



Научная статья

УДК 630*0

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-114-135

Лесоэксплуатационное районирование лесных субарктических территорий

П.В. Будник^{1✉}, *д-р техн. наук*; *ResearcherID: E-1782-2015*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-4442>

В.Н. Баклагин², *канд. техн. наук, науч. сотр.*; *ResearcherID: M-2265-2016*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0060-1653>

О.Н. Галактионов¹, *д-р техн. наук*; *ResearcherID: AAE-5888-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0768-3628>

¹Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; budnikpavel@yandex.ru[✉], ong66@mail.ru

²Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, просп. Александра Невского, д. 50, г. Петрозаводск, Россия, 185030; slava.baklagin@mail.ru

Поступила в редакцию 28.01.23 / Одобрена после рецензирования 03.05.23 / Принята к печати 06.05.23

Аннотация. Цель данного исследования – классификация территорий лесного фонда Республики Карелии и Мурманской области на уровне центральных лесничеств на основе многофакториальной оценки ресурсов древесины, природно-производственных условий и дорожной инфраструктуры. Проведено лесоэксплуатационное районирование с учетом 20 переменных. Для этого последовательно применены факторный и иерархический кластерный анализ, метод *k*-средних и дискриминантный анализ. При помощи статистических методов все центральные лесничества распределены по 9 кластерам: 4 крупных (№ 2, 3, 8, 9), включающих несколько лесничеств, и 5 (№ 1, 4–7), каждый из которых сформирован одним лесничеством. Лесничества кластера № 2 имели большую расчетную лесосеку, значительные запасы леса на гектаре и запасы лиственных пород. Лесничества кластера № 3 характеризовались малыми расчетной лесосекой и запасом леса на гектаре. Для лесничеств кластера № 8 отмечены средние по региону расчетная лесосека и запасы леса на гектаре, высокая доля лесов, находящихся в условиях застойного увлажнения. Лесничества кластера № 9 по своим характеристикам занимали промежуточное положение между лесничествами кластеров № 2 и 8. Лесничество кластера № 1 по своим особенностям близко к лесничествам кластера № 2, но леса в нем продуктивнее. У лесничеств малых кластеров № 4, 6, 7 самый высокий запасы леса на гектаре. Различия по некоторым переменным не позволили объединить их в один кластер. Лесничество кластера № 5 схоже по природно-производственным условиям с лесничествами кластера № 3, однако имело небольшую расчетную лесосеку по хвойному компоненту. Результаты исследования могут быть учтены при решении вопросов организации и развития лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса в Республике Карелии и Мурманской области.

Ключевые слова: районирование, факторный анализ, кластерный анализ, метод k-средних, дискриминантный анализ, лесозаготовки, управление лесами

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФ № 23-21-00143, <https://rscf.ru/project/23-21-00143/>.

Для цитирования: Будник П.В., Баклагин В.Н., Галактионов О.Н. Лесоэксплуатационное районирование лесных субарктических территорий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 114–135. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-114-135>

Original article

Forest Exploitation Zoning of Forest Subarctic Territories

Pavel V. Budnik¹, Doctor of Engineering; ResearcherID: [E-1782-2015](https://orcid.org/0000-0002-8701-4442),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-4442>

Vyacheslav N. Baklagin², Candidate of Engineering, Research Scientist;

ResearcherID: [M-2265-2016](https://orcid.org/0000-0002-0060-1653), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0060-1653>

Oleg N. Galaktionov¹, Doctor of Engineering; ResearcherID: [AAE-5888-2020](https://orcid.org/0000-0003-0768-3628),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0768-3628>

¹Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; budnikpavel@yandex.ru[✉], ong66@mail.ru

²Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, prosp. Alexandra Nevskogo, 50, Petrozavodsk, 185030, Russian Federation; slava.baklagin@mail.ru

Received on January 28, 2023 / Approved after reviewing on May 3, 2023 / Accepted on May 6, 2023

Abstract. The purpose of this study is to classify the territories of the forest fund of the Republic of Karelia and Murmansk region at the level of central forestries on the basis of multifactorial assessment of timber resources, natural and production conditions, and road infrastructure. Forest exploitation zoning was carried out taking into account 20 variables. For this purpose, factor and hierarchical cluster analysis, k-means method and discriminant analysis were successively applied. Based on statistical methods, all central forestries were distributed into 9 clusters: 4 large clusters (No. 2, 3, 8, 9), including several forestries, and 5 (No. 1, 4–7), each formed by one forestry. Forestries of cluster No. 2 had large annual allowable cut (AAC), significant average forest reserve per hectare and hardwood reserve. Forestries of cluster No. 3 were characterized by small AAC and forest reserves per hectare. Cluster No. 8 forestries were characterized by average AAC and forest stock per hectare, high proportion of forests in stagnant moisture conditions. Forestries of cluster No. 9 were intermediate in their characteristics between the forestries of clusters No. 2 and No. 8. The forestry of cluster No. 1 is close to the forestry of cluster No. 2 in its characteristics, but its forests are more productive. Forestries of small clusters No. 4, 6, 7 have the highest forest stock per hectare. Differences in some variables did not allow them to be combined into one cluster. The forestry of cluster No. 5 is similar in terms of natural and production conditions to the forestry of cluster No. 3 but had a small estimated harvesting area for the coniferous component. The results of the study can be considered when solving the issues of organization and development of forestry and forest industry complex in the Republic of Karelia and Murmansk region.

Keywords: zoning, factor analysis, cluster analysis, k-means method, discriminant analysis, logging, forest management

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-21-00143, <https://rscf.ru/en/project/23-21-00143/>.

For citation: Budnik P.V., Baklagin V.N., Galaktionov O.N. Forest Exploitation Zoning of Forest Subarctic Territories. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 114–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-114-135>

Введение

На Российскую Федерацию приходится 20 % мировых лесов. Общий запас древесины лесных насаждений, по данным Единой межведомственной информационно-статистической системы, на 2022 г. составляет 82,5 млрд м³ при общей площади 1,19 млрд га. Колоссальные запасы древесины территориально распределены по значительной площади, а лесные территории имеют большое разнообразие природно-производственных условий. Поэтому эффективное стратегическое государственное управление в сфере лесного хозяйства и экономики является сложной комплексной задачей, от решения которой зависит эффективность использования лесных ресурсов и развитие экономик субъектов Российской Федерации.

Неоднородность характеристик лесных территорий обуславливает необходимость в отдельных частях лесного фонда предпринимать особые меры по организации лесного хозяйства и лесопользованию. Основой для организации региональных систем управления лесными ресурсами в этом случае может служить комплексное лесоэксплуатационное районирование [3]. Под районированием мы понимаем процесс деления территорий на отдельные районы, каждый из которых объединяет лесные площади со схожими показателями. Деление лесных территорий на однородные группы в лесоэксплуатационном отношении позволяет рационально проектировать мероприятия, направленные на экономически эффективное освоение лесных ресурсов, включая заготовку древесины и ее переработку, и обеспечить сохранение биологического разнообразия, самовоспроизводство и продуктивность лесных массивов.

При тематическом районировании, в частности почвенном, климатическом, лесорастительном, не нужно обоснования результатов статистическими методами, т. к. классификация основана на вариации одного параметра, реже двух. Однако районирование, базирующееся на множестве параметров, требует иного подхода. В настоящее время для многомерной классификации лесных территорий широко применяются статистические методы, например факторный и кластерный анализ [25, 27, 32, 41]. Это позволяет получать более достоверные данные при районировании территорий. В России также проведены исследования, направленные на применение статистических методов для решения задачи классификации лесных территорий [1, 34].

Одной из проблем при районировании является выбор параметров, на основе которых будут сравниваться лесные территории. При разработке ме-

роприятий, направленных на экономически эффективное освоение лесных ресурсов, необходимо учитывать факторы, влияющие на лесозаготовки. Исследователями отмечается [10, 38], что эффективность лесозаготовительных кампаний в России определяется рядом факторов: объемом доступной древесины, производственными мощностями и спросом на продукцию. Объем доступной древесины зависит от величины расчетной лесосеки, которая устанавливается для эксплуатационных и защитных лесов по лиственному и хвойному компонентам. Транспортные затраты составляют значительную долю операционных затрат на заготовку древесины [28, 29]. Поэтому часть древесины может быть экономически недоступна для освоения.

Нами не учитывался спрос на продукцию. Однако в связи с особенностями породного состава леса рассматривалось предложение объекта спроса, т. е. продукция, которая может быть произведена из имеющейся древесины для целей ее комплексной переработки. Также принят во внимание фактор восполнения запасов древесины в будущем периоде, выраженный в виде доли площади приспевающих насаждений от общей лесопокрытой площади региона исследования.

В контексте данного исследования в фокусе внимания были природно-производственные условия, которые влияют на производительность машин и механизмов. В частности, хорошо известно влияние среднего запаса древесины на гектаре и размера деревьев на производительность харвестера [20, 23] и форвардера [21, 26, 33]. Обычно отмечается увеличение производительности с возрастанием среднего запаса древесины на гектаре и размеров отдельных деревьев. Эффективность лесозаготовительных машин, в особенности транспортных, зависит от почвенно-грунтовых условий [9, 33]: на переувлажненных почвах производительность снижается. Кроме того, работа техники на переувлажненных почвах вызывает разрушение почвенного покрова [6, 22]. Породный состав также может существенно воздействовать на производительность машин и оборудования [14, 24, 31]. Работа лесозаготовительных машин более продуктивна в хвойных насаждениях, чем в лиственных. Породный состав определяет хозяйственную ценность древостоя. Существенно на производительность лесозаготовительных машин влияет вид рубки [7, 40]. При сплошных рубках производительность харвестера и форвардера выше, чем при выборочных.

Геополитическое значение Арктической зоны в последние десятилетия неуклонно возрастает [11]. Это приводит к повышению внимания арктических государств к развитию своих северных территорий и решению проблем экологического управления [13]. Выбор Республики Карелии и Мурманской области в качестве региона исследования обусловливается тем, что данные субъекты Российской Федерации являются важными стратегическими приграничными районами Арктической зоны. Оба субъекта имеют лесопромышленный комплекс, включающий лесное хозяйство, лесную и деревообрабатывающую промышленность.

Цель – кластеризация лесных территорий района исследования на уровне центральных лесничеств на основе полифакториальной оценки ресурсов древесины, природно-производственных условий и инфраструктуры, обеспечивающей освоение и охрану лесов.

Объекты и методы исследования

Мурманская область и Республика Карелия находятся на северо-западе европейской части России на границе с Финляндией и входят в Арктическую зону Российской Федерации [8]. Общий запас древесины в регионе исследования оценивается в 1409,57 млн м³. Большая часть приходится на Республику Карелию – 1071,73 млн м³, в Мурманской области – 237,84 млн м³. Площадь лесных земель, покрытых лесной растительностью, составляет 15 034,1 тыс. га: 9607,7 тыс. га для Республики Карелии и 5426,4 тыс. га для Мурманской области. Объем заготовки древесины в Республике Карелии, по данным официальной статистики, в 2021 г. составил 8099,3 тыс. м³, а в Мурманской области – 96,97 тыс. м³.

В направлении с юга на север в регионе исследования климатические и почвенно-гидрологические условия постепенно изменяются в сторону, неблагоприятную для роста и развития продуктивных лесов. Наблюдается снижение температуры воздуха, мощности и аэрации почв. Это ограничивает распространение продуктивных лесов в северном направлении. Леса составлены такими породами, как сосна, ель, береза и осина. Преобладают хвойные породы. На юге региона исследования в основном произрастают еловые леса, а в центральной и северной части – сосновые. На севере, на границе перехода тайги в тундру, простираются лесотундровые березовые редколесья.

Лесопользование предполагает межевание лесных земель на центральные лесничества. Республика Карелия разделена на 17 центральных лесничеств, а Мурманская область – на 10.

Для целей настоящего исследования были собраны данные по 27 центральным лесничествам, относящиеся к качественным и количественным характеристикам ресурсов древесины, их инфраструктурной доступности и природно-производственным условиям. Набор данных включал 20 переменных: 4 из них описывали количественные характеристики ресурсов древесины; 9 – качественные; 3 – дорожную сеть; 4 – природно-производственные условия (табл. 1).

Таблица 1

Описательные статистики переменных, характеризующих центральные лесничества Республики Карелии и Мурманской области
Descriptive statistics of variables characterizing central forestries in the Republic of Karelia and Murmansk region

Обозначение переменной	Описание	Среднее	Стандартное отклонение
R_f	Расчетная лесосека при всех видах рубок по хвойному компоненту (ликвидный), тыс. м ³	388,61	358,88
R_d	Расчетная лесосека при всех видах рубок по мягколиственному компоненту (ликвидный), тыс. м ³	78,59	129,26
Rcf_f	Расчетная лесосека для осуществления сплошных рубок спелых и перестойных лесных насаждений по хвойному компоненту в эксплуатационных лесах (ликвидная), тыс. м ³	235,41	267,39

Окончание табл. 1

Обозначение переменной	Описание	Среднее	Стандартное отклонение
Rcf_d	Расчетная лесосека для осуществления сплошных рубок спелых и перестойных лесных насаждений по мягколиственному компоненту в эксплуатационных лесах (ликвидная), тыс. м ³	57,07	100,88
Vp_4_5	Средний запас эксплуатационного фонда по сосне IV–V бонитета (сплошные рубки), м ³ /га	110	52
Vp_1_3	Средний запас эксплуатационного фонда по сосне I–III бонитета (сплошные рубки), м ³ /га	141	120
Vs_4_5	Средний запас эксплуатационного фонда по ели IV–V бонитета (сплошные рубки), м ³ /га	115	69
Vs_1_3	Средний запас эксплуатационного фонда по ели I–III бонитета (сплошные рубки), м ³ /га	118	126
Vb	Средний запас эксплуатационного фонда по березе (сплошные рубки), м ³ /га	111	65
Va	Средний запас эксплуатационного фонда по осине (сплошные рубки), м ³ /га	81	102
MF_f	Доля площади приспевающих хвойных древостоев (сплошные рубки) от общей площади лесничества, отведенной под сплошные рубки, %	1,6	1,8
MF_d	Доля площади приспевающих мягколиственных древостоев (сплошные рубки) от общей площади лесничества, отведенной под сплошные рубки, %	0,6	1,1
V_g	Расчетный средний запас леса (отношение запаса древесины к лесопокрытой площади), м ³ /га	92,70	49,99
P	Плотность дорог, км/тыс. га	2,6	1,5
W_h	Доля автомобильных дорог с твердым покрытием по протяженности, %	28	23
W_s	Доля автомобильных грунтовых дорог круглогодичного действия по протяженности, %	55	27
III	Доля площади лесничества с 3-м классом природной пожарной опасности, %	18,9	9,0
IV	Доля площади лесничества с 4-м классом природной пожарной опасности, %	24,6	12,8
V	Доля площади лесничества с 5-м классом природной пожарной опасности, %	28,3	15,1
AUF	Доля земель, покрытых лесной растительностью (лесистость), %	66	15

В качестве переменных, характеризующих природно-производственные условия, в исследовании предлагается использовать косвенную оценку, основанную на классификации лесных территорий по классам природной пожарной опасности. В Российской Федерации выделяется 5 классов. В анализ были включены доли лесных территорий центральных лесничеств, приходящихся на 3–5-й классы природной пожарной опасности.

1- и 2-й классы природной пожарной опасности составляют территории сосняков-брусничников, хвойных молодняков, сплошных рубок, а также расстроенных, отмирающих и сильно поврежденных древостоев. К 3- и 4-му классам обычно относят территории, приходящиеся на сосняки-кисличники и черничники, ельники-брусничники и кисличники. В лесах 4-го класса условия более влажные, чем в лесах 3-го класса. В целом эти территории характеризуются сравнительно более сухими почвами и преобладанием хвойных пород. К 5-му классу относятся леса с превалированием лиственных пород (березняки, осинники), а также ельники с относительно высокой степенью влажности. Это обуславливает специфику ведения лесозаготовительных работ, в частности необходимость соблюдения периода заготовки, выбора способа разработки лесосеки и наличие мер, связанных с минимизацией воздействия на почвенный покров леса [15, 42]. Для интерпретации природно-производственных условий мы использовали классификацию типов леса В.Н. Сукачева [2]. Классификация рассматривает тип леса как тип лесного биогеоценоза и соответствующий этому сообществу участок земной поверхности с присущими ему эдапотом и климатотом. Сопоставляя классификацию типов леса В.Н. Сукачева и описание классов природной пожарной опасности, мы проинтерпретировали природно-производственные условия.

Источниками данных стали документы лесного планирования субъектов (лесные планы) и лесохозяйственные регламенты центральных лесничеств, являющиеся основой для использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов.

Для кластеризации лесных территорий на уровне центральных лесничеств последовательно применялись факторный [36], кластерный [16] и дискриминантный [12] анализ. Анализ данных проведен в MS Excel и программе SPSS Statistics.

Цели применения факторного анализа – устранение мультиколлинеарности и сокращение числа переменных для кластерного анализа. В результате рассчитаны собственные значения факторов, далее использованные в кластерном анализе. Извлечение факторов осуществлялось методом главных осей. Количество факторов, характеризующих объясненную совокупную дисперсию данных, определялось по критерию Кайзера [17]. Для получения простой структуры факторов применен метод Варимакс [18]. Верность факторного анализа как метода работы с конкретными данными контролировалась по критерию адекватности выборки Кайзера–Мейера–Олкина (КМО) [19] и критерию сферичности Бартлетта [5].

Кластерный анализ включал 3 этапа. На 1-м этапе для определения оптимального числа кластеров использовался иерархический кластерный анализ [16]. Были применены несколько методов кластеризации и мер сходства для анализа

возможных различий в классификации и выявления территорий центральных лесничеств, которые однозначно не классифицируются. Методы кластеризации и меры сходства, используемые ими, следующие: для методов межгрупповой связи (средней связи) и наиболее удаленных соседей (полной связи) мерами сходства являются евклидово расстояние, квадрат евклидова расстояния, расстояние Манхэттена, расстояние Чебышева; для метода Уорда мера сходства – квадрат евклидова расстояния. Необходимое количество кластеров определялось по изменению меры сходства между кластерами в процессе последовательного объединения лесных территорий в кластеры. Сравнительный анализ состава кластеров проводился по дендрограммам. Для однозначной классификации центральных лесничеств, которые объединяются в различные кластеры при использовании разных методов кластеризации, учитывалась дополнительная информация. В частности, использовались сведения топографических, почвенных карт и другие данные из лесных планов и лесохозяйственных регламентов центральных лесничеств. На 2-м этапе для определения состава кластеров применен метод итеративной кластеризации k-средних. Данный метод может давать более точную классификацию [4]. На 3-м этапе результаты итеративной кластеризации сравнивались с результатами иерархического кластерного анализа и принималось окончательное решение по составу кластеров с учетом дополнительной информации, собранной на этапе иерархического кластерного анализа.

Для подтверждения достоверности результатов кластеризации лесничеств выполнен дискриминантный анализ. Совпадение результатов дискриминантного анализа с результатами кластерного анализа подтверждало правильность полученной классификации лесничеств при условии достоверности результатов дискриминантного анализа. В свою очередь, достоверность результатов дискриминантного анализа обосновывалась расчетом следующих критериев:

оценка взаимосвязи между расчетными значениями дискриминантных функций и принадлежности лесничества к кластеру была основана на расчете коэффициента канонической корреляции;

различия средних значений дискриминантных функций, т. е. значимость различия между кластерами, оценивались при помощи лямбды Уилкса;

статистическая значимость дискриминантных функций подтверждалась критерием Пирсона.

Результаты исследования и их обсуждение

Величина КМО составила 0,708, что позволило сделать вывод о возможности применения факторного анализа к данным. Значение КМО менее 0,5 неприемлемо [19]. Критерий сферичности Бартлетта показал значимое отличие от нулевой корреляции между переменными ($p < 0,001$). Общность переменных находилась в интервале от 0,560 до 0,941. Поэтому все переменные были оставлены для анализа. В соответствии с критерием Кайзера выделено 5 факторов, объясняющих 81,4 % общей дисперсии переменных. Описание выделенных факторов приведено в табл. 2.

Таблица 2

Интерпретация извлеченных факторов
Extracted factors interpretation

Обозначение фактора	Название	Доля общей дисперсии переменных, объясненная фактором, %	Переменные, наиболее нагружающие фактор	Нагрузка на фактор
F1	Ценность эксплуатационного фонда	43,7	Vp_4_5	0,910
			Vp_1_3	0,909
			Vs_4_5	0,878
			Vb	0,875
			Vs_1_3	0,745
			MF_f	0,613
F2	Соответствие территории природным условиям произрастания лиственных пород и уровень расчетной лесосеки по мягколиственному компоненту	15,6	IV	0,810
			R_d	0,766
			Rcf_d	0,755
			MF_d	0,669
F3	Благоприятность природно-производственных условий	10,0	AUF	0,871
			III	0,778
			P	0,730
			V_g	0,714
			V	-0,641
F4	Расчетная лесосека по хвойному компоненту	7,5	R_f	0,778
			Rcf_f	0,764
F5	Качество дорожной сети	4,6	W_h	0,853
			W_s	-0,831

Оптимальное число кластеров по результатам иерархического кластерного анализа составило 9 (рис. 1).

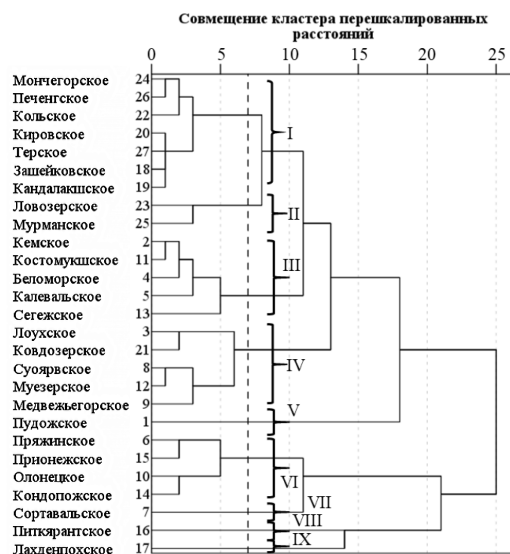


Рис. 1. Дендрограмма иерархического кластерного анализа. Метод кластеризации – метод наиболее удаленного соседа, мера сходства – квадрат евклидова расстояния

Fig. 1. Dendrogram of hierarchical cluster analysis. Clustering method – the method of the most distant neighbor, similarity measure – the square of Euclidean distance

Методом *k*-средних центральные лесничества региона исследования окончательно были разделены на 9 кластеров (рис. 2).

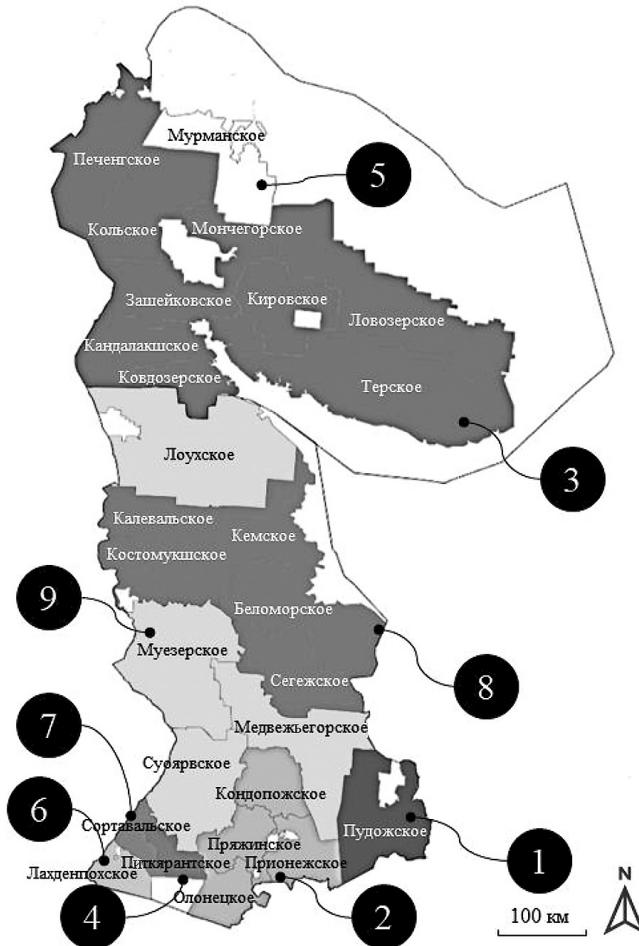


Рис. 2. Карта-схема лесоэксплуатационных районов Республики Карелии и Мурманской области (N – север)

Fig. 2. Map-chart of forest exploitation areas of the Republic of Karelia and Murmansk region (N – north)

Кластеры, состоящие из нескольких лесничеств:

Кластер № 2. Включает 4 центральных лесничества, расположенных в южной части Республики Карелии. Территория характеризуется высокой степенью лесистости (табл. 3). Объем расчетной лесосеки выше среднего по региону исследования. При этом в среднем по кластеру более половины расчетной лесосеки отведено под сплошные рубки. Это говорит о значительном текущем потенциале лесозаготовок. Кластер имеет самую большую в регионе исследования долю приспевающих эксплуатационных лесов, отведенных под сплошные рубки. Однако эта доля незначительна, что свидетельствует о проблеме восполнения спелых и перестойных эксплуатационных лесов при их вырубке.

Таблица 3

Среднее значение некоторых переменных для кластеров
Average value of some variables for clusters

Номер кластера	AUF	R_f	R_d	Rcf_f / R_f, %	Rcf_d / R_d, %	MF_f	MF_d
1	80	1222,1	537,4	67	76	3,6	2,4
2	81	526,3	232,4	50	67	4,2	2,1
3	59	64,3	5,1	69	60	0,4	0,2
4	90	360,2	51,5	0	0	0	0
5	53	11,1	0	0	0	0	0
6	86	399,6	53,1	3	16	0,3	0,2
7	85	403,1	60,9	9	20	0,4	0,1
8	54	342,7	14,1	66	79	1,4	0,1
9	64	924,8	93,2	74	87	2,7	0,3
<i>Среднее по региону</i>	66	388,6	78,6	38	45	1,6	0,6

В лесах центральных лесничеств, составляющих кластер, представлены все основные породы: сосна, ель, береза и осина. При этом средний запас леса по лиственным породам – один из самых высоких в регионе исследования (табл. 4).

Таблица 4

Средний запас (м³/га) леса по породам для кластеров
Average forest stock (m³/ha) by species for clusters

Номер кластера	Vp_4_5	Vp_1_3	Vs_4_5	Vs_1_3	Vb	Va	V_g
1	151	275	179	260	194	258	132
2	140	240	192	245	187	224	144
3	68	0	65	0	57	0	44
4	0	0	0	0	0	0	172
5	0	0	0	0	0	0	37
6	141	223	0	254	174	169	168
7	175	278	246	263	172	0	205
8	149	222	141	133	115	72	89
9	145	237	154	194	152	123	93
<i>Среднее по региону</i>	110	141	115	118	111	81	93

Центральные лесничества кластера имеют средний расчетный запас леса выше среднего по региону исследования. Учитывая уровень лесистости, а также средние запасы леса на гектаре по породам, можно заключить, что леса расположены сравнительно равномерно по территории лесничества и их продуктивность относительно высокая.

В кластере представлены леса со значительным содержанием лиственных пород (березы, осины), ельники долгомошные, формирующиеся в услови-

ях сырых сильноподзолистых тяжелых супесей или суглино-супесей, а также более сухие сосняки-кисличники и черничники, ельники-брусничники и кисличники, где почвы влажные, средне- и сильноподзолистые, супесчаные или суглино-супеси. Распределение площади центральных лесничеств кластера по классам природной пожарной опасности приведено в табл. 5.

Таблица 5

**Распределение площади центральных лесничеств
кластеров по классам природной пожарной опасности, %
Distribution of the area of central forestry by natural fire danger classes,
on average for clusters, %**

Номер кластера	Класс опасности			
	1- и 2-й	3-й	4-й	5-й
1	20	15	41	25
2	21	22	36	21
3	31	15	30	24
4	35	35	20	10
5	13	16	38	33
6	32	31	27	11
7	19	41	27	13
8	26	16	10	46
9	36	16	12	36
<i>Среднее по региону</i>	28	19	25	28

Развитость дорожной инфраструктуры оценивается выше среднего по региону исследования (табл. 6), что тем не менее значительно меньше необходимого (10–15 км/тыс. га). Кроме того, в кластере преобладают грунтовые дороги круглогодичного действия.

Таблица 6

**Средние показатели дорожной инфраструктуры для кластеров
Road infrastructure indicators for clusters**

Номер кластера	P	W _h	W _s
1	3,0	46	54
2	3,2	29	68
3	1,9	15	60
4	7,4	26	74
5	0,8	80	18
6	5,6	100	0
7	2,6	14	71
8	2,1	32	38
9	2,8	24	69
<i>Среднее по региону</i>	2,6	28	55

Из приведенных данных следует, что характерными для лесничеств кластера являются большие расчетная лесосека, запас леса на гектаре, запас лиственных пород и распространенность в лесах ели.

Кластер № 3. Включает все центральные лесничества Мурманской области, кроме Мурманского (всего 9 лесничеств). Территория лесничеств кластера характеризуется сравнительно низкой степенью лесистости (табл. 3). Наибольшая лесистость наблюдается в южных центральных лесничествах на границе с Республикой Карелией, а также в лесничествах на границе с Финляндией и Норвегией. Здесь лесистость доходит до 70 %. Расчетная лесосека в среднем по кластеру – одна из самых небольших среди лесничеств региона исследования. Более половины расчетной лесосеки отведено под сплошные рубки (табл. 3). Проблема восполнения приспевающих эксплуатационных лесов в лесничествах кластера стоит еще острее, чем в лесничествах кластера № 2.

Лесной фонд характеризуется IV и V классами бонитета. Леса представлены преимущественно хвойными породами (сосна и ель) с примесью березы. Лесничества имеют самые низкие запасы леса на гектаре (табл. 4). Небольшой расчетный запас леса на гектаре в совокупности с уровнем лесистости позволяет дать заключение о редкостойности леса и значительной доле не покрытых лесной растительностью земель. Почвы – сырые и влажные (табл. 5). Однако встречаются и более сухие условия, что объясняется наличием пересеченного рельефа.

Дорожная инфраструктура развита слабо (табл. 6) и расположена неравномерно. Наибольшую плотность она имеет в западной и южной частях кластера, где превышает среднее значение по региону, показатель падает в северо-восточном направлении. Преобладают грунтовые дороги круглогодичного действия.

Таким образом, характерными для лесничеств кластера являются относительно небольшие лесистость, расчетная лесосека и невысокие средний запас леса на гектаре, запас лиственных пород, которые представлены исключительно березой. Дорожная инфраструктура в целом имеет крайне низкую плотность.

Кластер № 8. Составлен 5 центральными лесничествами, расположенными в северной части Республики Карелии. Лесистость в среднем по кластеру ниже средней по региону исследования (табл. 3). Объем расчетной лесосеки при всех видах рубок по хвойному компоненту в среднем по кластеру близок к среднему для региона исследования, но значительно меньше по лиственному компоненту. Более половины расчетной лесосеки отведено под сплошные рубки. В целом по кластеру доля приспевающих лесов незначительна.

В лесах кластера представлены сосна, ель, береза и осина. Запас леса на гектаре по лиственным породам в эксплуатационных спелых и перестойных лесах в среднем по кластеру выше среднего по региону исследования (табл. 4). Учитывая средний расчетный запас леса на гектаре и уровень лесистости, можно сделать заключение о том, что леса расположены неравномерно по площади лесничеств, включенных в кластер. Особенностью лесничеств кластера является большая доля лесов с сырыми сильноподзолистыми тяжелыми супесями или суглино-супесями, характеризующихся застойным увлажнением и, как правило, представленными сосняками (табл. 5).

Плотность дорог в среднем по кластеру ниже средней по региону исследования (табл. 6). Достаточно широко распространены зимние дороги, однако они сконцентрированы в северных лесничествах (Калевальское и Кемское) и практически отсутствуют в южных. Дороги с твердым покрытием имеют наибольшую протяженность в южных лесничествах (Сегежское и Беломорское) в сравнении с грунтовыми дорогами.

Итак, характерными для лесничеств кластера являются относительно небольшая лесистость, близкие к средним по региону исследования расчетная лесосека и запас леса на гектаре, большая доля лесов, расположенных в условиях застойного увлажнения, и распространенность сосны, средний запас леса на гектаре для осины незначительный. Лесничествам кластера свойственно локальное разнообразие типов дорог.

Кластер № 9. В него входят 4 центральных лесничества, преимущественно расположенных в центральной части Республики Карелии. Лесистость в среднем по кластеру находится на уровне средней по региону (табл. 3). Лесничества кластера характеризуются большой средней расчетной лесосекой по хвойному компоненту, в то время как по лиственному – на уровне среднего. Доля лесов, отведенных под сплошные рубки, самая высокая в регионе исследования.

В лесах кластера представлены все лесообразующие породы: сосна, ель, береза и осина. Лесничествам кластера свойствен более высокий средний запас леса на гектаре в сравнении с лесничествами кластера № 8, но меньший, чем у лесничеств кластера № 2 (табл. 4). Леса расположены неравномерно по территории кластера. Наиболее продуктивные находятся на юге (Суоярвское и Медвежьегорское центральные лесничества). Значительна доля лесов с застойным увлажнением, представлены, как правило, сосновые леса в сочетании с еловыми лесами и болотами (табл. 5). Леса, произрастающие на более сухой местности, концентрируются ближе к границе с Финляндией.

Плотность дорог в среднем по кластеру немного выше средней по региону (табл. 6). Наибольшую плотность дороги имеют в Суоярвском и Муезерском центральных лесничествах, а наименьшую – в самом северном Лоухском. Преобладают грунтовые дороги.

В целом характерным для лесов кластера является большой средний запас леса на гектаре, чем в лесничествах кластера № 8, но меньший, чем в лесничествах кластера № 2. Широко представлена ель. Ее распространение меньше по сравнению с кластером № 2, но больше в сравнении с кластером № 8. Территория лесничеств кластера характеризуется значительной долей лесов с застойным увлажнением. Эта доля ощутимо больше, чем в кластере № 2, но меньше, чем в кластере № 8. Аналогичная ситуация наблюдается с уровнем лесистости. По соотношению грунтовых дорог и дорог с твердым покрытием лесничества кластера схожи с лесничествами кластера № 2, но их плотность ощутимо меньше. Таким образом, характеристики лесничеств кластера занимают промежуточное, или переходное, положение между характеристиками лесничеств кластеров № 2 и 8.

Кластеры, сформированные одним лесничеством:

Кластер № 1. В кластер входит одно центральное лесничество – Пудожское, расположенное в юго-восточной части Республики Карелии на границе с Архангельской и Вологодской областями. Лесничество имеет значительную

лесистость, как и лесничества соседнего кластера № 2, и сравнительно большую расчетную лесосеку (табл. 1). Более 1/2 расчетной лесосеки отведено под сплошные рубки. Лесничество имеет те же проблемы, связанные с возмещением спелых и перестойных лесов, что и лесничества рассмотренных кластеров.

В лесах представлены все основные лесообразующие породы: сосна, ель, береза и осина. Средний запас леса на гектаре по лиственному компоненту самый значительный по региону исследования (табл. 4). Большие значения имеют только лесничества кластера № 7 (не учитывается лесничество кластера № 4, для которого нет данных о среднем запасе леса на гектаре по породам из-за отсутствия сплошных рубок). Расчетный средний запас леса на гектаре вместе с уровнем лесистости свидетельствуют о равномерности распределения лесов по площади. Природно-производственные условия характеризуются наличием сырых и влажных почв (табл. 5). Леса преимущественно еловые зеленомошные в сочетании с более влажными еловыми заболоченными. В лесах обычна примесь осины и березы.

Плотность дорог находится примерно на уровне лесничеств соседнего кластера № 2 (табл. 6). Однако соотношение грунтовых дорог и дорог с твердым покрытием иное. Доля автомобильных дорог с твердым покрытием является одной из самых высоких в регионе исследования, уступая лишь лесничествам кластеров № 5 и 6.

Таким образом, лесничество кластера наиболее схоже по природно-производственным условиям с лесничествами кластера № 2. Это подтверждается одинаковым уровнем лесистости, близким соотношением категорий лесов по природной пожарной опасности. Однако выделение данного лесничества в отдельный кластер связано с тем, что его леса в целом несколько продуктивнее, о чем свидетельствует средний запас леса на гектаре по породам. При этом лиственные породы в лесах чувствуют себя лучше: средний запас леса по березе и осине – самый большой в регионе исследования. Хотя в кластере плотность дорог незначительно меньше, чем в кластере № 2, их качество лучше (доля дорог с твердым покрытием выше).

Кластер № 4. В кластер включено Питкярантское центральное лесничество, расположенное в южной части Республики Карелии на северном берегу Ладожского озера. Соседний кластер – № 2. Лесничество кластера имеет самую большую лесистость по региону исследования (табл. 3). Расчетная лесосека немного меньше средней по региону. Меньшие значения имеют только лесничества самых северных кластеров – № 3 и 5. Особенностью данного кластера является то, что в лесах не допускаются сплошные рубки. Леса характеризуются относительно сухими почвами и представлены сосняками с примесью ели и березы, а также ельниками (табл. 5). Леса распределены равномерно по территории лесничества. Для территории кластера выявлена самая большая плотность дорог – 7,4 км/тыс. га (табл. 6). Преобладают грунтовые дороги.

Выделение Питкярантского центрального лесничества в отдельный кластер обусловлено, во-первых, отсутствием лесов, отведенных под сплошную рубку, во-вторых, более высокой плотностью дорог относительно средней по региону исследования. Кроме того, средний запас леса на гектаре больше, чем в лесничествах соседних крупных кластеров № 2 и 9. При этом лесничество

кластера характеризуется более сухими условиями произрастания лесов, т. к. доля площади с 3-м классом природной пожарной опасности – одна из самых больших и уступает только лесничеству, выделенному в кластер № 7.

Кластер № 5. Является самым северным в исследуемом регионе. Образован Мурманским центральным лесничеством, находящимся в северной части Кольского полуострова на границе с тундрой. Уровень лесистости ниже среднего (табл. 3). Средний расчетный запас леса на гектаре совпадает со средними показателями кластера № 3. Лесничество характеризуется самой маленькой расчетной лесосекой. Расчетная лесосека по лиственному компоненту отсутствует. Это является отличием рассматриваемого кластера от кластера № 3.

В лесничестве кластера не предусматривается отведение лесов под сплошные рубки, что также отличает его от лесничеств кластера № 3. Однако необходимо отметить, что в одном из лесничеств кластера № 3 (Ловозерское центральное лесничество) также не планируются сплошные рубки. Ловозерское лесничество некоторыми методами кластеризации объединялось с Мурманским лесничеством в один кластер. Большая доля территории кластера относится к местностям с застойным увлажнением и заболоченностью (табл. 5). Леса в основном сформированы сосной и елью. На границе с тундрой встречается береза.

Лесничество кластера имеет самую низкую плотность дорог (табл. 6). Следует отметить, что в кластере № 3 некоторые центральные лесничества отличаются еще меньшей плотностью дорог, но в среднем по этому кластеру она составляет 1,9 км/тыс. га. Преобладают дороги с твердым покрытием, что резко отличает кластер № 5 от кластера № 3.

В целом лесничество кластера в значительной мере схоже с лесничествами кластера № 3. Отличительными характеристиками кластера № 5 являются небольшая расчетная лесосека по хвойному компоненту и отсутствие расчетной лесосеки по лиственным породам, а также преобладание автомобильных дорог с твердым покрытием.

Кластер № 6. Сформирован Лахденпохским центральным лесничеством, занимающим территорию в южной части Республики Карелии на северном берегу Ладожского озера. Лесничество кластера имеет большую лесистость (табл. 3), что позволяет говорить о его сходстве с лесничествами других кластеров южной части Республики Карелии (№ 1, 2, 4, 7). Расчетная лесосека находится примерно на уровне других лесничеств соседних малых кластеров (№ 4 и 7). Характеризуется незначительной долей хвойных лесов, отведенных под сплошные рубки. Как и в лесничествах кластера № 4 и 7, леса произрастают на сравнительно сухих почвах и представлены еловыми древостоями, сосняками и сосновыми древостоями, местами с примесью березы (табл. 5).

Лесничество кластера имеет относительно высокую плотность дорог (табл. 6). Это приближает его к лесничеству кластера № 4. Однако практически все дороги кластера – с твердым покрытием, что не похоже на лесничества кластеров № 4 и 7.

Кластер № 7. Сформирован Сортавальским центральным лесничеством, расположенным в южной части Республики Карелии на северном берегу Ладожского озера, и примыкает с запада к кластеру № 4, с юго-запада граничит с кластером № 6. Лесистость значительно выше средней и находится примерно на том же уровне, что и в лесничестве кластера № 4 (табл. 3). Объем расчетной

лесосеки приблизительно на уровне среднего по региону исследования. Доля хвойных лесов, отведенных под сплошные рубки, незначительна, что сближает кластер с кластерами № 4 и 6.

В лесах кластера представлены 3 из основных лесообразующих пород: сосна, ель и береза. Леса характеризуются самым высоким средним запасом леса на гектаре в регионе исследования по хвойному компоненту (табл. 4). Почвы относительно сухие, как и в кластерах № 4 и 6. Представлены еловые и сосновые древостои, местами с примесью березы (табл. 5).

Плотность дорог в среднем по кластеру на уровне среднего значения по региону (табл. 6). Преобладают грунтовые дороги.

Лесничество кластера по многим характеристикам схоже с лесничеством кластера № 4, но в то же время имеет ряд особенностей, не позволивших объединить эти кластеры в одну группу. Плотность дорог в кластере № 7 находится на среднем уровне по региону исследования, что в 2 раза меньше, чем в кластере № 4. Запас леса на гектаре также заметно превосходит показатели лесничества кластера № 4. Расчетная лесосека сопоставима в лесничествах сравниваемых кластеров, но в лесничестве кластера № 7 есть леса, отведенные под сплошную рубку. В целом лесничества малых кластеров № 4, 6 и 7 во многом схожи, но отличия по некоторым переменным, выбранным для исследования, не позволили объединить данные кластеры.

Проверка результатов

Достоверность результатов кластерного анализа подтверждена результатами дискриминантного анализа. Предсказания о принадлежности центрального лесничества к классу с использованием дискриминантных функций в 100 % совпадало с данными кластерного анализа. Было получено 5 линейных дискриминантных функций, значение канонической корреляции которых находилось в диапазоне 0,851–0,973. Это говорит о сильной связи между расчетными значениями дискриминантной функции и принадлежности лесничества к группе, определенной по результатам кластерного анализа. Тест на различие между собой средних значений дискриминантных функций в кластерах, проведенный с помощью критерия лямбды Уилкса, показал значимый результат: лямбда Уилкса приближается к 0; $p < 0,001$ (табл. 7).

Таблица 7

Результаты расчета значений критериев достоверности дискриминантных функций

Results of calculating the values of reliability criteria of discriminant functions

Критерий для функций	Лямбда Уилкса	Критерий Пирсона		Число степеней свободы	Значимость
		расчетный	табличный (при уровне значимости 0,01)		
От 1 до 5	0	177,920	22,164	40	<0,001
От 2 до 5	0,002	122,004	13,565	28	<0,001
От 3 до 5	0,012	83,437	7,015	18	<0,001
От 4 до 5	0,067	51,408	2,558	10	<0,001
5	0,276	24,451	0,297	4	<0,001

Расчетные значения критерия Пирсона превышали теоретические на 1%-м уровне (табл. 7), что подтверждало достоверность различий между функциями. Таким образом, каноническая корреляция, критерий лямбды Уилкса, р-значения и критерий Пирсона подтвердили достоверность результатов кластерного анализа.

Исследование основано на применении нескольких статистических методов с целью получения научно обоснованных и статистически достоверных результатов. Авторами статьи не были выявлены работы, базирующиеся на использовании схожей методики для данного региона. Однако применение факторного, кластерного и дискриминантного анализа в решении задач классификации лесных территорий из литературы известно [30, 35]. В целом результаты, представленные в статье, хорошо согласуются с другими исследованиями, целью которых являлся систематический анализ лесной отрасли России [37, 43]. Отметим, что полученные результаты соотносимы с нашими предшествующими исследованиями [39], в которых мы классифицировали по природно-производственным условиям лесные территории на уровне субъектов России.

Вместе с тем необходимо учитывать ограниченность результатов исследования. Во-первых, предложенная классификация основана на 20 переменных, которые не могут в полной мере охарактеризовать центральные лесничества. Второй проблемой является уровень, на котором осуществлена классификация. Очевидно, что средние значения переменных в целом по лесничеству не могут отразить всю вариативность условий в лесах. Более качественный результат дала бы классификация на уровне участковых лесничеств, а наилучший – на уровне лесных кварталов или выделов. Однако здесь остро встает вопрос доступности и систематизированности данных. Учитывая приведенные недостатки, исследование не претендует на исчерпывающий характер, а является попыткой проанализировать состояние некоторых аспектов лесной отрасли и на основе научно обоснованного подхода дать классификацию территорий центральных лесничеств.

Заключение

Статья закладывает основу для более глубокого изучения проблемы эффективного использования лесных ресурсов и развития экономик приграничных арктических районов России. Анализ характеристик 27 центральных лесничеств региона исследования на основе статистических методов показал, что выделяются 4 крупных кластера: № 2, 3, 8, 9, объединяющих от 4 до 9 центральных лесничеств, однородных по комплексу ресурсно-эксплуатационных показателей; и 5 кластеров – № 1, 4–7, – каждый из которых представлен одним центральным лесничеством.

Лесничества кластера № 2 имеют большие расчетную лесосеку, средний запас леса на гектаре, запас лиственных пород и распространенность в лесах ели. Лесничества кластера № 3 характеризуются невысокими лесистостью, расчетной лесосекой, небольшими средним запасом леса на гектаре и запасом лиственных пород. Для лесничеств кластера № 8 отмечены средние по региону исследования расчетная лесосека и запас леса на гектаре. Особенностью лесничеств является то, что значительная доля лесов находится в условиях застойного увлажнения. Лесничества кластера № 9 по запасу леса на гектаре в среднем пре-

восходят лесничества кластера № 8, но уступают лесничествам кластера № 2. Лесничества кластера № 9 по своим характеристикам занимают промежуточное, или переходное, положение между лесничествами кластеров № 2 и 8. Лесничества малых кластеров № 4, 6 и 7 имеют самый высокий запас леса на гектаре и по ряду учитываемых переменных схожи. Однако различия по другим переменным не позволяют объединить их в один крупный кластер. Лесничество кластера № 5 близко по природно-производственным условиям с лесничествами кластера № 3, но его расчетная лесосека по хвойному компоненту небольшая, что не свойственно лесничествам кластера № 3. Лесничество кластера № 1 имеет много общего с лесничествами кластера № 2, но леса в нем несколько продуктивнее, о чем свидетельствует средний запас леса на гектаре по породам.

Результаты исследования могут быть учтены при решении вопросов организации и развития лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса ответственными органами в ходе разработки государственной политики и нормативных документов в сфере лесного хозяйства и учета лесных ресурсов, а также частным бизнесом при стратегическом планировании деятельности по заготовке и переработке древесины. Кроме того, методика исследований может быть применена для анализа лесных территорий других регионов России. Это позволит переносить успешный опыт развития лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса на местности со схожими условиями в масштабах страны, а также даст возможность оценивать перспективность применения тех или иных подходов в управлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Пасько О.А., Захарченко А.В., Ковязин В.Ф. Анализ землеустройства лесного фонда // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 2. С. 127–138.
Pasko O.A., Zakharchenko A.V., Kovyazin V.F. Analysis of Land Management of the Forest Fund. *Bulletin of the Tomsk Polytechnical University*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 127–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3049>
2. Сукачев В.Н. Избр. тр. Т. 1. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. 418 с.
Sukachev V.N. *Selected Works*, vol. 1. Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology. Leningrad, Nauka Publ., 1972. 418 p. (In Russ.).
3. Хлюстов В.К., Ганихин А.М., Короткая С.В. Ресурсно-экологическое районирование лесов Нижегородской области // Природообустройство. 2021. № 3. С. 128–136.
Khlyustov V.K., Ganikhin A.M., Korotkaya S.V. Resource and Ecological Zoning of Forests of the Nizhny Novgorod Region. *Природообустройство*, 2021, no. 3, pp. 128–136. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-3-128-136>
4. Coates A., Ng A.Y. Learning Feature Representations with K-Means. *Neural Networks: Tricks of the Trade*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, vol. 7700, pp. 561–580. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35289-8_30
5. Cochran W.G., Snedecor G.W. *Statistical methods*. Iowa State University Press, 1980. 507 p.
6. DeArmond D., Ferraz João B.S., Higuchi N. Natural Recovery of Skid Trails: a Review. *Canadian Journal of Forest Research*, 2021, vol. 51, no. 7, pp. 948–961. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0419>

7. Eliasson L., Bengtsson J., Cedergren J., Lageson H. Comparison of Single-Grip Harvester Productivity in Clear- and Shelterwood Cutting. *Journal of Forest Engineering*, 1999, no. 10, pp. 43–48.
8. Gendler S., Prokhorova E. Risk-Based Methodology for Determining Priority Directions for Improving Occupational Safety in the Mining Industry of the Arctic Zone. *Resources*, 2021, vol. 10, no. 3, art. 20. <https://doi.org/10.3390/resources10030020>
9. George A.K., Kizha A.R., Kenefic L. Economic Feasibility of Timber Harvesting in Lowlands. Exceeding the Vision: Forest Mechanisation of the Future. *Proceedings of the 52nd International Symposium on Forestry Mechanization*. Sopron, Hungary, University of Sopron Press, 2019, pp. 379–393.
10. Gerasimov Y., Sokolov A.P., Fjeld D. Improving Cut-to-Length Operations Management in Russian Logging Companies Using a New Decision Support System. *Baltic Forestry*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 89–105.
11. Goodsite M., Swanström N. *Towards a Sustainable Arctic*. World Scientific Publishing Europe Ltd., 2023. 280 p. <https://doi.org/10.1142/q0390>
12. Härdle W.K., Simar L. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Berlin, Germany, Springer Cham Publ., 2019. 559 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26006-4>
13. Hartwell C.A. In Our (Frozen) Backyard: the Eurasian Union and Regional Environmental Governance in the Arctic. *Climatic Change*, 2023, vol. 176, art. 45. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03491-7>
14. Hiesl P., Benjamin J.G. Applicability of International Harvesting Equipment Productivity Studies in Maine, USA: A Literature Review. *Forests*, 2013, vol. 4, iss. 4, pp. 898–921. <https://doi.org/10.3390/f4040898>
15. Ilintsev A., Nakvasina E., Högbom L., Bogdanov A. Influence of Ruts on the Physical Properties of Gleyic Retisols After Logging Machinery Passage. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 37, iss. 4, pp. 254–263. <https://doi.org/10.1080/02827581.2022.2085785>
16. Jaeger A., Banks D. Cluster analysis: A modern statistical review. *WIREs Computational Statistics*, 2023, vol. 15, iss. 3, art. 1597. <https://doi.org/10.1002/wics.1597>
17. Kaiser H.F. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 1960, vol. 20, iss. 1, pp. 141–151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
18. Kaiser H.F. The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis. *Psychometrika*, 1958, vol. 23, pp. 187–200. <https://doi.org/10.1007/BF02289233>
19. Kaiser H.F., Rice J. Little Jiffy, Mark IV. *Educational and Psychological Measurement*, 1974, vol. 34, iss. 1, pp. 111–117. <https://doi.org/10.1177/001316447403400115>
20. Kärhä K., Rönkkö E., Gumse S.I. Productivity and Cutting Costs of Thinning Harvesters. *International Journal of Forest Engineering*, 2004, vol. 15, iss. 2, pp. 43–56. <https://doi.org/10.1080/14942119.2004.10702496>
21. Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning Productivity and Cost for Mechanized Cut-to-Length System in the Northwest Pacific Coast Region of the USA. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 5, iss. 2, pp. 43–54.
22. Klaes B., Struck J., Schneider R., Schueler G. Middle-term Effects After Timber Harvesting with Heavy Machinery on a Fine-Textured Forest Soil. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, iss. 6, pp. 1083–1095.
23. Kormanek M., Baj D. Analysis of Operation Performance in the Process of Machine Wood Harvesting with Fao Far 6840 Mini-Harvester. *Agricultural engineering*, 2018, vol. 22, iss. 1, pp. 73–82.
24. Labelle E.R., Soucy M. Effect of Tree Form on the Productivity of a Cut-to-Length Harvester in a Hardwood Dominated Stand. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2016, vol. 37, iss. 1, pp. 175–183.

25. Liubachyna A., Bubbico A., Secco L., Pettenella D. Management Goals and Performance: Clustering State Forest Management Organizations in Europe with Multivariate Statistics. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 12, art. 504. <https://doi.org/10.3390/f8120504>
26. Louis L.T., Kizha A.R., Daigneault A., Han H.S., Weiskittel A. Factors Affecting Operational Cost and Productivity of Ground-Based Timber Harvesting Machines: a Meta-analysis. *Current Forestry Reports*, 2022, vol. 8, pp. 38–54. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00156-5>
27. Meira Castro A.C., Nunes A., Sousa A., Lourenço L. Mapping the Causes of Forest Fires in Portugal by Clustering Analysis. *Geosciences*, 2020, vol. 10, iss. 2, art. 53. <https://doi.org/10.3390/geosciences10020053>
28. Melchiori L., Nasini G., Montagna J.M., Corsano G. A Mathematical Modeling for Simultaneous Routing and Scheduling of Logging Trucks in the Forest Supply Chain. *Forest Policy and Economics*, 2022, vol. 136, art. 102693. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102693>
29. Mokhiev A., Medvedev S. Assessment of Road Density in Logging Areas Using Geographical Information Systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, All-Russian scientific-technical conference "Digital technologies in forest sector"*, 26–27 March 2020, Saint Petersburg, Russian Federation, vol. 507, art. 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012022>
30. Mutttilainen H., Hallikainen V., Miina J., Vornanen J., Vanhanen H. Forest Owners' Perspectives Concerning Non-Timber Forest Products, Everyman's Rights, and Organic Certification of Forests in Eastern Finland. *Small-scale Forestry*, 2023, vol. 22, pp. 69–101. <https://doi.org/10.1007/s11842-022-09528-6>
31. Olivera A., Visser R., Acuna M., Morgenroth J. Automatic GNSS-enabled Harvester Data Collection as a Tool to Evaluate Factors Affecting Harvester Productivity in a Eucalyptus Spp. Harvesting Operation in Uruguay. *International Journal of Forest Engineering*, 2016, vol. 27, iss. 1, pp. 15–28. <https://doi.org/10.1080/14942119.2015.1099775>
32. Parente J., Pereira M.G., Tonini M. Space-Time Clustering Analysis of Wildfires: the Influence of Dataset Characteristics, Fire Prevention Policy Decisions, Weather and Climate. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 559, pp. 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.129>
33. Proto A.R., Macrì G., Visser R., Harrill H., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity. *European Journal of Forest Research*, 2018, vol. 137, pp. 143–151. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6>
34. Salimova G., Ableeva A., Lubova T., Sharafutdinov A., Araslanbaev I. Multidimensional Modeling of the Economy of Forest Management and Reforestation. *Ecological Modelling*, 2022, vol. 472, art. 110098. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110098>
35. Scoti M.S.V., Mascarenhas A.R.P., Rebelo A.C., Fernandes I.M., Vendruscolo J., Rocha J.D.S., Moreto R.F. Current Practices of Conducting Forest Management Plans in the Amazon May Risk the Survival of Timber Species. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, pp. 82589–82600. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28311-4>
36. Schreiber J.B. Issues and Recommendations for Exploratory Factor Analysis and Principal Component Analysis. *Research in Social and Administrative Pharmacy*, 2021, vol. 17, iss. 5, pp. 1004–1011. <https://doi.org/10.1016/j.sapharm.2020.07.027>
37. Senko S. Nordic Forest Solutions as an Opportunity to Reform the Forestry Sector in Russia: A Case Study in the Republic of Karelia. *Dissertationes Forestales*, 2021, vol. 320, 61 p. <https://doi.org/10.14214/df.320>
38. Shabaev A., Sokolov A., Urban A., Pyatin D. Optimal Planning of Wood Harvesting and Timber Supply in Russian Conditions. *Forests*, 2020, vol. 11, iss. 6, art. 662. <https://doi.org/10.3390/f11060662>

39. Shegelman I., Budnik P., Baklagin V., Galaktionov O., Khyunninen I., Popov A. Analysis of Natural-Production Conditions for Timber Harvesting in European North of Russia. *Central European Forestry Journal*, 2019, vol. 65, iss. 2, pp. 81–91.

40. Spinelli K., Magagnotti N. The Effect of Harvest Tree Distribution on Harvesting Productivity in Selection Cuts. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 28, iss. 7, pp. 701–709. <https://doi.org/10.1080/02827581.2013.821517>

41. Tutmez B., Ozdogan M.G., Boran A. Mapping Forest Fires by Nonparametric Clustering Analysis. *Journal of Forestry Research*, 2018, vol. 29, pp. 177–185. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0417-4>

42. Varol T., Emir T., Akgul M., Ozel H.B., Acar H.H., Cetin M. Impacts of Small-Scale Mechanized Logging Equipment on Soil Compaction in Forests. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, vol. 20, pp. 953–963. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00182-5>

43. Zykov S.V., Dayneko D.V. The Analysis of the Russian Forest Industry. *Forest Industry of Russia*. Singapore, Springer Publ., 2022, pp. 17–103. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9861-3_2

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article