



УДК 630\*3

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-120-137

## ТИПИЗАЦИЯ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО ПРИРОДНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ УСЛОВИЯМ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

**И.Р. Шегельман**, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: P-9793-2019*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5133-4586>*

**П.В. Будник**, *канд. техн. наук, начальник отдела защиты интеллектуальной собственности и изобретательства*; *ResearcherID: E-1782-2015*,

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

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: budnikpavel@yandex.ru

**Аннотация.** Степень адаптации лесозаготовительной техники к природно-производственным условиям (ППУ) характеризует ее эффективность и уровень негативного воздействия на окружающую среду. Для выбора техники необходимо выделение групп территорий с близкими ППУ. Цель исследования – формирование методологического инструментария для лесопромышленной типизации лесных территорий по ППУ. Решение задачи предложено осуществлять на основе кластерного анализа. Для этого разработана методология, включающая: постановку цели типизации территорий по ППУ; сбор данных о ППУ; проведение кластерного анализа; принятие решения по типизации территорий. Задача кластерного анализа заключается в разбиении (на основании некоторой совокупности данных) множества лесных территорий на группы со схожими ППУ. В качестве меры, указывающей на принадлежность к одной из групп, предложено использовать евклидово расстояние, а совокупность данных определять индикаторами, характеризующими ППУ. Предлагаемая методика апробирована на примере Европейского Севера России. Результаты исследования показали, что на этой территории могут быть выделены следующие зоны: А (Мурманская область); В (Республика Карелия, Республика Коми и Архангельская область); С (Вологодская область). Дополнительно в зоне В выделяются две подзоны: Западно-Карельская возвышенность и территории, относящиеся к Северному, Приполярному и Полярному Уралу. Предложенная методика позволяет повысить степень формализации и удобство процесса типизации лесных территорий по ППУ, учитывать широкий спектр различных аспектов ППУ, их вероятностный характер, а также гибко осуществлять типизацию территорий под конкретные цели. Результаты исследований могут быть применены при решении задач поиска эффективных технологий и рациональных параметров систем лесосечных машин.

**Для цитирования:** Шегельман И.Р., Будник П.В. Типизация лесных территорий по природно-производственным условиям на основе кластерного анализа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 120–137. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-120-137

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых по проекту «Разработка среды конструкторского проектирования оптимальных параметров технологического оборудования лесных многооперационных машин» (МК-5321.2018.8).

*Ключевые слова:* типизация лесных территорий, природно-производственные условия, лесосечные работы, кластерный анализ.

### *Введение*

Эффективность лесозаготовительных машин, их надежность, уровень негативного воздействия на окружающую среду в значительной мере определяются степенью адаптации техники к природно-производственным условиям (ППУ) [20, 24, 31]. Разработка методологии выделения ограниченного числа территорий со схожими ППУ из существующего множества позволит получить инструментарий для более эффективного управления лесопромышленными процессами и ресурсами, а также сформировать основу для сужения диапазона выбора из множества параметров лесозаготовительных машин при их проектировании.

В лесной науке известны фундаментальные исследования, связанные с лесоводственной типологией, например Г.Ф. Морозова, акад. В.Н. Сукачева, П.С. Погребняка, А.К. Каяндера и др. [10, 14]. Применение результатов этих исследований для типизации ППУ при выборе рациональных параметров лесозаготовительных машин для определенных условий, по нашему мнению, крайне затруднительно. Это обусловлено тем, что известная типология базируется на выделении большого количества таксономических классов по различным признакам, влияние которых на работу лесозаготовительных машин окончательно не установлено.

Исследования, связанные с типизацией ППУ в масштабах СССР, проводились ЦНИИМЭ в конце прошлого века [13]. Типизация основывалась на экономико-географическом районировании. Основными типобразующими факторами являлись крупномерность деревьев и рельеф, характеризующиеся либо средними, либо средневзвешенными значениями. Ограниченно, в частных случаях, применялись дополнительные факторы: категория грунтов, запас леса на 1 га, состав насаждения. Несмотря на колоссальный объем проделанной работы в современных условиях типизация ЦНИИМЭ имеет ряд значительных недостатков.

Многие современные исследования свидетельствуют, что для выделения территорий со схожими ППУ недостаточно учитывать только средние размеры деревьев и рельеф [30, 35, 36]. Необходимо рассматривать на постоянной основе и ряд других факторов: почвенно-грунтовые условия, запас древесины на единицу площади, породный состав древостоев, расположение эксплуатационного фонда и доступность его освоения, а также их вероятностный характер.

Увеличение числа типобразующих факторов, учет их вероятностного характера приводят к проблеме принятия решений при отнесении конкретной территории к тому или иному таксиметрическому классу. Решение этой проблемы может основываться на разработке инструмента, позволяющего формализовать процесс типизации. В работах [7, 11] предложен один из примеров такого подхода. Процедура типизации сводится к задаче распознавания образов, состоящей в том, чтобы отнести новый распознаваемый объект (в приложении к рассматриваемой задаче – лесную территорию) к какому-либо классу [1]. Информация о лесных территориях представляется в виде совокупности точек в заданной системе координат. Каждая территория представляет собой единич-

ный точечный элемент. Множество территорий в системе координат имеют неоднородную плотность. Задача типизации сводится к поиску и обособлению сгустков, а затем к выделению параметров этих сгустков и степени их плотности. Несмотря на привлекательность данного подхода, для его реализации, как отмечают сами авторы, требуется разработка алгоритма классификации территорий, включающего комбинаторный анализ с эвристическими допущениями. Это существенно ограничивает его практическую ценность. Задача выделения территорий со схожими ППУ является актуальной и к настоящему моменту не решенной окончательно. Цель исследования – формирование методологического инструментария для лесопромышленной типизации лесных территорий (участков) по ППУ.

#### *Объекты и методы исследования*

Решение задачи выделения территорий со схожими ППУ, по нашему мнению, может быть осуществлено на основе кластерного анализа, нашедшего широкое применение в экономике [5, 8, 16], социологии [12, 19], медицине [17], сельском хозяйстве [2, 6], управлении [15] и в других областях науки и сферах деятельности человека. Задача кластерного анализа заключается в разбиении множества объектов  $T_i \in T$  на основании некоторой совокупности данных  $I$  на  $M$  ( $M$  – целое число) подмножеств (кластеров,  $M_1, M_2, \dots, M_j$ ) так, чтобы каждый объект  $T_i$  принадлежал только одному подмножеству, причем объекты в одном подмножестве должны быть однородными, а принадлежащие разным подмножествам – разнородными. Такое разбиение осуществляется на основе переменной, являющейся качественным фактором, указывающим на принадлежность к одному из подмножеств  $M_1, \dots, M_j$ .

Применительно к задаче выделения территорий со схожими ППУ множество  $I$  определяется следующим образом:

$$I = \{T_1, T_2, \dots, T_i\},$$

где  $T_i$  – исследуемый объект.

В качестве исследуемого объекта выступает территория, характеризующаяся определенными ППУ, в качестве рассматриваемой территории – делянка, лесосека, некоторая совокупность лесосек, лесничество, регион и др. Масштаб территории может быть различным и определяться целями типизации, а также доступными источниками информации о ППУ.

Каждый из множества объектов  $T_i \in T$  характеризуется набором параметров:

$$T_i = \{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}\}.$$

В качестве параметров  $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}$  принимаются индикаторы, характеризующие определенные аспекты ППУ лесосечных работ. Исходные данные для всех  $T_i \in T$  могут быть заданы матрицей:

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{nm} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где каждый столбец соответствует значениям определенного индикатора для рассматриваемых объектов  $T_i \in T$ , а каждая строка – значениям всех рассматриваемых индикаторов для конкретного объекта  $T_i \in T$ .

Каждую строку в матрице (1) можно представить как координаты некоторой точки в  $m$ -мерном пространстве. Например,  $i$ -я строка матрицы (1) соответствует точке с координатами  $T_i(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$ , а  $k$ -я строка матрицы – точке с координатами  $T_k(y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{km})$ . В этом случае в качестве переменной, являющейся качественным фактором, указывающим на принадлежность к одному из подмножеств  $M_1, M_2 \dots M_j$ , может выступать евклидово расстояние между данными точками:

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{z=1}^m (y_{iz} - y_{kz})^2}. \quad (2)$$

Отметим, что мерой сходства могут быть и другие метрики [4]: квадрат евклидова расстояния; обобщенное степенное расстояние Минковского; расстояние Чебышева; Манхэттенское расстояние.

Если индикаторы, характеризующие ППУ, измеряются в различных единицах, то для использования выражения (2) потребуется стандартизация, т. е. приведение всех значений индикаторов к единому диапазону. Для этого применяется следующее выражение:

$$\tilde{y}_{iz} = \frac{y_{iz} - E[y_z]}{\sqrt{V[y_z]}}, \quad (3)$$

где

$$E[y_z] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{iz};$$

$$V[y_z] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{iz} - E[y_z])^2.$$

Отметим, что существуют и другие способы стандартизации [4].

Для матрицы  $Y$  с использованием выражений (2) и (3) формируется матрица расстояний:

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & \dots & d_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nm} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Матрица (4) содержит значения переменной  $d_{ik}$  ( $i$ : от 1 до  $n$ ;  $k$ : от 1 до  $m$ ) между соответствующими точками, характеризующими рассматриваемые объекты  $T_i$  в  $m$ -мерном пространстве. На основе матрицы (4) осуществляется процесс последовательного объединения объектов в кластеры. Первоначально все объекты считаются различными кластерами. Затем на первом этапе наиболее близкие друг к другу объекты объединяются в кластер, на последующих этапах объединение продолжается, при этом могут использоваться различные алгоритмы [4]: метод ближайшего соседа, метод дальнего соседа, метод средней связи, метод взвешенной средней связи и др.

Разные алгоритмы могут приводить к отличающимся результатам. Однозначно рекомендовать тот или иной алгоритм не представляется возможным, так как адекватность разбиения на кластеры зависит от большого количества факторов, в частности от степени сходства или различия рассматриваемых объектов. Поэтому на практике для принятия решения целесообразно применять несколько алгоритмов. Мы рекомендуем использовать метод средней связи или метод взвешенной средней связи при большом количестве рассматриваемых территорий и небольшом количестве выделяемых кластеров. Метод средней связи заключается в присоединении к кластеру объекта с наименьшим средним расстоянием между объектами кластера и рассматриваемым объектом. Метод взвешенной средней связи аналогичен предыдущему, но отличается тем, что при вычислении средних расстояний применяются весовые коэффициенты. Когда требуется выделить кластеры из небольшого числа территорий, удобно использовать метод ближайшего соседа, заключающийся в присоединении к кластеру объекта с максимальной мерой сходства с одним из объектов кластера.

Результаты кластерного анализа представляются в виде дендрограммы. На дендограмме схематично изображаются последовательность объединения объектов в кластеры и значения расстояний между кластерами в соответствии с выбранным алгоритмом. На основе анализа дендограмм осуществляется принятие решения по выделению групп территорий со схожими ППУ. Каждый из алгоритмов и метрик мер сходства имеет свои достоинства и недостатки, которые необходимо учитывать при анализе дендограмм и принятии решения по выделению кластеров.

Одним из важных вопросов при приложении кластерного анализа к рассматриваемой проблеме является задача выбора индикаторов, характеризующих ППУ. Это может быть выполнено на основе анализа исследований влияния ППУ на эффективность работы лесозаготовительных машин. Здесь под эффективностью понимаем как экономическую эффективность, так и экологическую безопасность.

Известно, что на производительность лесозаготовительных машин влияют средний запас древесины на 1 га и размер деревьев [25, 26, 29, 32, 33]. Например, производительность харвестера возрастает с увеличением размера деревьев [21, 29]. Отметим, что такое увеличение не бесконечно. Для некоторых моделей машин существуют определенные размеры деревьев, повышение которых приводит не к увеличению эффективности, а наоборот к ее потере [26, 31]. Многие исследования свидетельствуют о росте расхода дизельного топлива с увеличением размеров обрабатываемых деревьев и в зависимости от изменения их породы [20, 27]. Крупные размеры стволов деревьев могут становиться серьезным ограничением на лесозаготовках с применением машин [23].

Широко изучено влияние запаса леса на 1 га и размеров деревьев на работу форвардеров [42]. Исследования показывают, что с увеличением этих параметров производительность машин возрастает.

Почвенно-грунтовые условия часто являются определяющими в решении вопросов производительности лесозаготовительной техники [36, 37]. Скорость трелевочной машины зависит от качества поверхности волока. На грунтах с низкой несущей способностью при трелевке или транспортировке древесины быстро образуется колея, увеличивающая сопротивление движению, что

приводит к снижению производительности, повышению расхода топлива и нагрузок на трансмиссию.

Многочисленные исследования свидетельствуют о негативном воздействии лесозаготовительных машин на почву в процессе лесозаготовок [28, 38]. Оно выражается в образовании колеи и уплотнении почвы, препятствующих дальнейшему лесовосстановлению. Особенно этому воздействию подвержены переувлажненные почвы.

Фактор рельефа местности существенно влияет на производительность лесозаготовительных машин и накладывает ограничения на их применение [39, 41]. Например, в Финляндии и на севере России редко используются харвестеры на базе экскаваторов, несмотря на их определенные преимущества перед харвестерами на специализированном шасси [22, 34]. Это обусловлено трудностями их эксплуатации на пересеченной местности.

Породы деревьев обуславливают специфические особенности строения и развития, существенно влияющие на эффективность работы лесозаготовительной техники. Поэтому при анализе ППУ необходимо учитывать породный состав древостоев. Кроме того, этот показатель определяет коммерческую ценность древостоя, зависящую от большого числа факторов: строения лесонасаждения, возраста, условий местопроизрастания и др. Наиболее ценны древостои с преобладанием хвойных пород, наименее – леса с доминированием мягколиственных пород. Коммерческая ценность древостоя позволяет лесному предпринимателю за счет формируемой прибыли использовать более прогрессивную технику, обладающую наибольшей эффективностью в отношении производительности и экологической безопасности.

Особенности строения породы влияют в большей степени на эффективность работы лесозаготовительных машин, осуществляющих операции валки, обрезки сучьев, раскряжевки на сортименты, однако данное влияние изучено не так широко, как другие ранее упомянутые факторы ППУ [35]. В целом многими специалистами признано, что работа этой техники в хвойных древостоях более производительна и менее проблематична, чем в лиственных.

ППУ характеризуются расположением эксплуатационного фонда и доступностью его освоения. Размеры лесосек, плотность дорог часто ограничивают в выборе систем лесозаготовительных машин, делая одни системы более удобными на практике [40].

Таким образом, в качестве индикаторов, характеризующих ППУ, должны выбираться параметры, относящиеся к породному составу древостоев, размерам деревьев в них, рельефу и размерам лесосек, почвенно-грунтовым условиям, запасу древесины на единице площади, расположению эксплуатационного фонда и доступности его освоения. Многие из указанных параметров имеют вероятностный характер [3], а следовательно, требуют учета при типизации ППУ, что может осуществляться на основе построения вариационных рядов изменения параметра. Однако для этого потребуется наличие массового фактического материала. Если невозможно получить необходимый объем информации, то вместо вариационных рядов могут использоваться такие характеристики, как среднее, минимальное и максимальное значения, размах.

В табл. 1 приведен перечень индикаторов, характеризующих ППУ, который может использоваться при проведении кластерного анализа для типизации лесных территорий по схожим ППУ. Данный список демонстрирует принцип формирования индикаторов и не является исчерпывающим.

Таблица 1

## Перечень индикаторов, характеризующих ППУ

№	Наименование индикатора	№	Наименование индикатора
1	Средний диаметр древостоя	28	Доля ели в древостое
2	Наиболее вероятная ступень толщины	29	Доля березы в древостое
3	Максимальная ступень толщины	30	Доля осины в древостое
4	Минимальная ступень толщины	31	Доля других пород в древостое
5	Средний объем хлыста	32	Плотность дорог
6	Максимальный объем хлыста	33	Средняя площадь лесосеки
7	Минимальный объем хлыста	34	Максимальная площадь лесосеки
8	Средняя высота дерева	35	Минимальная площадь лесосеки
9	Наиболее вероятный класс высоты	36	Средний разряд высот
10	Минимальный класс высоты	37	Наиболее вероятный разряд высот
11	Максимальный класс высоты	38	Максимальный разряд высот
12	Средний класс бонитета	39	Минимальный разряд высот
13	Доля лесов I класса бонитета	40	Доля лишайниковых типов лесов
14	Доля лесов II класса бонитета	41	Доля брусничниковых типов лесов
15	Доля лесов III класса бонитета	42	Доля черничниковых типов лесов
16	Доля лесов IV класса бонитета	43	Доля молодняков лесов
17	Доля уклонов до 15°	44	Доля средневозрастных лесов
18	Доля уклонов от 16 до 25°	45	Доля приспевающих лесов
19	Доля уклонов более 26°	46	Доля спелых лесов
20	Доля первой категории грунтов	47	Доля перестойных лесов
21	Доля второй категории грунтов	48	Средняя полнота древостоев
22	Доля третьей категории грунтов	49	Доля редин
23	Доля четвертой категории грунтов	50	Доля древостоев с низкой полнотой
24	Средний запас на 1 га	51	Доля древостоев со средней полнотой
25	Минимальный запас на 1 га	52	Доля древостоев с высокой полнотой
26	Максимальный запас на 1 га	53	Средняя длительность простоя по причине сильных морозов и снегопадов
27	Доля сосны в древостое	54	Средняя длительность простоя по причине распутицы

При наличии фактического материала дополнительно или вместо индикаторов 2–11, 17–19, 25, 26, 34, 35, 37–39, 49–52 могут использоваться индикаторы, характеризующие интервалы вариационных рядов соответствующих характеристик. Индикаторы 13–16, 27–31 и 40–42 могут дополняться индикаторами, отражающими наличие лесов других классов бонитетов, деревьев других пород и типов лесов.

Рекомендуется проводить кластерный анализ не только по всем доступным индикаторам, но также на основе сформированных из них наборов. Это позволит проанализировать схожесть объектов (территорий) по отдельным

аспектам ППУ и принять рациональное решение при объединении территорий в кластеры. В табл. 2 приведены примеры вариантов формирования наборов индикаторов, содержащихся в табл. 1.

Таблица 2

### Перечень наборов индикаторов для кластеризации

Включаемые индикаторы	Примечание
Все индикаторы	По всем доступным индикаторам
5, 12, 24, дополнительно можно включить 12, 27–31 и 36, 48	По средним таксационным характеристикам древостоев
1, 5, 8	По средним размерам деревьев
3, 6, 11	По максимальным размерам деревьев
9–15	По почвенно-грунтовым условиям и рельефу
27–31	По породному составу

Первичными источниками информации для определения индикаторов ППУ являются материалы отвода лесосек или их материально-денежной оценки, сведения средств объективного контроля лесозаготовительных машин, карты и планы лесосырьевых баз предприятий, вторичными – лесные планы субъектов Российской Федерации, открытые данные Федерального агентства лесного хозяйства РФ, результаты исследований в области лесного хозяйства и ППУ, а также ряд карт РФ и ее регионов (физических, топографических, климатических, ландшафтных, почвенных карт, карт растительности и т. п.). На практике первичные источники информации не всегда доступны, полны и систематизированы. Поэтому требуется дополнение их вторичными источниками, которые, как правило, имеют большую систематизацию, но меньшую достоверность. Использование вторичных источников информации позволяет охватить общую структуру ППУ, что является важным при решении задачи типизации лесных территорий.

На основании вышеизложенного типизация территорий по ППУ при помощи кластерного анализа должна включать следующие этапы: постановку цели типизации территорий по ППУ; сбор данных о ППУ; проведение кластерного анализа; принятие решения по типизации лесных территорий по ППУ (рис. 1).

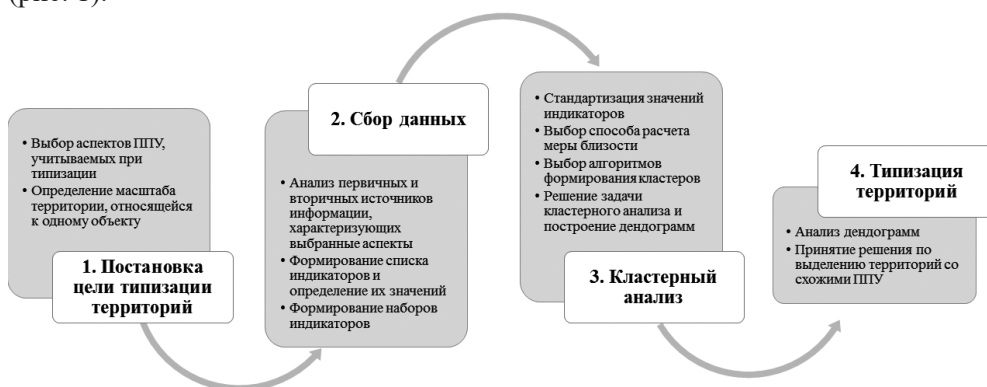


Рис. 1. Этапы типизации территорий по ППУ на основе кластерного анализа

Fig. 1. Stages of typification of areas by natural-production conditions based on cluster analysis



*Результаты исследования и их обсуждение*

Для апробации предлагаемой методики выбрана территория Европейского Севера России (ЕСР). На этой территории сосредоточено более 40 % лесных ресурсов европейской части РФ, а лесная и деревообрабатывающая промышленность является одной из главных в структуре экономики. Поэтому типизация лесных территорий по ППУ актуальна. В качестве объектов  $T_i$  для кластерного анализа приняты территории Мурманской (М), Архангельской (А), Вологодской (В) областей, Республик Карелия (РК) и Коми (К). Перечень индикаторов и их значения, учитываемые при типизации ППУ, приведены в работе [18]. Источники данных указаны в табл. 3, на основании которой была сформирована матрица  $Y$ ; индикаторы сгруппированы в наборы согласно табл. 4.

Таблица 3

**Источники значений индикаторов ППУ**

№	Индикатор	Источник
1	Степень толщины, см: средняя	Исследования ЦНИИМЭ [3, 13]
2	наиболее встречающаяся	
3	максимальная	
4	Объем хлыста, м <sup>3</sup> : средний	Лесные планы регионов РФ, геопортал Республики Коми (gis.rkomi.ru)
5	максимальный	
6	минимальный	
7	Средняя высота древостоя, м	–
8	Средний класс бонитета	Открытые данные Федерального агентства лесного хозяйства РФ
9	Уклон поверхности, %: до 15°	Данные, приведенные в работе Р.А. Люманова [9] и уточненные в соответствии с информацией из лесных планов, физических, ландшафтных и почвенных карт
10	16...25°	
11	более 26°	
12	Грунты, %: первой категории	
13	второй категории	
14	третьей категории	
15	четвертой категории	
16	Запас на 1 га, м <sup>3</sup> : средний	Лесные планы регионов РФ
17	минимальный	
18	максимальный	

Окончание табл. 3

№	Индикатор	Источник
19	Доля в древостоях, %: сосны	Схематические карты распределения лесов по доминирующим видам, лесные планы субъектов РФ
20	ели	
21	березы	
22	осины	
23	других пород	
24	Плотность автомобильных дорог, км/га	Карты распределения арендованных лесных участков, карты дорожных сетей, лесные планы субъектов РФ

Таблица 4

## Порядок группировки индикаторов в наборы

Набор	Перечень включенных индикаторов
NPS	Все индикаторы
ATD	4, 8, 16, 19–23
TMed	1, 4, 7
TMax	3, 5, 7
CLC	9–15
SC	19–23

В качестве метрики схожести объектов  $T_i$  использовалось евклидово расстояние, рассчитываемое согласно выражению (2), в качестве алгоритма формирования кластеров – метод ближайшего соседа. На рис. 2 приведены результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору NPS. По всем выбранным индикаторам, характеризующим ППУ, Республика Карелия и Архангельская область наиболее близки среди рассматриваемых регионов (евклидово расстояние – 3,63). Наиболее различными являются Мурманская и Вологодская области (евклидово расстояние – 9,91).

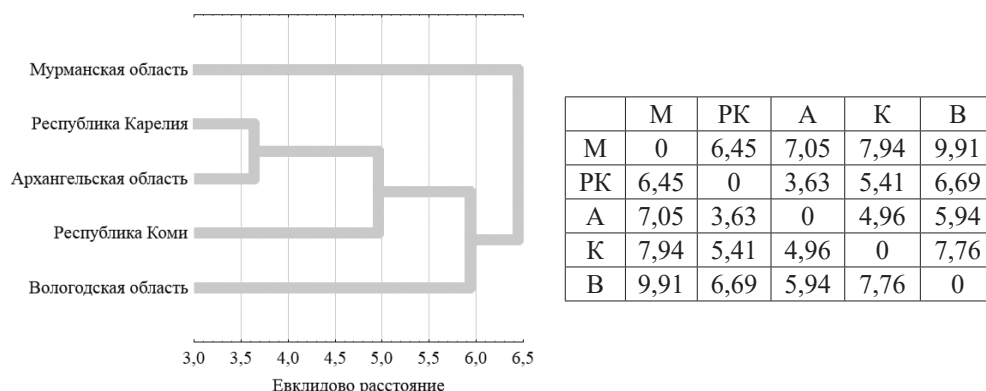


Рис. 2. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору NPS (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний ( $D$ ))

Fig. 2. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of NPS (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix ( $D$ ))

На рис. 3 представлены результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору АТД, характеризующему средние таксационные характеристики древостоев. Анализ показал, что средние таксационные показатели древостоев Мурманской области более близки к показателям Республики Карелия (евклидово расстояние – 1,98). Средние таксационные показатели древостоев Архангельской области близки к показателям Республики Коми (евклидово расстояние – 2,08). От всех регионов ЕСР наиболее отличаются средние таксационные показатели Вологодской области.

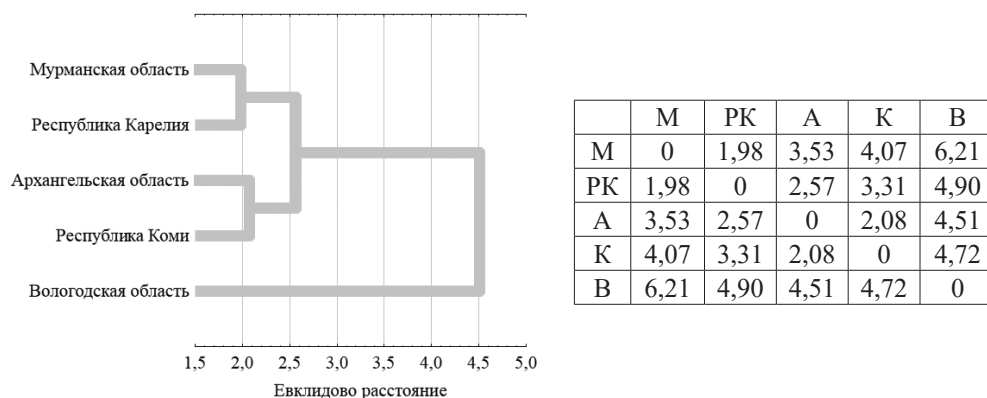


Рис. 3. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору АТД (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний ( $D$ ))

Fig. 3. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of АТД (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix ( $D$ ))

На рис. 4 приведены результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору ТМед, на рис. 5 – по набору ТМак. Наборы характеризуют соответственно средние и максимальные (близкие к максимальным) по размеру дерева. Анализ показал, что размеры деревьев Архангельской области, Республик Карелия и Коми близки. Для наборов ТМед евклидово расстояние находится в диапазоне 0,60–1,07 и для наборов ТМак – в диапазоне 0,63–1,79. Наиболее различаются по рассматриваемым индикаторам древостои Вологодской и Мурманской областей (евклидово расстояние – 3,91).

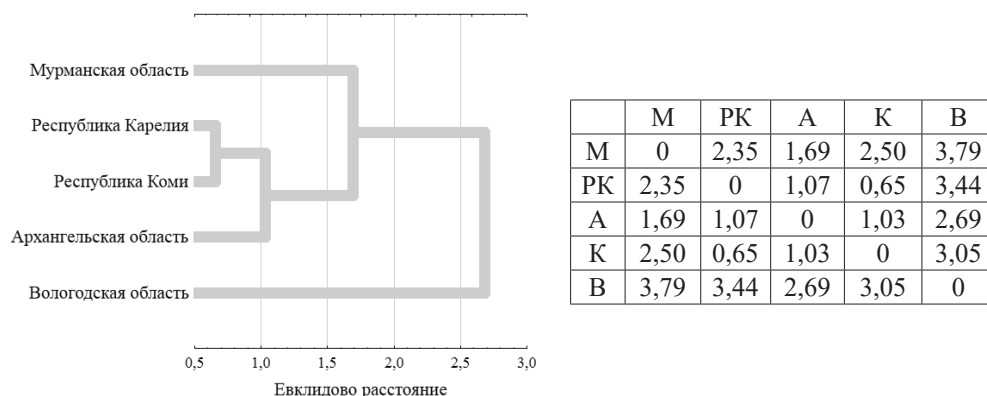


Рис. 4. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору ТМед (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний ( $D$ ))

Fig. 4. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of ТМед (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix ( $D$ ))

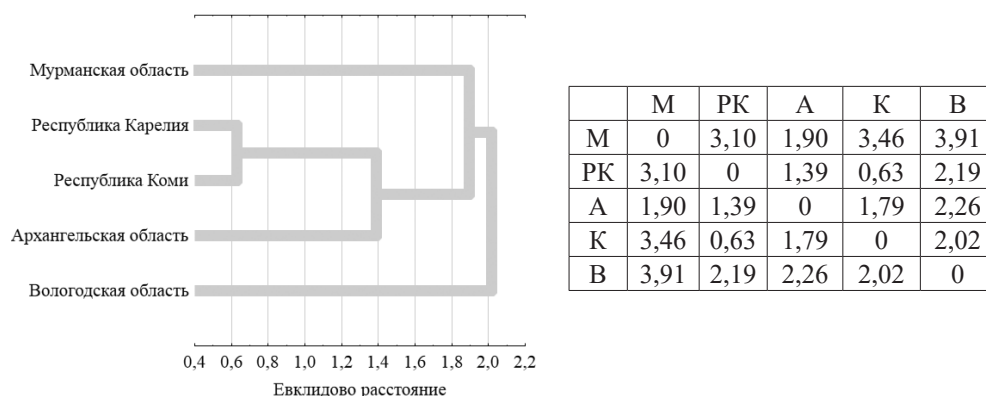


Рис. 5. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору TMax (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний ( $D$ ))

Fig. 5. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of TMax (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix ( $D$ ))

На рис. 6 представлены результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору CLC, характеризующему почвенно-грунтовые условия и условия рельефа. Среди рассматриваемых регионов наиболее близкими по этим показателям являются Вологодская и Архангельская области (евклидово расстояние – 0,67). Почвенно-грунтовые условия Мурманской области и Республики Коми значительно отличаются от других регионов ЕСР.

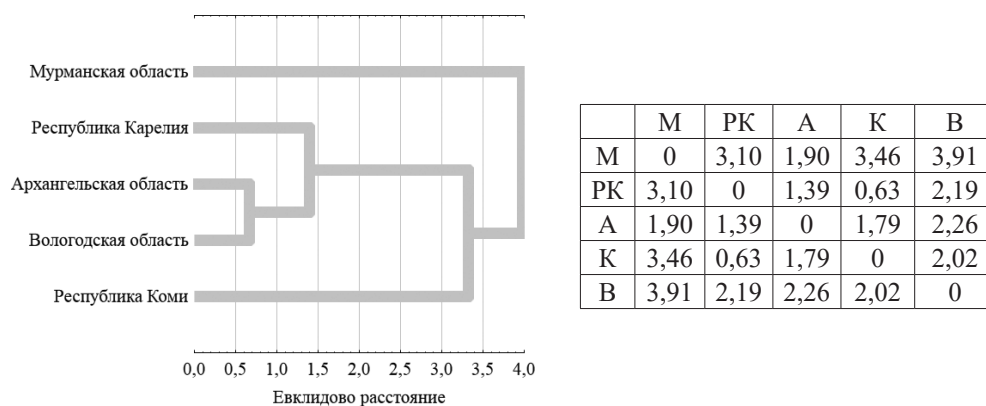


Рис. 6. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору CLC (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний ( $D$ ))

Fig. 6. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of CLC (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix ( $D$ ))

На рис. 7 приведены результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору SC, характеризующему породный состав древостоя. Результаты анализа свидетельствуют, что по породному составу древостоя Мурманской области близки к древостоям Республики Карелия (евклидово расстояние – 0,41), а породный состав древостоев Архангельской области наиболее близок к древостоям республики Коми (евклидово расстояние – 2,01). Наиболее по породному составу древостоев от других регионов ЕСР отличается Вологодская область (евклидово расстояние превышает значение 3,60).

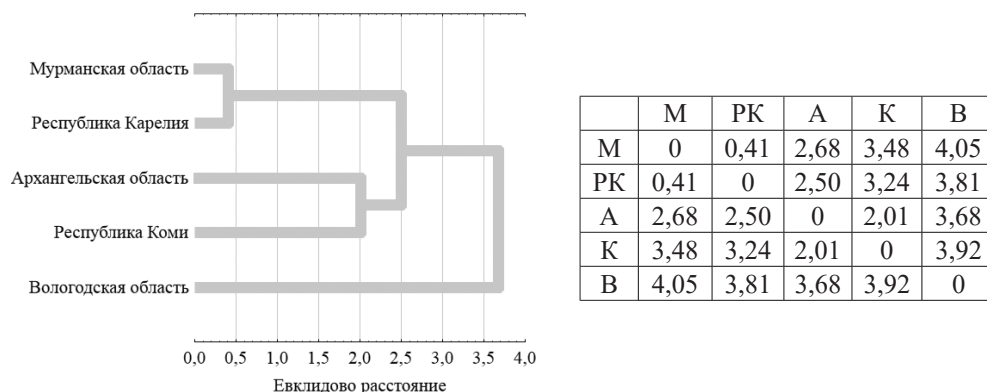


Рис. 7. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору SC (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний ( $D$ ))

Fig. 7. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of SC (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix ( $D$ ))

На основании анализа полученных дендограмм и матриц расстояний можно выделить три зоны ППУ для ЕСР: зона А, включающая Мурманскую область; зона В, включающая Республику Карелия, Республику Коми и Архангельскую область; зона С, включающая Вологодскую область. Следует отметить, что индикаторы 9–15 характеризуют средние почвенно-грунтовые условия и условия рельефа по областям. Анализ физических, ландшафтных и почвенных карт выявил наличие территорий с нетипичными условиями, которые не отражаются индикаторами. Такие территории отмечены в Республике Карелия (Западно-Карельская возвышенность) и Республике Коми (Северный, Приполярный и Полярный Урал). Поэтому в зоне В целесообразно выделить дополнительные подзоны – В1 и В2. Общая схема типизации территорий ЕСР по ППУ приведена в работе [18].

Предложенная методика позволяет повысить степень формализации и удобство процесса типизации территорий по ППУ. Качество типизации сильно зависит от выбранных индикаторов, характеризующих ППУ, их достоверности и сформированных из них наборов. Очевидно, что чем больше размеры территории, принятые в качестве объекта  $T_i$ , тем сложнее обеспечить достоверность индикаторов, так как их значения могут не в полной мере отражать всю вариативность ППУ. При типизации требуется понимание того, какие аспекты ППУ учитываются индикаторами, а какие остаются за рамками анализа. Без этого невозможно обоснованно интерпретировать результаты кластерного анализа и делать необходимые корректировки в рекомендациях по типизации рассматриваемых территорий. В конечном итоге методика является инструментом, требующим принятия окончательного решения специалистом. Очевидно, что, несмотря на формализованный характер объединения лесных территорий в группы, качество типизации зависит от профессионализма специалиста.

### Заключение

Типизация лесных территорий по ППУ лесозаготовительных работ может быть осуществлена на основе кластерного анализа. В зависимости от целей

типизации задачу кластерного анализа ППУ целесообразно определять в виде списка индикаторов, характеризующих их отдельные параметры. При типизации лесных территорий необходимо учитывать вероятностный характер ППУ, что может быть осуществлено на основе применения индикаторов, характеризующих вариационные ряды соответствующих параметров ППУ. Для определения значений индикаторов предлагается использовать как первичные, так и вторичные источники информации. Для повышения качества типизации лесных территорий задачу кластерного анализа следует решать не только при помощи всего перечня выбранных индикаторов, но и на основе сформированных из них наборов, характеризующих отдельные аспекты ППУ, а также применять различные алгоритмы формирования кластеров.

Предлагаемая методика позволяет учитывать широкий спектр различных аспектов ППУ, их вероятностный характер, а также гибко выполнять типизацию территорий под конкретные цели. На основе выделяемых таким образом территорий может быть осуществлен поиск эффективных технологий и рациональных параметров систем лесосечных машин для конкретных территориальных зон. Предложенные методологические принципы могут быть перенесены на другие сферы лесопромышленного комплекса и применены, например, для типизации условий деревообрабатывающих производств, транспорта леса, а также для классификации машин и оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов: статистические проблемы обучения. М.: Наука, 1974. 416 с. [Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ya. *Theory of Pattern Recognition: Theoretical Problems of Learning*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 416 p.].
2. Васильев А.А., Фрумин И.Л. Оценка эффективности применения Мивал-агро на картофеле с использованием кластерного анализа // Перм. аграр. вестн. 2016. № 2(14). С. 16–22. [Vasiliev A.A., Frumin I.L. Evaluation of Agro Mival for Potatoes Using Cluster Analysis. *Permskii Agrarnyi Vestnik* [Perm Agrarian Journal], 2016, no. 2(14), pp. 16–22].
3. Виногоров Г.К. К методике обоснования расчетных деревьев при решении лесоэксплуатационных задач // Тр. ЦНИИМЭ. 1972. № 122. С. 52–64. [Vinogorov G.K. To the Methodology of Justification of Settlement Trees When Solving Forest Exploitation Problems. *Trudy TsNIME*, 1972, no. 122, pp. 52–64].
4. Гитис Л.Х. Статистическая классификация и кластерный анализ: моногр. М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2003. 157 с. [Gitis L.Kh. *Statistical Classification and Cluster Analysis*: Monograph, Moscow, MSMI Publ., 2003. 157 p.].
5. Зинчук Г.М., Яшкин А.В. Кластерный анализ аграрных территорий Центрального федерального округа // Вестн. ТвГУ. Сер.: Экономика и управление. 2016. № 4. С. 143–149. [Zinchuk G.M., Yashkin A.V. Cluster Analysis of Agrarian Territories in the Central Federal District. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravleniye* [Bulletin Tver State University. Series: Economics and Management], 2016, no. 4, pp. 143–149].
6. Игошин А.Н., Черемухин А.Д. Кластерный анализ зернового сектора региона // Вестн. НГИЭИ. 2015. № 7(50). С. 21–29. [Igoshin A.N., Cheryomukhin A.D. Cluster Analysis of the Grain Sector in the Region. *Vestnik NGIEI* [Vestnik NGIEI], 2015, no. 7(50), pp. 21–29].
7. Казаков Н.В., Рябухин П.Б., Садетдинов М.А. Метод типизации лесного фонда // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 10. С. 157–161. [Kazakov N.V., Ryabukhin P.B., Sadetdinov M.A.

The Method of the Forest Stock Typification. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2013, no. 10, pp. 157–161].

8. Лантева Е.В. Статистический анализ и прогнозирование уровня доходов населения в Российской Федерации // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 12. С. 64–69. [Lapteva E.V. Statistical Analysis and Forecasting of Population Incomes in Russian Federation. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovation. Investments], 2016, no. 12, pp. 64–69].

9. Люманов Р.А. Машинная валка леса. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 280 с. [Lyumanov R. *Machine Forest Felling*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 280 p.].

10. Обыдёнников В.И., Кожухов Н.И., Коротков С.А. Актуальные проблемы отечественной лесной типологии // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 2. С. 5–11. [Obydyonnikov V.I., Kozhukhov N.I., Korotkov S.A. Domestic Forest Typology Current Issues. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2019, vol. 23, no. 2, pp. 5–11]. DOI: [10.18698/2542-1468-2019-2-5-11](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-2-5-11)

11. Рябухин П.Б., Казаков Н.В., Бурлов А.Н. Метод лесопромышленной типизации лесосек по природно-производственным условиям на примере ельников Дальневосточного федерального округа // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 2(6). С. 52–57. [Ryabukhin P.B., Cozakov N.V., Burlov A.N. Method of Timber Industry Typification of Cutting Areas According to Natural and Industrial Conditions (Spruce Forest of Far East Federal District as an Example). *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Sistemy. Methods. Technologies], 2010, no. 2(6), pp. 52–57].

12. Рябченко Н.А., Катермина В.В., Гнедаш А.А., Малышева О.П. Политический контент социальных движений в online-пространстве современных государств: методология анализа и исследовательская практика // Южно-рос. журн. соц. наук. 2018. Т. 19, № 3. С. 139–162. [Ryabchenko N.A., Katermina V.V., Gnedash A.A., Malyshcheva O.P. Political Content of Social Movements in the Online Space of Modern States: Methodology of the Analysis and Research Practices. *Yuzhno-rossiyskiy zhurnal sotsial'nykh nauk* [South Russian Journal of Social Sciences], 2018, vol. 19, no. 3, pp. 139–162]. DOI: [10.31429/26190567-19-3-139-162](https://doi.org/10.31429/26190567-19-3-139-162)

13. Типизация природно-производственных условий лесозаготовительных районов: рекомендации. Химки: ЦНИИМЭ, 1986. 23 с. [*Typification of the Natural-Production Conditions of Logging Areas: Recommendations*. Khimki, TsNIIME Publ., 1986. 23 p.].

14. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С. Лесная типология: теория и перспективы использования в лесах Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. XXXI, № 1-2. С. 143–148. [Farber S.K., Kuz'mik N.S. Forest Typology: Theory and Prospects for Use in Siberian Forests. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2013, vol. 31, no. 1-2, pp. 143–148].

15. Феклистова И.С. Использование кластерного анализа при оценке эффективности стратегического управления предприятиями региона // Траектория науки. 2016. № 2(7). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-klaster-nogo-analiza-pri-otsenke-effektivnosti-strategicheskogo-upravleniya-predpriyatiyami-regiona> (дата обращения: 06.08.19). [Feklistova I.S. Using Cluster Analysis for the Estimation of Efficiency of Strategic Management of the Region Enterprises. *Traektoriya nauki* [Path of Science], 2016, no. 2(7)].

16. Филипова А.Г., Еськова А.В., Инзарцев А.В. Социальный потенциал региона: опыт использования кластерного анализа // Регионология. 2017. Т. 25, № 3(100). С. 438–455. [Filipova A.G., Eskova A.V., Inzartsev A.V. Social Potential of a Region: Experience of Using Cluster Analysis. *Regionologiya* [Regionology], 2017, no. 3(100), pp. 438–455].

17. Хромушин В.А., Есков В.М., Хетагурова А.К. Инновационные методы анализа, обработки и управления информацией в практике здравоохранения // Вестн.

нов. мед. технологий. 2016. № 1. С. 15–21. Режим доступа: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2016-1/1-2.pdf> (дата обращения: 06.08.19). [Khromushin V.A., Eskov V.M., Khetagurova A.K. Innovative Methods of Analyzing, Processing and Information Management in Health System. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy* [Journal of New Medical Technologies], 2016, no. 1, pp. 15–21]. DOI: [10.12737/18446](https://doi.org/10.12737/18446)

18. Шегельман И.Р., Будник П.В., Баклагин В.Н. Минимизация техногенного воздействия лесных машин на экосистемы лесов на основе кластеризации природно-производственных условий лесозаготовок // Успехи современного естествознания. 2018. № 11(ч. 1). С. 72–78. [Shegelman I.R., Budnik P.V., Baklagin V.N. Minimization of Technogenic Effects of Forest Machines on Forest Ecosystems Based on the Clustering of Natural-Production Conditions for Forestry. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2018, no. 11 (part 1), pp. 72–78]. DOI: [10.17513/use.36908](https://doi.org/10.17513/use.36908)

19. Щемелева И.И. Социальная активность студенческой молодежи: факторный и кластерный анализ // Социол. исслед. 2019. № 4. С. 133–141. [Shchemeleva I.I. Social Activity of the Student Youth: Factor and Cluster Analysis. *Sotsiologicheskie issledovaniya* [Sociological Studies], 2019, no. 4, pp. 133–141]. DOI: [10.31857/S013216250004594-6](https://doi.org/10.31857/S013216250004594-6)

20. Ackerman P.A., Williams C., Ackerman S., Nathi C. Diesel Consumption and Carbon Balance in South African Pine Clear-Felling CTL Operations: A Preliminary Case Study. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, no. 38, iss. 1, pp. 65–72.

21. Alam M., Walsh D., Strandgard M., Brown M. A Log-by-Log Productivity Analysis of Two Valmet 475EX Harvesters. *International Journal of Forest Engineering*, 2014, vol. 25, iss. 1, pp. 14–22. DOI: [10.1080/14942119.2014.891668](https://doi.org/10.1080/14942119.2014.891668)

22. Bergroth J., Palander T., Kärhä K. Excavator-Based Harvesters in Wood Cutting Operations in Finland. *Forestry Studies*, 2006, vol. 45, pp. 74–88.

23. Castro G.P., Nutto L., Malinovski J.R., Malinovski R.A. Harvesting Systems. *Tropical Forestry Handbook*. Berlin, Springer, 2016, pp. 2445–2485. DOI: [10.1007/978-3-642-54601-3\\_184](https://doi.org/10.1007/978-3-642-54601-3_184)

24. Häggström C., Lindroos O. Human, Technology, Organization and Environment – a Human Factors Perspective on Performance in Forest Harvesting. *International Journal of Forest Engineering*, 2016, vol. 27, iss. 2, pp. 67–78. DOI: [10.1080/14942119.2016.1170495](https://doi.org/10.1080/14942119.2016.1170495)

25. Jiroušek R., Klvač R., Skoupý A. Productivity and Costs of the Mechanised Cut-to-Length Wood Harvesting System in Clear-Felling Operations. *Journal of Forest Science*, 2007, vol. 53, iss. 10, pp. 476–482. DOI: [10.17221/2088-JFS](https://doi.org/10.17221/2088-JFS)

26. 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. DOI: [10.1080/14942119.2004.10702496](https://doi.org/10.1080/14942119.2004.10702496)

27. 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. 43–52. DOI: [10.1080/08435243.1994.10702659](https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659)

28. Klaes B., Struck J., Schneider R., Schüler 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. DOI: [10.1007/s10342-016-0995-2](https://doi.org/10.1007/s10342-016-0995-2)

29. 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. DOI: [10.1515/agriceng-2018-0007](https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0007)

30. Laitila J., Väätäinen K. The Cutting Productivity in Integrated Harvesting of Pulpwood and Delimbed Energy Wood with a Forestry-Equipped Peat Harvesting Tractor. *Suo*, 2013, vol. 64(2-3), pp. 97–112.



31. McNeel J.F., Rutherford D. Modeling Harvester-Forwarder System Performance in a Selection Harvest. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 6, iss. 1, pp. 7–14. DOI: [10.1080/08435243.1994.10702661](https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702661)
32. Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-Length Harvesting System. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, no. 2, pp. 335–363. DOI: [10.14214/sf.346](https://doi.org/10.14214/sf.346)
33. Ovaskainen H. Comparison of Harvester Work in Forest and Simulator Environments. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39, no. 1, pp. 89–101. DOI: [10.14214/sf.398](https://doi.org/10.14214/sf.398)
34. Palander T., Bergroth J., Kärhä K. Excavator Technology for Increasing the Efficiency of Energy Wood and Pulp Wood Harvesting. *Biomass and Bioenergy*, 2012, vol. 40, pp. 120–126. DOI: [10.1016/j.biombioe.2012.02.010](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.02.010)
35. Pētersons J. Productivity of Harvesters in Commercial Thinnings in the Forest Stands of Different Composition of Species. *Research for Rural Development*, 2014, vol. 2, pp. 76–82.
36. Proto A.R., Macri G., Visser R., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity. *European Journal of Forest Research*, 2018, vol. 137, iss. 2, pp. 143–151. DOI: [10.1007/s10342-017-1088-6](https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6)
37. Rozītis A., Zimelis A., Lazdiņš A. Evaluation of Productivity and Impact on Soil of Tracked ProSilva F2/2 Forwarder in Forest Thinning. *Research for Rural Development*, 2017, vol. 1, pp. 94–100. DOI: [10.22616/rrd.23.2017.014](https://doi.org/10.22616/rrd.23.2017.014)
38. Schack-Kirchner H., Fenner P.T., Hildebrand E.E. Different Responses in Bulk Density and Saturated Conductivity to Soil Deformation by Logging Machinery on a Ferral-sol under Native Forest. *Soil Use and Management*, 2007, vol. 23, iss. 3, pp. 286–293. DOI: [10.1111/j.1475-2743.2007.00096.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00096.x)
39. Strandgard M., Mitchell R., Acuna M. Time Consumption and Productivity of a Forwarder Operating on a Slope in a Cut-to-Length Harvest System in a *Pinus radiata* D. Don Pine Plantation. *Journal of Forest Science*, 1972, vol. 63, iss. 7, pp. 324–330. DOI: [10.17221/10/2017-JFS](https://doi.org/10.17221/10/2017-JFS)
40. Syunev V., Sokolov A., Konovalov A., Katarov V., Seliverstov A., Gerasimov Y., Karvinen S., Välkky E. Comparison of Wood Harvesting Methods in the Republic of Karelia. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 120*. Joensuu, MELTA, 2009. 117 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2009/mwp120.htm> (accessed 04.09.19)
41. Tiernan D., Zeleke G., Owende P.M.O., Kanali C.L., Lyons J., Ward S.M. Effect of Working Conditions on Forwarder Productivity in Cut-to-Length Timber Harvesting on Sensitive Forest Sites in Ireland. *Biosystems Engineering*, 2004, vol. 87, iss. 2, pp. 167–177. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2003.11.009](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.11.009)
42. Tufts R.A. Productivity and Cost of the Ponsse 15-Series, Cut-to-Length Harvesting System in Southern Pine Plantations. *Forest Products Journal*, 1997, vol. 47, no. 10, pp. 39–46.

#### TYPIFICATION OF FOREST AREAS BY NATURAL-PRODUCTION CONDITIONS BASED ON CLUSTER ANALYSIS

**Ilya R. Shegelman**, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [P-9793-2019](https://orcid.org/0000-0001-5133-4586),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5133-4586>

**Pavel V. Budnik**, Candidate of Engineering, Head of the Department of Intellectual Property and Invention Protection; ResearcherID: [E-1782-2015](https://orcid.org/0000-0002-8701-4442),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-4442>

Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: budnikpavel@yandex.ru

**Abstract.** The effectiveness of harvesting machines, their reliability, and the level of negative environmental impact depends on the degree of adaptation of the equipment to natural-production conditions (NPC). To choose the equipment it is necessary to allocate groups of areas with close NPC. The purpose of the study is to form methodological tools for forest industry typification of forest areas by NPC. It is proposed to carry out the typification of forest areas based on cluster analysis. For this purpose, a methodology has been developed, including: setting the goal of typing areas by NPC; data collection on NPC; conducting cluster analysis; decision making on typification of areas by NPC. The task of cluster analysis is to divide, on the basis of a certain set of data, the set of forest areas into groups with similar NPCs. It is proposed to use Euclidean distances as a measure of belonging to one of the groups, and to determine the data set by indicators describing the NPC. The proposed methodology has been tested on the example of the European North of Russia (ENR). The study showed that three zones can be distinguished in ENR: zone A, including the Murmansk region; zone B, including the Republic of Karelia, the Republic of Komi and the Arkhangelsk region; zone C, including the Vologda region. Additionally, two subzones are distinguished in zone B: the West Karelian Upland and the territories belonging to the Northern, Subpolar and Polar Urals. The proposed methodology allows to increase the degree of formalization and convenience of the typification process of forest areas by NPC, to take into account a wide range of various aspects of natural-production conditions, their probabilistic nature, as well as to flexibly carry out the typification of areas for specific purposes. The research results may be applicable in solving problems of searching for effective technologies and rational parameters of logging machine systems.

**For citation:** Shegelman I.R., Budnik P.V. Typification of Forest Areas by Natural-Production Conditions Based on Cluster Analysis. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 120–137. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-120-137

**Funding:** The work was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists on the project “Development of the Environment for the Design of Optimal Parameters of Technological Equipment of Forest Multiple-Function Machines” (МК-5321.2018.8).

**Keywords:** typification of forest areas, natural-production conditions, logging operations, cluster analysis.

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

Поступила 04.09.19 / Received on September 4, 2019

---