

## ТИПИЗАЦИЯ ФАКТОРНЫХ МНОЖЕСТВ ОБЪЕКТОВ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА И ПРЕДПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИХ РАЗМЕЩЕНИЯ

С.Б. Якимович✉, А.В. Мехренцев

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 620100, Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37

yakimovichsb@m.usfeu.ru

Представлен критический анализ известных работ по проблематике типизации в лесном комплексе и выделения однородных множеств на основе кластерного анализа. Сформулирована проблема типизации природно-производственных условий и параметрически известной системы лесных машин, с одной стороны, и отсутствия производного множества недвижимых объектов в виде лесных дорог, промышленных площадок и др., размещаемых на арендуемых лесных участках — с другой. Определена эффективность заготовки древесины на основе модифицирования методики рационального объединения (пересечения) и типизации множеств природно-производственных условий лесных участков, известной системы машин заготовки и транспорта древесины, а также рекомендаций по рациональному множеству лесных дорог, размещенных промышленных площадок и др. объектов для транспортных, погрузочно-разгрузочных, обрабатывающих и информационных функций, реализуемых на арендуемых лесных участках. Выполнены модифицирование и практическая промышленная апробация методики, отличающейся от известных включением обрабатывающих транспортно-перегрузочных множеств локальных объектов лесного комплекса, параметрически заданной системы лесных машин, а также множеств лесных участков.

**Ключевые слова:** лесные участки, производное множество локальных объектов, природно-производственные условия, кластеризация

**Ссылка для цитирования:** Якимович С.Б., Мехренцев А.В. Типизация факторных множеств объектов лесного комплекса и предпроектное обоснование их размещения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 114–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-114-125

Актуальность рассматриваемой темы заключается в повышении эффективности систем заготовки древесины посредством системного подхода к типизации и группировке лесных объектов, снимающих неполное и частичное описание лесных промышленных систем. В частности в работе [1] в историческом и текущем исследовательских аспектах [2, 3] представлены генетическое и динамическое направления типологии в связи с влиянием антропогенных факторов и управлением ими посредством системы лесохозяйственных мероприятий, выборочных рубок или типов вырубок без рекомендаций по управлению техногенной составляющей по критерию снижения техногенного воздействия. Представленная группировка по типу леса и лесорастительным условиям, которая носит описательно-объяснительный характер, однородных или биологически равноценных групп для условий роста и производительности древостоев, не содержит информации о наиболее целесообразных системах машин и иных производственных условиях, определяющих эффективность заготовки древесины и иные функции леса с ограничениями на неистощительное лесопользование.

Вопросы типизации подобных множеств, включая технические системы, в отрасли занимают достаточно давно [4–14], однако методики их применения не в полной мере отражают требования практики. Иначе, в известные процедуры и результаты типизации не включены все возможные факторные множества объектов системы лесопользования, в том числе и систем заготовки древесины.

Типизация природно-производственных условий заготовки древесины и постановка в соответствие им систем машин на основе систематизации, лесопромышленного районирования и оценочных матриц применимости машин в определенных условиях рассмотрены в работах [4–6]. Типизация выполнена практически по всем возможным на тот период, факторам лесных объектов, за исключением требований сохранения лесной среды, факторов качественного характера и отсутствия формализации объединения или пересечения множеств природно-производственных условий и технологий заготовки древесины. Отметим также, что реализовано это применительно к иерархическому уровню страны, что влечет за собой значительные отклонения по соответствию систем машин для какого-либо конкретного предприятия, его лесных участков и возможное

существенное снижение эффективности применения выбранных машин, а в ряде случаев и отрицательный эффект.

В работах [7, 8] представлена методика выделения нескольких однородных групп лесосек на основе кластерного анализа или наиболее распространенной однородной группы лесосек посредством выбора закона распределения параметров и постановки в соответствие им систем машин на основе разработанных параметрических рядов на уровне крупного и малого предприятий. Однако отсутствует подход к группировке по качественным признакам.

В работах [9, 10] рассмотрен оригинальный математический аппарат типизации (таксономии) на уровне региона (федерального округа), выполнена типизация. Однако нет сравнительной оценки данного подхода и других известных способов, отсутствует конечный результат — нет методики обоснования машин и способов заготовки древесины, соответствующих полученным типам природно-производственным условий.

Работа [11] носит экспериментальный характер. В ней на основе кластерного анализа выполнено выделение параметрически однородных групп предмета труда в целях эксперимента и объединение однородных множеств пиловочника с множеством диаметров пиловочника и координат размещения сучьев. Факторы качества в этой работе не учитывались.

Работы [12, 13] представили типизацию природно-производственных условий заготовки древесины на уровне региона, как и работы [4–6], но отличаются дополнительными факторами типизации, использованием стандартных методов кластерного анализа и имеют недостатки, отмеченные ранее.

На основе приведенного анализа разработан способ, развивающий известные подходы, который реализован в методике типизации природно-производственных условий [14] арендованных лесных участков, с одной стороны, и параметрически однородных групп лесных машин и способов заготовки древесины с параметрами этих условий — с другой, для их последующего рационального совмещения (пересечения). Методика параметрической и качественной группировки однородных множеств объектов в системе лесного комплекса в целях пересечения множеств, реализуемая в данном подходе, основана на кластерном анализе. Необходимость в подобной методике типизации и объединения однородных объектов (множеств) лесной инфраструктуры обусловлена обоснованием наиболее эффективных систем, обеспечивающих заготовку древесины с учетом неистощительного лесопользования, сохранения продуктивности лесной среды. Под объектами

здесь понимаются составляющие технологии заготовки и транспорта древесины — предмет труда (лесной участок, дерево, хлыст, сортимент и т. д.), средства преобразования и перемещения предмета труда (оборудование, машины и т. д.) и способы преобразования, действия или процессы, преобразующие предмет труда, логистика транспорта древесины, включающая транспортные пути, промежуточные и иные погрузочно-разгрузочные промежуточные площадки, склады первичной переработки (в дальнейшем объекты лесного комплекса). Рациональная группировка и выделение однородных объектов лесного комплекса предполагает их пересечение и применение к полученным производным группам различных способов повышения эффективности, параметрической, структурной и функциональной оптимизации.

Отличие данной методики типизации заключается в ее ориентированности на конечный результат и адаптации к изменяющимся в пространстве и времени промышленно-лесным системам: к разнообразию природно-производственных условий, системам машин, инфраструктуре недвижимости, правилам неистощительного лесопользования и другим факторам, включая новые факторы с соответствующими им новыми множествами. Иными словами, типизация на основе предлагаемой методики рассматривается не как нечто неизменяемое, догматическое, а как развивающееся, уточняемое и дополняемое явление, и в связи с учетом изменений реализующее гибкий подход к получению результата в определенных пространственных и временных интервалах.

В практике проектирования объектов лесного комплекса и освоения новых лесных участков возникают задачи, которые требуют уточнения содержания данной методики. Например, задачи, в которых помимо параметрических и функциональных объединяемых множеств природно-производственных условий и технологий с системами машин для заготовки древесины появляются объекты инфраструктуры в виде лесных дорог, промышленных площадок и других объектов, размещаемых на арендуемых лесных участках для выполнения транспортных, погрузочно-разгрузочных, обрабатывающих и информационных функций [15]. Так, появляются задачи факторного анализа этих объектов инфраструктуры и наиболее рационального проектирования, географического размещения и объединения или пересечения с известными множествами природно-производственных условий и технологий для заготовки древесины.

Выделим подобные объекты лесопромышленной инфраструктуры как локальные обрабатывающие транспортно-перегрузочные множества недвижимых объектов. К таким множествам

относятся лесные дороги и промышленные площадки, группируемые с арендуемыми лесными участками и параметрически описываемыми природно-производственными условиями, в том числе по объемам перерабатываемой и пропускаемой древесины, при ограничениях на существующие системы машин конкретных предприятий, логистику и запреты на размещение в определенных лесных участках.

Отметим также, что в подвергнутых краткому анализу работах локальные обрабатывающие транспортно-перегрузочные множества недвижимых объектов не рассмотрены и не известны как объекты группировки на предмет соответствия природно-производственным условиям и технологиям для заготовки древесины.

Представленный краткий анализ содержания публикаций определяет проблему практической значимости, связанной с отсутствием в методике типизации и группировки [14, 15] локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных множеств недвижимых объектов, на предмет их создания и размещения в рациональной системе, реализующей определенный конечный продукт или продукты заготовки древесины.

На основе изложенного выше можно прийти к заключению о необходимости развития данной методики.

## Цель работы

Цель работы — повышение эффективности заготовки древесины на основе модификации методики рационального объединения (пересечения, выделения) и типизации множеств объектов лесного комплекса.

## Материалы и методы

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выполнен анализ способов группировки объектов лесного комплекса;
- представлены их достоинства и недостатки относительно качества группировки;
- реализовано модифицирование методики рационального объединения (пересечения, выделения) и типизации множеств объектов лесного комплекса;
- выполнена практическая апробация методики в рамках госбюджетной и хоздоговорной научно-исследовательской работ [14, 16, 17].

Методологическая основа исследований определялась системным подходом, объединившим применительно к объектам исследования инвариантные методы кластеризации, квалиметрии, теории нечетких множеств, математической статистики, параметрические ряды, методы теории множеств. Использовалась также методика типизации природно-производственных условий [14]

арендованных лесных участков с одной стороны и параметрически однородных групп лесных машин и способов заготовки древесины с параметрами этих условий с другой.

Системный подход реализован посредством системного представления факторов разнообразия всех возможных множеств объектов лесного комплекса.

При этом учтены ограничения на способы преобразования и перемещения предмета труда заготовки древесины и параметры машин в соответствии с требованиями неистощительного лесопользования, сохранения продуктивности лесной среды.

Методы кластеризации, использованные в работе, представлены апробированными эффективно работающими стандартными способами. Под кластером понимают группу объектов, обладающих свойством отделимости от других кластеров по плотности (плотность объектов внутри кластера выше, чем вне его), дисперсии, форме, которые определяются выбранным расстоянием между параметрами объекта [18]. Расстояние между объектами является мерой сходства (расхождения). Расстояния могут представляться в натуральных или безразмерных (стандартизованных единицах). Евклидово расстояние — наиболее общий тип расстояния. Оно является геометрическим расстоянием в многомерном пространстве и вычисляется следующим образом

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (1)$$

где  $d_{ij}$  — расстояние между объектами  $i$  и  $j$ ;

$x_{ik}$  — значение  $k$ -й переменной для  $j$ -го объекта.

Евклидово расстояние (и его квадрат) вычисляется по исходным, а не по стандартизованным данным. Кроме евклидова расстояния могут использоваться расстояния городских кварталов, метрики Чебышева, Минковского и др. Однако в дальнейшем по изложенным основаниям в кластеризации используется евклидово расстояние. В практическом примере реализуется евклидово расстояние.

При объединении расстояния между объектами определяются выбранной мерой. Стандартно объединение в однородные группы реализуется следующими способами.

Одиночная связь (метод ближайшего соседа). В этом методе расстояние между двумя кластерами определяется расстоянием между двумя наиболее близкими объектами (ближайшими соседями) в различных кластерах и результирующие кластеры имеют тенденцию быть представленными длинными «цепочками».

Метод *K*-средних. Этот метод кластеризации существенно отличается от предыдущего метода тем, что для его применения требуется предварительное знание количества кластеров. Метод *K*-средних строит *K* заданных кластеров, расположенных на возможно больших расстояниях друг от друга.

В практической апробации для предварительного анализа используется метод ближайшего соседа, для уточнения типизации и объединения — метод *K*-средних.

Метод квалиметрического анализа предназначен для количественной оценки качественных факторов объекта и в данном случае носят экспертный характер. Качественные оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «отлично — плохо» переводятся в количественные безразмерные оценки на основе, например, обобщенной функции Харрингтона.

Более точными, но и более сложными в реализации аналогичной задачи, являются методы теории нечетких (распльвчатых, пушистых) множеств, основанных на лингвистической переменной Л.А. Заде [19]. В практической апробации эти методы использованы для описания качественных факторов и последующего перевода их в количественные, например, для перевода в квалиметрические значения следующих качественных показателей: 1) наличие или отсутствие на лесном участке дорог с твердым покрытием; 2) общая граница со смежным лесным участком или участками.

Параметрические ряды в практической апробации использованы для описания параметров известных систем машин и их применения для совмещения с множеством природно-производственных условий лесных участков и локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных производных множеств недвижимых объектов.

Методы математической статистики использовались в рамках описательной статистики при определении статистических оценок рассматриваемых множеств и как встроенные элементы кластерного анализа [20].

Методика типизации [14] использовалась как основа для модифицирования методики рационального объединения (пересечения, выделения) и типизации множеств объектов лесного комплекса. Алгоритм методики подробно изложен в работе [14] и содержит следующие шаги.

1. Формулирование цели группировки, выбор и обоснование количественных и качественных факторов группировки. Разработка методики и сбор данных для выделения однородных множеств.

2. Приведение к стандартизованному виду при необходимости.

3. Обоснование способа перевода качественных факторов в количественные показатели на основе квалиметрии или методов нечетких множеств.

4. Обоснование метрики и меры расстояния между множествами параметров множества объектов лесного комплекса в их многопараметрическом описании.

5. Выбор метода объединения объектов лесного комплекса в кластеры из возможных стандартных. (Выполняется на основе предварительного тестирования и сравнения качества полученных кластеров как разведочный анализ).

6. Кластеризация и выделение кластеров, определение количества кластеров.

7. Уточнение статистических оценок для полученного количества кластеров на основе метода *K*-средних. При необходимости (кластеры не соответствуют физической сущности, полученные кластеры имеют различия сравнительно с разведочным анализом и т. д.) возврат к шагу 4. В противном случае анализ кластеров и выделение из множества объектов лесного комплекса, которые подлежат совмещению и образуют систему.

8. Совмещение (пересечение, объединение) полученных множеств в соответствии с поставленной целью на основе повторного кластерного анализа или методов теории множеств. Например, кластеризация однородных групп природно-производственных условий, с одной стороны, и однородных групп или параметрических рядов лесных машин — с другой. При необходимости приложение к полученной системе одних и тех же способов, методов, моделей оптимизации, обеспечивающих повышение их эффективности по различным критериям.

Данная методика типизации и группировки позволяет реализовать объединение всех составляющих предметно-функциональных частей технологии заготовки и обработки древесины, в том числе и недвижимых объектов для любого уровня иерархии систем заготовки и обработки древесины, начиная с минимальной — лесосеки, а — при необходимости — выполнить разработку оптимальной или рациональной технологии, рассматриваемой как развивающееся, уточняемое и дополняемое явление в определенные пространственные и временные интервалы.

При выполнении практической апробации модифицированной методики нами были использованы материалы и требования к содержанию в соответствии с техническим заданием заказчика, связанные с переработкой листового и хвойного дровяного сырья в щепу на промышленных площадках, географически определяемых и примыкающих к существующим дорогам, лесным участкам или группе лесных участков, а также

с последующей транспортировкой древесины (щепы, деловых сортиментов) по дорогам общего пользования, в частности:

1) материалы инвестиционного проекта ООО «Синергия» [21], информация о технических характеристиках систем машин «харвестер — форвардер» с максимальным расстоянием трелевки не более 3000 м, технология двухступенчатой вывозки сортиментов на базе сортиментовозов Урал-4320 (первая ступень) и двуприцепных автолесовозов и щеповозов для транспортировки древесины по дорогам общего пользования;

2) требования к объемам переработки низкокачественной древесины на щепу различного назначения, маркам и характеристикам мобильных рубильных машин и щеповозов, единице времени — календарному году, территориальной основе представления исходных данных — лесным участкам (объемы представляются в натуральном выражении);

3) к перечню лесничеств, границ, информации о товарной структуре по материалам последних лесохозяйственных регламентов лесничеств Свердловской обл. [22] с характеристиками арендуемых лесных участков (39 участков) ООО «Синергия», существующему географическому структурированию лесных участков, лесным участкам, находящимся в аренде: к объему запаса по лиственному (пиловочнику лиственному, балансу лиственному, дровам лиственным) и хвойному (дровам) хозяйствам;

4) к предполагаемым маршрутам транспортировки сырья, видам транспорта (автомобильному, железнодорожному), кратчайшему расстоянию (в метрах) вывозки сырья по квартальным просекам от условных центров лесных участков до дороги с твердым покрытием;

5) материалы по наличию или отсутствию дороги с твердым покрытием для каждого из лесных участков (доступность лесных участков, в условных единицах), необходимости строительства лесовозной дороги с твердым покрытием.

## Результаты и обсуждение

Используемая в практической апробации методика отличается от указанной в разделе «Материалы и методы» тем, что для типизации и объединения заданных систем машин заготовки, транспортировки древесины и ее переработки на щепу применяются факторные множества лесных участков материалов заказчика (см. раздел «Материалы и методы») и возможные локальные обрабатывающие транспортно-перегрузочные множества недвижимых объектов. Иначе говоря, в изменяемой методике на основе типизации предполагается поиск возможных размещений локальных обрабатывающих транспортно-пере-

грузочных производных множеств недвижимых объектов, объединенных с множествами лесных участков при заданном множестве системы машин.

Формализовано [23] данная методика представляется следующим выражением операций пересечения и последующего объединения однородных групп производных множеств локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных лесных объектов

$$\text{МПО}_{ij} = \bigcup_{i,j}^n (\text{МПУ}_i \cap \text{МСМ}_j), \quad (2)$$

где  $\text{МПО}_{ij}$  — производное  $ij$ -е множество локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных лесных объектов;

$\text{МПУ}_i$  —  $i$ -е лесные участки с присущими им природно-производственными условиями;  $\text{МСМ}_j$  —  $j$ -е, параметрически заданные системы машин и способы заготовки древесины;  $n$  — количество локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных лесных объектов.

В связи с тем что типизация выполнена на основе кластерного анализа в программной среде Statistica [24], поясняющие рисунки и таблицы представляются в виде копий экранов (рис. 1–3).

В соответствии с алгоритмом методики, изложенной в работе [14] шаги 1–5 представлены ниже, за исключением шага 2. В приведении к стандартизованному виду нет необходимости. Выполнение перевода качественных факторов в количественные показатели реализовано на основе простейшей квалитметрической шкалы порядка согласно работе [25] по следующим факторам: 1) наличию или отсутствию на лесном участке дорог с твердым покрытием, отражаемых в виде большого положительного (10 000 у. ед.) и минимального (1 у. ед.) чисел; 2) общей границе со смежным лесным участком или участками, отражаемой рядом чисел одного порядка с остальными показателями для группировки с соответствующей градацией (числа порядка 103 с этой же градацией) (рис. 1, столбцы 5, 6). При необходимости в зависимости от степени реализации поставленной цели квалитметрические значения корректируются.

Исходя из изложенного выше, для кластеризации в качестве первичного принимается метод одиночной связи (метод ближайшего соседа) для предварительной оценки количества кластеров. Впоследствии для уточнения и проверки качества выделенных кластеров, метод  $K$ -средних. При кластеризации для всех методов используется евклидово расстояние. Кластеризация проводится для 39 участков по шести параметрам (см. рис. 1).

Участковые лесничества и участки	Кластеризация лесных участков ООО "Синергия" (2021 год, один объект - один участок)					
	1 Пилоочник лиственный м <sup>2</sup>	2 Балансы лиственные м <sup>3</sup>	3 Дровяная древесина м <sup>3</sup>	4 Расстояние до ближайшей действующей дороги с покрытием, м	5 Наличие или отсутствие дороги с покрытием, усл. единицы	6 Граница со смежным участком, усл. ед.
Н-Т, Висимское участковое лесничество Висимо - Уткинский участок	1871,3	1798,5	4993,0	8000,0	10000,0	1000,0
Н-Т, Висимское участковое лесничество Сулемский участок	373,4	358,9	996,3	13000,0	10000,0	1000,0
Н-Т, Висимское участковое лесничество урочище ГЗЗ "Висимский"	1096,5	1053,9	2925,8	2000,0	1,0	2000,0
Н-Т, Красноуральское участковое лесничество Красноуральский участок	1370,0	1316,7	3655,4	15000,0	10000,0	2000,0
Н-Т, Петрокаменское участковое лесничество Петрокаменский участок	1046,5	1005,9	2792,5	12000,0	10000,0	7000,0
Н-Т, Петрокаменское участковое лесничество Урочище АОЗТ "Краснополье"	3356,5	3226,1	8956,1	12000,0	10000,0	7000,0
Н-Т, Уральское участковое лесничество Уральский участок	4561,8	4384,5	12172,0	12000,0	10000,0	3000,0
Н-Т, Уральское участковое лесничество Урочище ГУСП Совхоз "Горноуральский"	1112,4	1069,2	2968,3	3000,0	1,0	3000,0
Н-Т, Уральское участковое лесничество урочище ФГУП "Химический завод "Планта"	258,1	248,0	688,6	1000,0	1,0	3000,0
Н-Т, Башкарское участковое лесничество урочище ГЗЗ "Урочище Южаковское"	718,2	690,3	1916,3	21000,0	10000,0	6000,0
Н-Т, Башкарское участковое лесничество АКФС "Дружба" урочище	571,0	548,9	1523,7	2000,0	10000,0	6000,0
Н-Т, Башкарское участковое лесничество Башкарский участок	573,2	551,0	1529,6	16000,0	10000,0	6000,0
Н-Т, Серебрянское участковое лесничество Серебрянский участок	4238,4	4073,6	11309,1	17000,0	10000,0	5000,0
Н-Т, Серебрянское участковое лесничество Чусовской участок	2010,7	1932,6	5365,2	10000,0	10000,0	5000,0
Н-Т, Серебрянское участковое лесничество урочище ГЗЗ "Чусовское"	605,1	581,6	1614,5	500,0	1,0	5000,0
Н-Т, Синегорское участковое лесничество Синегорский участок	4674,9	4493,2	12473,8	8000,0	10000,0	4000,0
Н-Т, Николо-Павловское участковое лесничество урочище СПК "Николо-Павловское"	396,4	381,0	1057,8	2000,0	1,0	7000,0
Н-Т, Николо-Павловское участковое лесничество "Николо-Павловский участок"	737,4	708,8	1967,6	5000,0	10000,0	7000,0
Н-Т, Городское участковое лесничество Городской участок	1436,9	1381,1	3834,2	4000,0	1,0	8000,0
Куш, Красноуральское участковое лесничество Красноуральский участок	429,5	348,1	1019,4	9000,0	1,0	11000,0
Куш, Салдинское участковое лесничество Салдинский участок	274,8	222,7	652,1	9000,0	10000,0	12000,0
Куш, Нижне-Салдинское участковое лесничество Нижнесалдинский участок	1514,6	1227,4	3594,5	6000,0	10000,0	13000,0
Н-л, Коноплинское участковое лесничество Сухогорский участок	5306,3	4445,6	12408,9	12000,0	10000,0	21000,0
Н-л, Павдинское участковое лесничество Павдинский участок	8150,0	6828,0	19059,1	10000,0	10000,0	22000,0
Н-л, Павдинское участковое лесничество Каменский участок	3260,2	2731,4	7624,2	20000,0	10000,0	22000,0
Н-л, Отвинское участковое лесничество Новоселовский участок	16942,8	14194,6	39621,4	5000,0	10000,0	23000,0
Н-л, Старолялинское участковое лесничество Старолялинский участок	28694,2	24039,9	67102,5	23000,0	10000,0	24000,0
Егор, Артемовское участковое лесничество урочище АОЗТ "Согра"	864,4	740,4	2564,1	500,0	1,0	40000,0
Егор, Лебедкинское участковое лесничество Лебедкинский участок	560,6	480,2	1662,8	5000,0	1,0	41000,0
Егор, Красногвардейское участковое лесничество Красногвардейский участок	3439,2	2946,0	10202,0	16000,0	10000,0	41000,0
Верх, Косолманское участковое лесничество Вологинский участок	3374,1	2515,1	6268,2	9000,0	10000,0	25000,0
Верх, Косолманское участковое лесничество Косолманский участок	3286,8	2450,0	6106,1	10000,0	10000,0	25000,0

Рис. 1. Копия экрана фрагмента исходных данных практической кластеризации лесных участков и промышленных площадок

Fig. 1. A fragment print screen of the initial data of forest plots practical clustering and industrial sites

Результаты кластеризации представлены на рис 2. По итогам решения выделены кластеры с лесными участками, в следующем составе (фрагмент выделенных кластеров представлен ниже):

*первый:* 1) Карпинское лесничество, Кытлымское участковое лесничество, Тыпыльский участок; 2) Новолялинское лесничество, Старолялинское участковое лесничество, Старолялинский участок;

*второй:* Новолялинское лесничество, Отвинское участковое лесничество, Новоселовский участок;

*третий:* 1) Егоршинское лесничество, Лебедкинское участковое лесничество, Лебедкинский участок; 2) Егоршинское лесничество, Артемовское участковое лесничество урочище АОЗТ «Согра»;

*третий (а):* Егоршинское лесничество, Красногвардейское участковое лесничество. Красногвардейский участок;

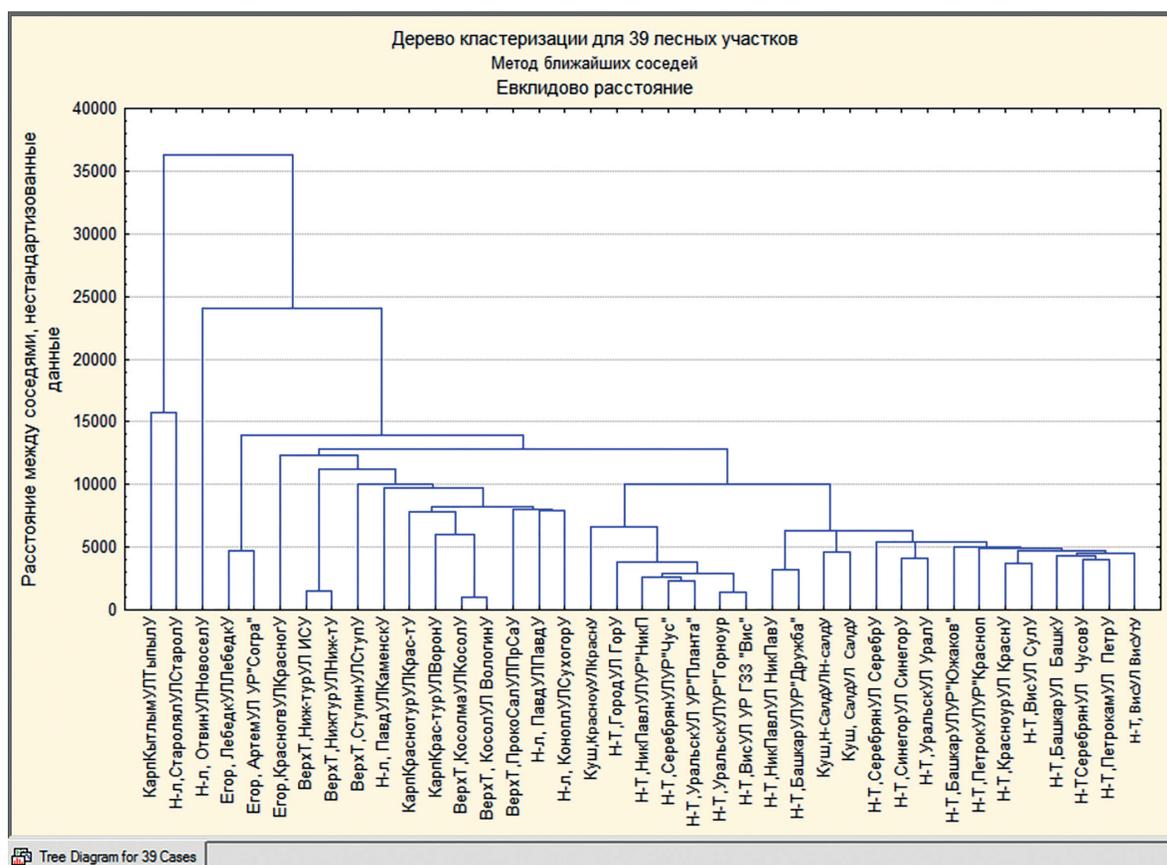
*третий (б):* 1) Верхотурское лесничество, Нижнетуринское участковое лесничество, Исковский участок; 2) Верхотурское лесничество, Нижнетуринское участковое лесничество, Нижнетуринский участок; 3) Верхотурское лесничество,

Ступинское участковое лесничество Ступинский участок; 4) Новолялинское лесничество, Павдинское участковое лесничество, Каменский участок; *четвертый:* 1) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Краснотурьинский участок; 2) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Воронцовский участок;

*четвертый (а):* 1) Верхотурское лесничество, Косолманское участковое лесничество, Косолманский участок; 2) Верхотурское лесничество, Косолманское участковое лесничество, Вологинский участок;

*четвертый (б):* 1) Верхотурское лесничество, Прокоп-Салдинское участ. лесничество, Прокоп-Салдинский участок; 2) Новолялинское лесничество, Павдинское участковое лесничество, Павдинский участок; 3) Новолялинское лесничество, Коноплинское участковое лесничество, Сухогорский участок и т. д. (подробно см. в работах [16, 22]).

Согласно проведенному предварительному анализу результатов (см. рис. 2), можно выделить второй и третий (а) кластеры, представленные отдельными единичными объектами, а также на



**Рис. 2.** Дерево кластеризации и графическое представления кластеров для 39 арендованных лесных участков ООО «Синергия»  
**Fig. 2.** Clustering tree and graphical representation of clusters for 39 leased forest plots of Synergy LLC

кластеры 5а, 6в, имеющие в своем составе максимальное число участков. Если по кластеру 5а максимальное число участков обусловлено наличием дороги с твердым покрытием на расстоянии не более 3000 м от условного центра, что определяет возможность транспорта круглых лесоматериалов форвардерами до места переработки, то по кластеру 6в требуется более детальный анализ с полным расчетом характеристик лесных участков этого кластера. Однако на основе предварительного анализа достаточно однозначно определены кластеры:

– *кластер 1:* 1) Карпинское лесничество, Кытлымское участковое лесничество, Тыпыльский участок; 2) Новолялинское лесничество, Старолялинское участковое лесничество, Старолялинский участок;

– *кластер 2:* Новолялинское лесничество, Отвинское участковое лесничество, Новоселовский участок;

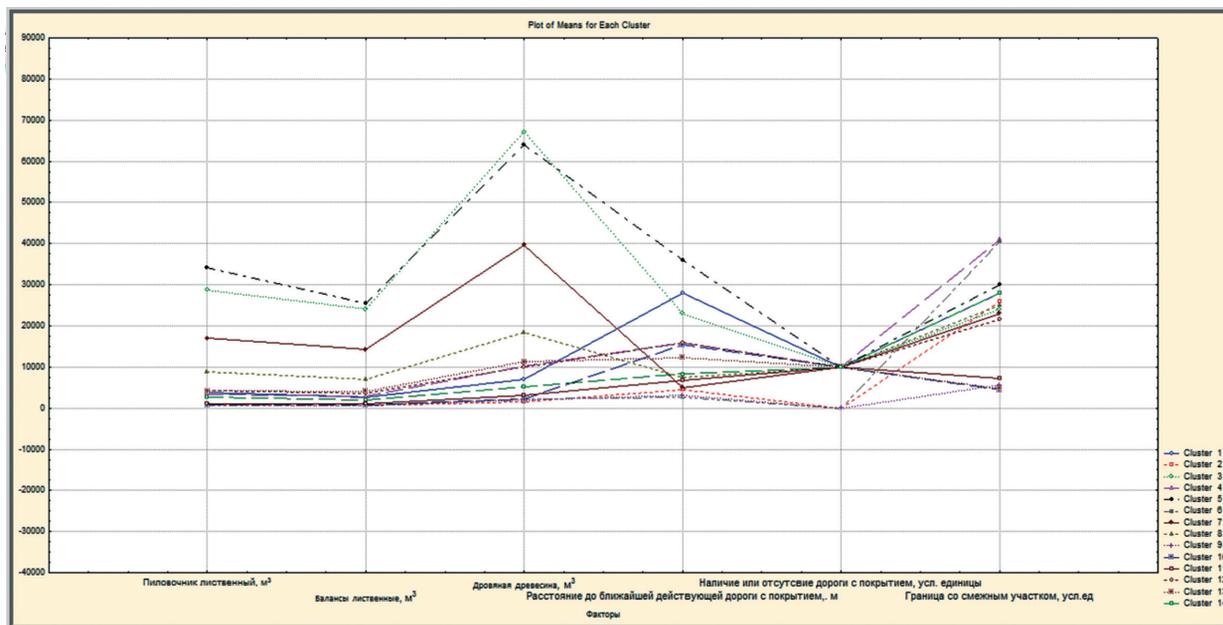
– *кластер 4:* 1) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Краснотурьинский участок; 2) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Воронцовский участок.

По перечисленным кластерам и соответствующим им лесным участкам формулируются выводы в рамках промежуточного этапа. Оставшиеся семь кластеров требуют дополнительного анализа с расчетами описательных статистик (средних значений, минимального и максимального расстояния, дисперсии и пр.).

На основе предварительного вывода следует необходимость дополнительного, более основательного, анализа на основе метода *K*-средних в целях получения статистических оценок, выделенных 14 кластеров. Результаты кластеризации методом *K*-средних представлены на рис. 3.

Анализ значений средних по рис. 3 показал, что наибольший разброс значений по всем 14 кластерам имеют объемы дровяной древесины, включая балансы лиственные, расстояния из условных центров лесных участков до действующей дороги с твердым покрытием, смежность лесных участков (наличие общих границ), а также географическое размещение лесных участков и объемы заготавливаемой древесины в целом по каждому из участков.

По итогам кластерного анализа, включая заключение по анализу методом *K*-средних, и объ-



**Рис. 3.** Графическое отображение кластеров по средним значениям факторов (по оси ординат значения факторов в единицах, приведенных в названиях факторов на оси абсцисс)  
**Fig. 3.** Graphical representation of clusters by the average values of factors (on the ordinate axis, the values of factors in units given in the names of factors on the abscissa axis)

единения множеств факторов лесных участков по лесничествам и дорог с промышленными площадками по переработке круглых лесоматериалов на щепу определено следующее (приведем фрагмент анализа):

*достаточно однозначно определены кластеры:*

– кластер 1: 1) Карпинское лесничество, Кытлымское участковое лесничество, Тыпыльский участок; 2) Новолялинское лесничество, Старолялинское участковое лесничество, Старолялинский участок;

– кластер 2: Новолялинское лесничество, Отвинское участковое лесничество, Новоселовский участок.

– кластер 4: 1) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Краснотурьинский участок; 2) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Воронцовский участок.

По перечисленным кластерам и соответствующим им лесным участкам сформулированы следующие выводы в рамках промежуточного этапа.

Кластер 1 (Карпинское лесничество, Кытлымское участковое лесничество, Тыпыльский участок; Новолялинское лесничество, Старолялинское участковое лесничество, Старолялинский участок): требуется проектирование и строительство лесовозных дорог (магистралей, веток и усов), а также обустройство промышленных площадок.

Кластер 2 (Новолялинское лесничество, Отвинское участковое лесничество, Новоселовский

участок) требуется проектирование и строительство лесовозных дорог (возможно, только усов с организацией двухступенчатой вывозки), а также обустройство промышленных площадок.

Кластер 3 (Егоршинское лесничество, Лебединское участковое лесничество, Лебединский участок; Егоршинское лесничество, Артемовское участковое лесничество, урочище АОЗТ «Согра») целесообразно строительство лесовозных усов с вывозкой круглыми лесоматериалами к площадке, совмещенной с промышленной площадкой для кластера третий (а), примыкающей к железной или автомобильной дороге. На промышленной площадке рекомендуется вести переработку низкокачественной древесины на щепу с вывозкой сменными прицепами щеповозов.

По третьему (а) (Егоршинское лесничество, Красногвардейское участковое лесничество, Красногвардейский участок) рекомендуется строительство лесовозных усов с вывозкой круглыми лесоматериалами к площадке, примыкающей к железной или автомобильной дороге с обустройством площадки для кластера третий (а) и использованием сменных прицепов щеповозов.

По третьему (б) (Верхотурское лесничество, Нижнетуринское участковое лесничество, Исовский участок; Верхотурское лесничество, Нижнетуринское участковое лесничество, Нижнетуринский участок) рекомендуется использование существующих транспортных путей и площадок в местах разгрузки круглых лесоматериалов в Нижней или Новой Туре, а также обустройство

двух площадок, строительство лесовозных усов, возможно, использование сменных прицепов щеповозов. Для Ступинского участка Верхотурского лесничества, Ступинского участкового лесничества рекомендуется строительство лесовозных усов с вывозкой круглыми лесоматериалами (часть) к площадке в Новоселовском участке Ново-Лялинского лесничества. Возможна прямая вывозка (часть) в Верхотурье на промышленную площадку, однако в этом случае необходимо строительство л/в магистрали и веток. Для этого же кластера, но Каменского участка, Новолялинского лесничества, Павдинского участкового лесничества рекомендуется проектирование и строительство лесовозных дорог (возможно, только усов с организацией двухступенчатой вывозки), а также вывозка первой ступенью на промышленные площадки, часть на площадку Кытлымского участка, часть Павдинского (детально см. в работах [16, 22]).

Приведенный фрагмент заключения по результатам кластерного анализа характеризует возможность адекватного применения этого подхода, определяет множество локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных недвижимых объектов, включая промышленные площадки как производное от множеств лесных участков при заданном множестве системы машин.

По остальным кластерам следуют аналогичные конкретизированные заключения о координатах размещения промышленных площадок, строительстве или нецелесообразности строительства дорог с использованием существующей инфраструктуры и отгрузкой продукции с площадок без двухступенчатой вывозки.

## Выводы

Известные подходы к типизации объектов лесного комплекса характеризуются отсутствием локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных множеств недвижимых объектов в виде лесных дорог, промышленных площадок и других объектов, размещаемых на арендуемых лесных участках, для выполнения транспортных, погрузочно-разгрузочных, обрабатывающих и информационных функций. В связи с отсутствием данных множеств конечный результат типизации ограничивает системность и оптимизацию систем лесного комплекса.

Системное описание в полной мере обеспечивается разработанной модифицированной методикой, которая отличается от известных методик созданием, включением и объединением локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных множеств недвижимых объектов, а также параметрически заданными системой лесных машин и множествами лесных участков. Локальные обрабатывающие транспортно-перегрузочные

множества недвижимых объектов лесного комплекса рассматриваются, как производное множество (множество пересечения) от множеств лесных участков при заданном множестве системы машин.

Практическая значимость разработанной методики и ее практическое приложение к условиям инвестпроекта и арендованных лесных участков ООО «Синергия» заключаются в получении конечного результата в виде рекомендаций по рациональным множествам лесных дорог, оптимально размещенным промышленным площадкам и другим объектам для транспортных, погрузочно-разгрузочных, обрабатывающих и информационных функций, реализуемых на арендуемых лесных участках.

## Список литературы

- [1] Обыденников В.И., Кожухов Н.И., Коротков С.А. Актуальные проблемы отечественной лесной типологии // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 2. с. 5–11. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-2-5-11
- [2] Сукачев В.Н. Избранные труды. Т. I. Л.: Наука, 1972. 420 с.
- [3] Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесная пром-сть, 1980. 497 с.
- [4] Барановский В.А., Некрасов Р.М. Системы машин для лесозаготовок/ В.А. Барановский. М.: Лесная пром-сть, 1977. 248 с.
- [5] Захариков В.М. Определение эффективных систем машин лесосечных работ на расчетных и оптимизационных моделях // Сб. науч. трудов Московского лесотехнического института, 1981. № 118. С. 5–8.
- [6] Типизация природно-производственных условий лесозаготовительных районов: рекомендации. Химки: Изд-во ЦНИИМЭ, 1986. 23 с.
- [7] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Выбор систем заготовки древесины в условиях неопределенности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2008. № 185. С. 263–268.
- [8] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Синхронизация обрабатывающе-транспортных систем заготовки и первичной обработки древесины: монография. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского государственного технического университета, 2011. 201 с.
- [9] 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.
- [10] Казаков Н.В., Рябухин П.Б., Садетдинов М.А. Метод типизации лесного фонда // Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2013. № 10. С. 157–161.
- [11] Якимович С.Б., Ефимов Ю.В. Оценка эффективности систем машин и харвестерных агрегатов для заготовки древесины по фундаментальному критерию технолога — удельной энергоёмкости // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 1. С. 59–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-1-59-68
- [12] Шегельман И.Р., Будник П.В. Типизация лесных территорий по природно-производственным условиям на основе кластерного анализа // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 1. С. 120–137. DOI: 10.17238/issn0536-1036

- [13] 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. DOI: 10.17513/use.36908
- [14] Якимович С.Б. Методика типизации и выделения однородных совмещенных множеств объектов лесного комплекса / RusForest 2022: I Ежегодная междунар. науч.-практ. конф. «Устойчивое и инновационное развитие лесопромышленного комплекса», Екатеринбург, 03–04 февраля 2022. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2022. URL: <https://disk.yandex.ru/d/gDEnugXlzCWmJw>
- [15] Постановление Правительства Российской Федерации от 06.12.2021 № 2214. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/000120211210000>.
- [16] Обоснование технологических процессов переработки низкосортных круглых лесоматериалов, не подлежащих переработке на фанеру и экспортные пиломатериалы на предприятиях ООО «Синергия»: Отчет о НИР (Договор № Н-74/2021 от 22.10.2021 года). Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного лесотехнического университета, 2021. 130 с.
- [17] Влияние природных и антропогенных факторов на лесные экосистемы и пути минимизации отрицательного воздействия техногенеза : отчет о НИР (промежуточный): FEUG-2020-0013 Экологические аспекты рационального природопользования. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного лесотехнического университета, 2020. 130 с.
- [18] Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- [19] Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
- [20] Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 656 с.
- [21] ООО «Синергия», «Создание высокотехнологичного деревообрабатывающего производства на территории Свердловской области». Екатеринбург: 2022. URL: <https://mpr.midural.ru/deyatelnost/investprojects/investproekty/siner-gia.php>
- [22] Лесохозяйственные регламенты 31 лесничества Свердловской области, утвержденные приказом Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области от 10.12.2020 № 1720 «О внесении изменений в Лесохозяйственные регламенты лесничеств Свердловской области». Екатеринбург, 2022. URL: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/10187>
- [23] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1980. 976 с.
- [24] Боровиков В.П. Программа STATISTICA для студентов и инженеров. М.: КомпьютерПресс, 2001. 299 с.
- [25] Кириллов В.И. Квалиметрия и системный анализ. М.: ИНФРА-М, Новое знание, 2011. 440 с.

## Сведения об авторах

**Якимович Сергей Борисович**✉ — д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», [yakimovichsb@m.usfeu.ru](mailto:yakimovichsb@m.usfeu.ru)

**Мехренцев Андрей Вениаминович** — канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», [mehrentsevav@m.usfeu.ru](mailto:mehrentsevav@m.usfeu.ru)

Поступила в редакцию 14.11.2022.

Одобрено после рецензирования 28.11.2022.

Принята к публикации 21.03.2023.

# FACTOR SETS TYPIFICATION OF FOREST COMPLEX OBJECTS AND PRE-PROJECT PLACEMENT JUSTIFICATION

S.B. Yakimovich✉, A.V. Mehrentsev

Ural State Forestry University, 37, Sibirskiy trakt st., 620100, Ekaterinburg, Russia

yakimovichsb@m.usfeu.ru

The article provides a critical analysis of well-known works on the typification in the forest complex and the allocation of homogeneous sets based on cluster analysis. The typification of natural production conditions and parametrically known system of forest machines on the one hand and the absence of a derived set of real objects such as forest roads, industrial facility sites and other objects located on leased forest plots on the other hand is formulated. The efficiency of wood harvesting is determined on the basis of modifying the methodology of rational unification (intersection) and typification of sets of natural production conditions in forest areas, a well-known system of machines for harvesting and transporting timber, as well as recommendations for a rational set of forest roads, industrial sites and other objects for transport, loading and unloading, processing and information functions implemented on leased forest plots. Modification and practical industrial approbation of the technique, which differs from the well-known ones by including local processing transport and transshipment sets of local objects of the forest complex, a parametrically specified system of forest machines, as well as sets of forest plots, are carried out. The final result was obtained in the form of recommendations on rational sets of forest roads, the placement of industrial sites and other objects for transport, loading and unloading and processing functions implemented on leased forest plots.

**Keywords:** forest areas, derived set of local objects, natural production conditions, clustering

**Suggested citation:** Yakimovich S.B., Mehrentsev A.V. *Tipizatsiya faktornykh mnozhestv ob'ektov lesnogo kompleksa i predproektnoe obosnovanie ikh razmeshcheniya* [Factor sets typification of forest complex objects and pre-project placement justification]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 114–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-114-125

## References

- [1] Obydyonnikov V.I., Kozhukhov N.I., Korotkov S.A. *Aktual'nye problemy otechestvennoy lesnoy tipologii* [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
- [2] Sukachev V.N. *Izbrannye trudy* [Selected Works]. Leningrad: Nauka, 1972, 420 p.
- [3] Melekhov I.S. *Lesovedenie* [Forest Science]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1980, 497 p.
- [4] Baranovsky V.A., Nekrasov R.M. *Sistemy mashin dlja lesozagotovok* [Systems of machines for logging]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1977, 248 p.
- [5] Zakharikov, V.M. *Opreделение эффективных систем машин лесосечных работ на расчетных и оптимизационных моделях* [Determination of effective systems of cutting machines on even and optimization models]. Sb. nauchn. tr. Moskovskogo lesotekhnicheskogo instituta [Collection of scientific tr. of the Moscow Forestry Institute], 1981, no. 118, pp. 5–8.
- [6] *Tipizatsiya prirodno-proizvodstvennykh usloviy lesozagotovitel'nykh rayonov: rekomendatsii* [Typification of natural production conditions of logging areas: recommendations]. Khimki: TSNIIME, 1986, 23 p.
- [7] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Vybor sistem zagotovki drevesiny v usloviyakh neopredelennosti* [The choice of wood harvesting systems in conditions of uncertainty]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2008, no. 185, pp. 263–268.
- [8] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Sinkhronizatsiya obrabatyvayushche-transportnykh sistem zagotovki i pervichnoy obrabotki drevesiny: monografiya*. [Synchronization of processing and transport systems of harvesting and primary processing of wood: monograph]. Yoshkar-Ola: Mariyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2011, 201 p.
- [9] Ryabukhin P.B., Kazakov N.V., Burlov A.N. *Metod lesopromyshlennoy tipizatsii lesosek po prirodno-proizvodstvennykh usloviyam na primere el'nikov Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga* [Method of timber industry typification of cutting areas according to natural production conditions on the example of spruce forests of the Far Eastern Federal District]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [The system. Methods. Technologies], 2010, no. 2(6), pp. 52–57.
- [10] Kazakov N.V., Ryabukhin P.B., Sadetdinov M.A. *Metod tipizatsii lesnogo fonda* [Method of forest fund typification]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], 2013, no. 10, pp. 157–161.
- [11] Yakimovich S.B., Efimov Yu.V. *Otsenka effektivnosti sistem mashin i kharvesternykh agregatov dlya zagotovki drevesiny po fundamental'nomu kriteriyu tekhnologa — udel'noy energoemkosti* [Estimation of machinery and harvesting heads efficiency systems for preparation of wood by fundamental criteria technology — special storage density]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 59–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-1-59-68
- [12] Shegelman I.R., Budnik P.V. *Tipizatsiya lesnykh territoriy po prirodno-proizvodstvennykh usloviyam na osnove klasterного analiza* [Typification of forest territories by natural production conditions based on cluster analysis]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2021, no. 1, pp. 120–137. DOI: 10.17238/issn0536-1036
- [13] Shegelman I.R., Budnik P.V., Baklagin V.N. *Minimizatsiya tekhnogenogo vozdeystviya lesnykh mashin na ekosistemy lesov na osnove klasterizatsii prirodno-proizvodstvennykh usloviy lesozagotovok* [Minimization of technogenic impact of forest machines on forest ecosystems based on clustering of natural production conditions of logging]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science], 2018, no. 11(part 1), pp. 72–78. DOI: 10.17513/use.36908

- [14] Yakimovich S.B. *Metodika tipizatsii i vydeleniya odnorodnykh sovmeshchennykh mnozhestv ob'ektov lesnogo kompleksa* [Method of typification and allocation of homogeneous combined sets of objects of the forest complex]. RusForest 2022: I Ezhegodnaya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Ustoychivoe i innovatsionnoe razvitiye lesopromyshlennogo kompleksa» [I Annual International scientific and Practical Conference «Sustainable and innovative development of the agricultural complex»]. Yekaterinburg: UGLTU, 2022. Available at: <https://disk.yandex.ru/d/gDENugXlzCWmJw> (accessed 15.09.2022).
- [15] *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 06.12.2021 № 2214* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 2214 dated 06.12.2021. Official publication of legal acts], 2021. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/000120211210000> (accessed 15.09.2022).
- [16] *Obosnovanie tekhnologicheskikh protsessov pererabotki nizkosortnykh kruglykh lesoma-terialov, ne podlezhashchikh pererabotke na faneru i eksportnye pilomaterialy na predpri-yatiyakh OOO «Sinergiya»: Otchet o NIR (Dogovor № N-74/2021 ot 22.10.2021 goda)* [Substantiation of technological processes for processing low-grade round timber that cannot be processed into plywood and export lumber at the enterprises of Synergy LLC: Research report (Contract No. N-74/2021 dated 10.22.2021)]. Yekaterinburg: Ural State Forestry University, 2021, 130 p.
- [17] *Vliyaniye prirodnykh i antropogennykh faktorov na lesnye ekosistemy i puti minimizatsii otritsatel'nogo vozdeystviya tekhnogenezha: otchet o NIR (promezhutochnyy): FEUG-2020-0013* *Ekologicheskie aspekty ratsional'nogo prirodopol'zovaniya* [The influence of natural and anthropogenic factors on forest ecosystems and ways to minimize the negative impact of technogenesis : research report (interim): FEUG-2020-0013 Ecological aspects of rational nature management]. Yekaterinburg: Ural State Forestry University, 2020, 130 p.
- [18] Kim J.-O., Muller C.W., Klekka W.R. *Faktornyy, diskriminantnyy i klasternyy analiz* [Factorial, discriminant and cluster analysis]. Moscow: Finance and Statistics, 1989, 215 p.
- [19] Zadeh L.A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [The concept of a linguistic variable and its application to making immediate decisions]. Moscow: Mir, 1976, 165 p.
- [20] Borovikov V.P. *STATISTICA: iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere. Dlya professionalov* [STATISTICA: the art of data analysis on a computer. For professionals]. St. Petersburg: Peter, 2001, 656 p.
- [21] OOO «Sinergiya», «Sozdanie vysokotekhnologichnogo derevoobrabatyvayushchego proizvodstva na territorii Sverdlovskoy oblasti» [Synergy LLC, «Creation of high-tech woodworking production in the territory of the Sverdlovsk region». Yekaterinburg, 2022. Available at: <https://mpr.midural.ru/deyatelnost/investprojects/investproekty/siner-gia.php> (accessed 15.09.2022).
- [22] *Lesokhozyaystvennye reglamenti 31 lesnichestva sverdlovskoy oblasti, utverzhdennye prikazom Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Sverdlovskoy oblasti ot 10.12.2020 № 1720 «O vnesenii izmeneniy v Lesokhozyaystvennye reglamenti lesnichestv Sverdlovskoy oblasti»* [Forestry regulations of the 31 forestry districts of the sverdlovsk region, approved by the Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Sverdlovsk Region dated 10.12.2020 No. 1720 «On Amendments to the Forestry Regulations of the Forestry districts of the Sverdlovsk Region»]. Yekaterinburg, 2022. Available at: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/10187> (accessed 15.09.2022).
- [23] Bronstein I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions]. Moscow: Nauka [Science], 1980, 976 p.
- [24] Borovikov V.P. *Programma STATISTICA dlya studentov i inzhenerov* [Program STATISTICA for students and engineers]. Moscow: ComputerPress, 2001, 299 p.
- [25] Kirillov V.I. *Kvalimetriya i sistemnyy analiz* [Qualimetry and system analysis]. Moscow: INFRA-M, Novoe znanie [New Knowledge], 2011, 440 p.

## Authors' information

**Yakimovich Sergey Borisovich** ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Technology and Equipment of Forestry Production of the Ural State Forestry University, [yakimovichsb@m.usfeu.ru](mailto:yakimovichsb@m.usfeu.ru)

**Mehrentsev Andrey Veniaminovich** — Cand. Sci. (Tech.), Head of the Department of Technology and Equipment of Forestry Production of the Ural State Forestry University, [mehrentsevav@m.usfeu.ru](mailto:mehrentsevav@m.usfeu.ru)

Received 14.11.2022.

Approved after review 28.11.2022.

Accepted for publication 21.03.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest