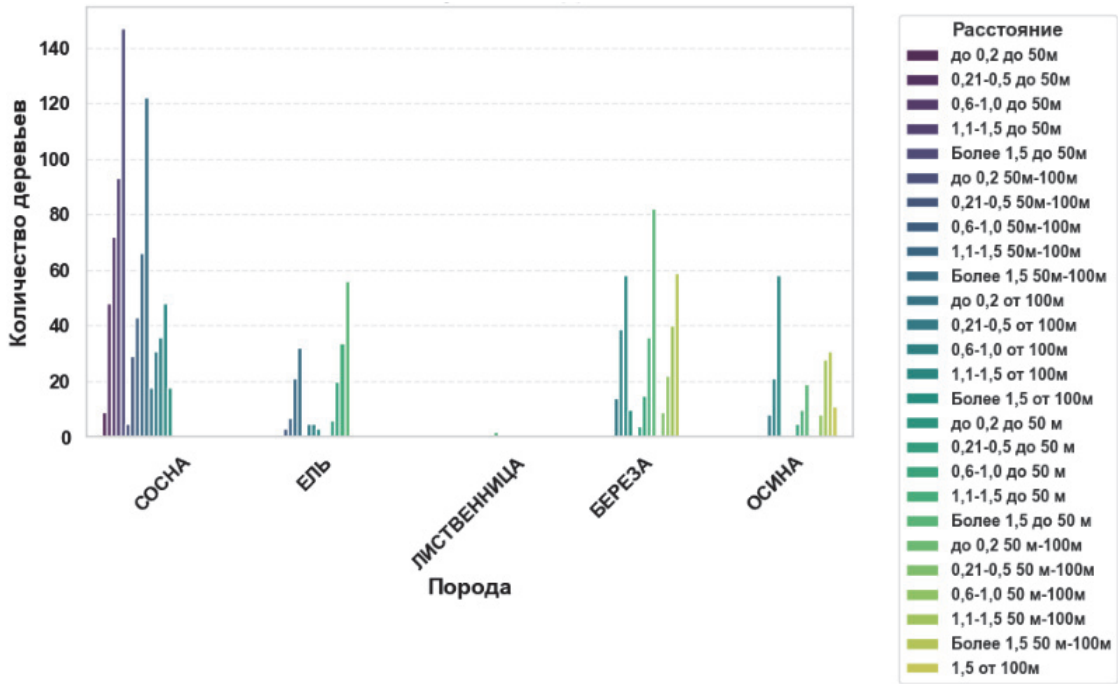


Рис. 10. Распределение деревьев по породам и расстоянию. Категория: СОЧД

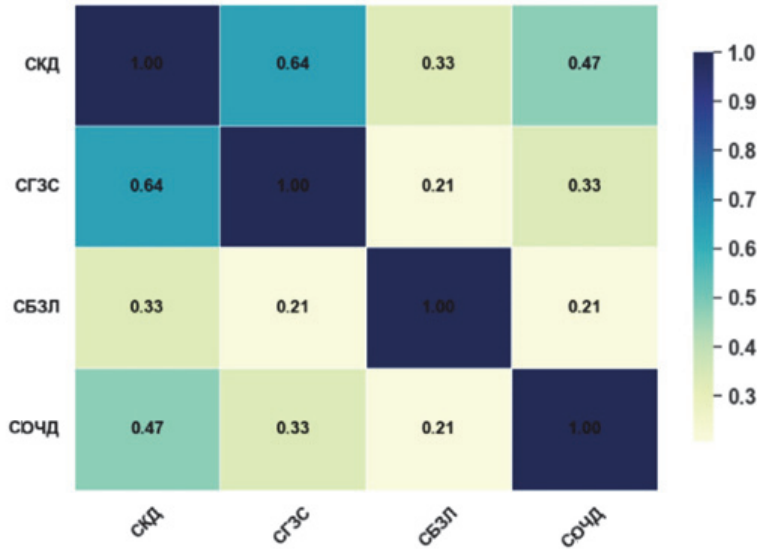


Рис. 11. Корреляция между СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД

Таблица 4

Описание признаков с учетом коэффициента СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД

Пара признаков	Коэффициент	Значение
СКД – СГЗС	0,64	Достаточно сильная положительная связь, свидетельствующая о сходстве результата восстановления нарушенного участка, а именно, количество штук на 1 га достигает 1,8 тыс. шт/га при расстоянии от стены леса 50 м. При увеличении расстояния более 100 м количество сокращается до 1,1 тыс. шт/га
СКД – СОЧД	0,47	Умеренная положительная связь – более равномерное распределение естественного возобновления на нарушенном лесном участке в количестве 2,0 тыс. шт/га при расстоянии от стены леса 50 м. При увеличении расстояния более 100 м количество сокращается до 1,2 тыс. шт/га
СКД – СБЗЛ	0,33	Небольшая положительная связь – демонстрирующая естественное возобновление на расстоянии более 100 м количество 1,4 тыс. шт/га
СГЗС – СОЧД	0,33	Тоже умеренно небольшая положительная связь по количеству естественного восстановления
СБЗЛ – СГЗС	0,21	Очень слабая связь по количеству естественного восстановления
СБЗЛ – СОЧД	0,21	Слабая связь свидетельствует о том, что в условиях СБЗЛ на расстоянии 50 м от семенников густота соответствует достаточному количеству естественного возобновления леса и не требуется проведение мероприятий по созданию лесных культур (5,0 тыс. шт/га), а в условиях ЕОЧД (2,2 тыс. шт/га)

Наиболее тесная положительная связь наблюдается между СКД и СГЗС ($r = 0,64$), что указывает на закономерное соответствие между густотой древостоя. Остальные корреляции – умеренные и слабые, особенно для признака СБЗЛ, который практически не зависит от других факторов. Это подчёркивает, что структура и масса зелёной листвы регулируются иными условиями, возможно, породным составом, возрастом или микроклиматом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования на нарушенном участке впервые для подзоны северной тайги определена структура типов леса, подвергшихся нарушению: ельники долгомошники (55,8 %), сосняки сфагновые (25,3 %), сосняки долгомошные (18,3 %) и сосняки брусничники (0,6 %).

Выявлено, что после вырубki указанных типов леса образуются сосняки бруснично-зеленомошно-лишайниковые (66,2 %), сосняки кустарничково-долгомошные (18,8 %), сосняки голубично-зеленомошно-сфагновые (14,7 %) и сосняки осоково-чернично-долгомошные (0,3 %) от общей площади нарушенного участка.

Одновременно для подзоны северной тайги авторами проведена оценка естественного лесовосстановления нарушенных лесных участков, которое протекает крайне медленно, неравномерно и имеет существенное различие по густоте. При этом в составе хвойного молодняка преобладает сосна и не в значительном количестве присутствует ель и лиственница. Среди мягколиственных доминирует береза и осина [Морозов и др. 2023].

Для достижения поставленной цели сегментация нарушенных участков проведена с учетом следующих оценочных критериев: тип лесорастительных условий, количество жизнеспособных экземпляров древесной растительности на 1 га, удаленность от прилегающего насаждения и высоты. Указанные критерии выбраны авторами на основании результатов натур-

ных исследований, позволивших установить их связь с естественным возобновлением основных лесобразующих пород. Полученные знания об особенностях формирования новых выделов позволят повысить эффективность принятия управленческих решений в ходе процесса восстановления нарушенных лесных участков.

В ходе исследования установлено, что самая продуктивная и развитая группа лесных условий объединена в кластер 1. Этой группе соответствуют следующие параметры оценочных критериев – расстояние от прилегающих семенников до 50 м для следующих типов лесорастительных условий и густоты естественного возобновления: СКД (54,5 шт/га), СГЗС (63,3 шт/га), СБЗЛ (102,5 шт/га); и СОЧД (59,8 шт/га). Это позволяет выделить случаи, при которых мероприятия по содействию естественному возобновлению лесов будут соответствовать требованиям, установленным лесным законодательством.

На основании полученных сведений выявлена корреляционная связь между установленными в рамках настоящего исследования группами лесорастительных условий (СКД, СГЗС, СБЗЛ и СОЧД):

Изложенные результаты корреляционного анализа позволяют сделать вывод о необходимости проведения мероприятий по искусственному лесовосстановлению в случаях: в типах лесорастительных условий сосняках долгомошных, сфагновых, черничных, удаленности участков от прилегающего лесного насаждения на расстоянии более 50 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Башегуров К. А., Жигулин Е. В., Жижин С. М., Магасумова А. Г. Совершенствование лесовосстановления сосновых лесов подзоны северной тайги // Актуальные проблемы лесного комплекса. Брянск : Изд-во Брянск. гос. инженер.-технологич. ун-та, 2020, № 58. С. 3–6.

2. Борко А. Ч. Влияние расстояния от стен леса на формирование самосева и подроста после проведения

полосно-постепенных рубок // Труды БГТУ. 2012. № 1. С. 72–74.

3. Брыжко В. Г. Назначение восстановления нарушенных земель в современных экономических условиях // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 105–109.

4. Зарипов Ю. В., Осипенко Р. А., Залесова Е. С., Залесов С. В. Опыт рекультивации различных видов нарушенных земель // Экобиотех. 2020. Т. 3, № 4. С. 621–626.

5. Инструкции по сохранению подроста и молодняка хозяйственно ценных пород при разработке лесосек и приемке от лесозаготовителей вырубков с проведенными мероприятиями по восстановлению леса : утв. Приказом Гослесхоза СССР от 08.12.1983 г. № 147.

6. Копцева Е. М., Абакумов Е. В. Первичные сукцессии растительности и почв на карьерах в подзоне северной тайги (на территории Ухтинского и Сосногорского районов Республики Коми) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология. 2013. № 1. С. 28–44.

7. Лесохозяйственный регламент Сосногорского лесничества Республики Коми : утв. приказом Министерства промышленности, природных ресурсов, энергетики и транспорте Республики Коми от 15.12.2017 г. № 2809/1.

8. Лиханова И. А. Восстановление лесных экосистем на антропогенно нарушенных территориях в подзоне крайнесеверной тайги (Усинский район) : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2004.

9. Лиханова И. А., Арчегова И. Б. Развитие теоретических и практических аспектов процесса восстановления нарушенных земель на севере Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 79–85.

10. Мартыненко В. А., Груздев Б. И., Осадчая Г. Г. Растительные ресурсы окрестностей городов Ухта и Сосногорск : монография. Ухта : Ин-т управления, информации и бизнеса, 2006. 93 с.

11. Морозов А. Е., Башегуров К. А., Залесов С. В., Осипенко Р. А. Заращение сейсмозаведочных профилей в условиях зеленомошной группы типов леса подзоны Северной тайги // Междунар. науч.-исслед. журн., 2021. Вып. 1 (103), ч. 2. С. 145–150.

12. Морозов А. Е., Белов Л. А., Башегуров К. А., Залесов С. В., Розинкина Е. П. Естественное заращение песчаных карьеров в условиях Западно-Сибирского северо-таежного равнинного лесного района // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 243. С. 86–99.

13. Нгуен Ван Зинь, Грязькин А. В., Беляева Н. В., Фан Тхань Лам, Шахов А. Г. Естественное возобновление хвойных пород на площадях лесных культур // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 223. С. 6–15.

14. Осипенко Р. А., Жижин С. М., Башегуров К. А., Морозов А. Е. Рекультивация сухоройных карьеров в условиях Северной подзоны тайги Западной Сибири. URL: <http://bio.urgau.ru> (дата обращения: 03.10.2020).

15. О проведении рекультивации и консервации земель : Постановление Правительства Российской Федерации от 10.07.2018 г. № 800.

16. Об утверждении Порядка отнесения земель, предназначенных для лесовосстановления, к землям,

на которых расположены леса, и формы соответствующего акта : Приказ Минприроды России от 11.03.2019 г. № 150.

17. Об утверждении Правил лесоразведения, формы, состава, порядка согласования проекта лесоразведения, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесоразведения : Приказ Минприроды России от 20.12.2021 г. № 978.

18. Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления : Приказ Минприроды России от 29.12.2021 г. № 1024.

19. Сунгурова Н. Р., Сунгуров Р. В., Страздаускас С. Е. Культуры сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) на рекультивируемых землях // Вестник КрасГАУ. 2014. № 11(98). С. 170–173.

20. Kaufman L., Rousseeuw P. J. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Wiley-Interscience. 2009.

21. Bholowalia P., Kumar A. EBK-Means: A Clustering Technique based on Elbow Method and K-Means // International Journal of Computer Applications, 2014. Vol. 105(9). P. 17–24.

REFERENCES

1. Bashegurov K. A., Zhigulin E. V., Zhizhin S. M., Magasumova A. G. Sovershenstvovanie lesovosstanovleniya sosnovy'x lesov podzony' severnoj tajgi // Aktual'ny'e problemy' lesnogo kompleksa. Bryansk : Izd-vo Bryansk. gos. Inzhener.-texnologich. un-ta, 2020. № 58. S. 3–6.

2. Borko A. Ch. Vliyanie rasstoyaniya ot sten lesa na formirovanie samoseva i podrosta posle provedeniya polosno-postepenny'x rubok // Trudy BGTU. 2012. № 1. S. 72–74.

3. Bry'zhko V. G. Naznachenie vosstanovleniya narushenny'x zemel' v sovremenny'x e'kono-micheskix usloviyax // Fundamental'ny'e issledovaniya. 2017. № 6. S. 105–109.

4. Zari'pov Yu. V., Osipenko R. A., Zalesova E. S., Zalesov S. V. Opy't rekul'tivacii raz-lichny'x vidov narushenny'x zemel'. E'kobiotech, 2020, T. 3, № 4. S. 621–626.

5. Instrukcii po soxraneniyu podrosta i molodnyaka hozyajstvenno cenny'x porod pri razrabotke lesosek i priemke ot lesozagotovitelej vy'rubok s provedenny'mi meropri-yat'yami po vosstanovleniyu lesa: utverzhdena prikazom Gosleskhoz SSSR ot 08.12.1983 g. № 147.

6. Kopceva E. M., Abakumov E. V. Pervichny'e sукцессии rastitel'nosti i pochv na kar'erax v podzone severnoj tajgi (na territorii Uxtinskogo i Sosnogorskogo rajonov Respubliki Komi) // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 3. Biologiya. 2013. № 1. S. 28–44.

7. Lesoxozyajstvenny'j reglament Sosnogorskogo lesnichestva Respubliki Komi : utverzhdenny'j prikazom Ministerstva promy'shlennosti, prirodny'x resursov, e'nergetiki i transporte Respubliki Komi ot 15.12.2017 g. № 2809/1.

8. Lixanova I. A. Vosstanovlenie lesny'x e'kosistem na antropogenno narushenny'x territoriyax v podzone

krajnesevernoj tajgi (Usinskij rajon). Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata biologicheskix nauk. Sy'kty'vkar, 2004.

9. Lixanova I. A., Archegova I. B. Razvitie teoreticheskix i prakticheskix aspektov processa vosstanovleniya narushenny'x zemel' na severe Respubliki Komi // Teoreticheskaya i prikladnaya e'kologiya. 2014. № 3. S. 79–85.

10. Marty'nenko V. A., Gruzdev B. I., Osadchaya G. G. Rastitel'ny'e resursy' okrestnostej gorodov Uxta i Sosnogorsk: monografiya. Uxta : In-t upravleniya, informacii i biznesa, 2006. 93 s.

11. Morozov A. E., Bashegurov K. A., Zalesov S. V., Osipenko R. A. Zarastanie sejsmoraz-vedochny'x profilej v usloviyax zelenomoshnoj gruppy' tipov lesa podzony' Severnoj tajgi // Mezhdunar. nauch.-issled. zhurn., 2021. Vy'p. 1 (103), ch. 2. S. 145–150.

12. Morozov A. E., Belov L. A., Bashegurov K. A., Zalesov S. V., Rozinkina E. P. Estestvennoe zarastanie peschany'x kar'erov v usloviyax Zapadno-Sibirskogo severo-taehnogo ravninnogo lesnogo rajona // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii. 2023. № 243. S. 86–99.

13. Nguen Van Zin', Gryaz'kin A. V., Belyaeva N. V., Fan Txan' Lam, Shaxov A. G. Estestvennoe vozobnovlenie xvojny'x porod na ploshhadyax lesny'x kul'tur // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii. 2018. Vy'p. 223. S. 6–15.

14. Osipenko R. A., Zhizhin S. M., Bashegurov K. A., Morozov A. E. Rekul'tivaciya suxo-rojny'x kar'erov v usloviyax Severnoj podzony' tajgi Zapadnoj Sibiri. URL: <http://bio.urgau.ru> (data obrashheniya: 03.10.2020).

15. O provedenii rekul'tivacii i konservacii zemel' : Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 10.07.2018 g. № 800.

16. Ob utverzhdenii Poryadka otneseniya zemel', prednaznachenny'x dlya lesovosstanovleniya, k zemlyam, na kotory'x raspolozheny' lesa, i formy' sootvetstvuyushhego akta : Prikaz Minprirody' Rossii ot 11.03.2019 g. № 150.

17. Ob utverzhdenii Pravil lesorazvedeniya, formy', sostava, poryadka soglasovaniya proekta lesorazvedeniya, osnovanij dlya otkaza v ego soglasovanii, a takzhe trebovanij k formatu v e'lektronnoj forme proekta lesorazvedeniya : Prikaz Minprirody' Rossii ot 20.12.2021 g. № 978.

18. Ob utverzhdenii Pravil le-sovosstanovleniya, formy', sostava, poryadka soglasovaniya proekta lesovosstanovleniya, osnovanij dlya otkaza v ego soglasovanii, a takzhe trebovanij k formatu v e'lektronnoj forme proekta lesovosstanovleniya : Prikaz Minprirody' Rossii ot 29.12.2021 g. № 1024.

19. Sungurova N. R., Sungurov R. V., Strazdauskas S. E. Kul'tury' sosny' oby'kvennoj (*Pinus silvestris* L.) na rekul'tiviruemy'x zemlyax // Vestnik KrasGAU. 2014. № 11(98). S. 170–173.

20. Kaufman L., Rousseeuw P. J. (2009). Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Wiley-Interscience.

21. Bholowalia P., Kumar, A. (2014) EBK-Means: A Clustering Technique based on El-bow Method and K-Means. International Journal of Computer Applications, 105(9), 17–24.

© Камашев А. А., Савченкова В. А.,
Хорькова М. И., 2026

Поступила в редакцию 25.11.2025
Принята к печати 26.06.2026