

Обоснование технологии заготовки реставрационных сортиментов

Т.А. Гаврилов^a, В.С. Сюнёв^b

Петрозаводский государственный университет, пр-кт Ленина, 33, Петрозаводск, Россия

^a gavrilov@petsru.ru, ^b siounev@petsru.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-3671-0971>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>

Статья поступила 22.12.2025, принята 27.01.2026

Статья посвящена актуальному вопросу заготовки лесоматериалов для реставрации памятников деревянной архитектуры. Приведён обзор существующих технологий заготовки лесоматериалов. Проанализированы требования, предъявляемые к лесоматериалам, применяемым при реставрации памятников деревянной архитектуры (реставрационным сортиментам). Определены отличительные особенности их заготовки, к которым относятся: дефицит лесоматериалов, соответствующих характеристикам исторических элементов; удалённость и неравномерность распределения подходящих лесоматериалов по большим территориям; малые объёмы заготовки; нестандартные большие диаметры и длины сортиментов; большой вес сортиментов; высокие требования к качеству реставрационных сортиментов. Анализ литературы показал, что в настоящее время отсутствует научно-обоснованная технология заготовки реставрационных сортиментов, учитывающая указанные выше отличительные особенности. Лесозаготовительные организации для заготовки реставрационных сортиментов применяют технологии и системы машин для «обычных» сортиментов, что ведёт к большой трудоёмкости, высокой стоимости, низкой технико-экономической эффективности заготовки и вынужденному снижению качества реставрационных сортиментов. В связи с чем целью исследования является обоснование технологии заготовки реставрационных сортиментов и системы машин для её функционирования. Предложены модели технологии заготовки реставрационных сортиментов, объекта заготовки, технологических операций и их взаимосвязей. Для моделирования применён теоретико-множественный подход, позволяющий описать компоненты технологии реставрационных сортиментов и наглядно представить их взаимосвязи в виде блок-схемы. В ходе исследования обоснованы вид рубок, технологические операции заготовки реставрационных сортиментов и системы машин для их заготовки. Предложена технология заготовки реставрационных сортиментов, состоящая из отбора и клеймения деревьев, соответствующих требованиям к реставрационным сортиментам, их валки, очистки от сучков и раскряжёвки на реставрационные сортименты бензопилой на лесосеке, трелёвки реставрационных сортиментов на верхний склад мини-трактором (мини-трелёвщиком) с прицепом и захватом, может также использоваться конная трелёвка. Приведён анализ предложенной технологии заготовки реставрационных сортиментов по различным критериям эффективности: качеству заготавливаемых реставрационных сортиментов, экономической эффективности заготовки, воздействию на окружающую среду, безопасности и комфортности условий труда.

Ключевые слова: заготовка лесоматериалов; выборочные рубки; реставрационные сортименты; памятники деревянной архитектуры.

Justification of the technology for harvesting restoration assortments

T.A. Gavrilov^a, V.S. Syunev^b

Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia

^a gavrilov@petsru.ru, ^b siounev@petsru.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-3671-0971>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>

Received 22.12.2025, accepted 27.01.2026

The article is devoted to the topical issue of timber procurement for restoration of wooden architectural monuments. An overview of existing timber procurement technologies is given. The requirements for timber used in restoration of wooden architectural monuments (restoration assortments) are analyzed. Distinctive features of their procurement are determined, which include: shortage of timber corresponding to the characteristics of historical elements; remoteness and uneven distribution of suitable timber over large areas; small procurement volumes; non-standard large diameters and lengths of assortments; large weight of assortments; high requirements for the quality of restoration assortments. The analysis of the literature shows that at present there is no scientifically based technology for procurement of restoration assortments that takes into account the above distinctive features. Logging organizations use technologies and machine systems for "ordinary" assortments to procure restoration assortments, which leads to high labor intensity, high cost, low technical and economic efficiency of procurement and forced reduction in the quality of restoration assortments. In this regard, the aim of the study is to substantiate the technology of procurement of restoration assortments and the system of machines for its functioning. Models of the technology of procurement of restoration assortments, the object of procurement, technological operations and their interrelations are proposed. For modeling, a set-theoretic approach is used, which allows describing the components of the technology of procurement of restoration assortments and clearly presenting their interrelations in the form of a block diagram. In the course of the study, the type of felling, technological operations of procurement of restoration assortments and the system of machines for their procurement are substantiated. The proposed technology for harvesting restoration assortments consists of selecting and marking trees that meet the requirements for restoration assortments, felling them, cleaning them from branches and cutting them into restoration assortments with a chainsaw in the felling area, skidding the restoration assortments to the upper warehouse with a mini-tractor

(mini-skidder) with a trailer and a grapple, horse skidding can also be used. The analysis of the proposed technology for harvesting restoration assortments is given according to various efficiency criteria: quality of the harvested restoration assortments, economic efficiency of harvesting, impact on the environment, safety and comfort of working conditions.

Keywords: timber harvesting; selective logging; restoration assortments; wooden architecture monuments.

Введение. Исторически в России, особенно в её северных регионах, основным строительным материалом являлась древесина. Это обусловлено доступностью и возобновляемостью лесоматериалов, высокой прочностью и теплозащитными свойствами древесины, а также легкостью её обработки. Из древесины строили жилища, храмы, крепостные стены, башни, мосты, набережные и др. [1, 2]. Многие сохранившиеся до наших дней исторические постройки из древесины имеют важное культурное значение и отнесены к памятникам деревянной архитектуры и объектам культурного наследия России.

Недостатком древесины является то, что в процессе эксплуатации она подвергается биоразрушениям. Основной причиной биоразрушений древесины является жизнедеятельность дереворазрушающих грибов и насекомых [3–5], которые образуют в древесине пустоты и неоднородности, и ведут к полной или частичной утрате памятников деревянной архитектуры. Так, за последние 50 лет утрачено 30 % существующих памятников деревянной архитектуры [6].

Основным видом работ по сохранению памятников деревянной архитектуры является их реставрация [6]. В ходе реставрации разрушенные элементы памятников заменяются на новые, при этом учитывается принцип идентичности нового элемента историческому.

Традиционно в России качеству материалов для деревянного строительства уделялось особое внимание, так как от этого зависела долговечность объекта [6]. Для строительства выбирались лесоматериалы хвойных пород (в основном сосна) без дефектов, с высокой плотностью, больших диаметров и длин. Причем заготовка лесоматериалов выполнялась в зимний период, когда сокодвижение практически отсутствует. Так, например, при строительстве Преображенской церкви (о. Кижы, Республика Карелия) применялись бревна длиной до 12 м и диаметром до 32 см [7]. В соответствии с действующими регламентами, при реставрации для изготовления новых элементов памятников деревянной архитектуры применяются реставрационные сортаменты, соответствующие по основным характеристикам историческим элементам, подлежащим замене. К основным характеристикам реставрационных сортаментов можно отнести:

- физико-механические свойства древесины (высокая плотность и прочность);
- порода древесины (сосна, ель, дуб);
- геометрические характеристики сортаментов (большие диаметры и длины);
- дефекты древесины (отсутствие биоразрушений, механических повреждений, низкая кривизна сортаментов);
- возраст деревьев (близкий к возрасту заменяемого исторического элемента);
- условия произрастания деревьев (достаточно высокая плодородность, умеренная влажность и кислотность почвы, хорошая освещённость);

- время года заготовки (зимний период).

Принимая во внимание лесотехнические аспекты и анализируя требования к характеристикам реставрационных сортаментов, можно выделить следующие отличительные особенности заготовки реставрационных сортаментов в сравнении с заготовкой «обычных» сортаментов (ГОСТ 9463-2016. Межгосударственный стандарт. Лесоматериалы круглые хвойных пород. Технические условия (введён в действие Приказом Росстандарта от 30.09.2016 № 1255-ст)) в виде строительных брёвен:

- дефицит лесоматериалов, соответствующих характеристикам исторических элементов;
- удалённость и неравномерность распределения подходящих лесоматериалов по большим территориям;
- малые объёмы заготовки;
- нестандартные большие диаметры и длины сортаментов;
- большой вес сортаментов;
- высокие требования к качеству реставрационных сортаментов;
- заготовка лесоматериалов в зимний период.

К сожалению, в настоящее время не существует научно-обоснованной технологии заготовки реставрационных сортаментов, учитывающей указанные выше отличительные особенности их заготовки. Лесозаготовительные организации для заготовки реставрационных сортаментов применяют технологии и системы машин для «обычных» сортаментов, что ведёт к большой трудоёмкости, высокой стоимости, низкой технико-экономической эффективности заготовки и вынужденному снижению качества реставрационных сортаментов. Так, например, при заготовке реставрационных сортаментов для реставрации Преображенской церкви (о. Кижы, Республика Карелия) была применена традиционная сортиментная механизированная технология заготовки [7].

В настоящее время заготовка «обычных» сортаментов ведётся по различным технологиям [8, 9, 10, 11, 12], наиболее распространёнными из которых являются:

- хлыстовая механизированная технология, включающая в себя валку деревьев бензопилой, обрезку (обрубку) сучьев бензопилой (топором), трелёвку чокерным трелёвочным трактором;
- хлыстовая механизированная технология, включающая в себя валку деревьев и формирование из них пачек валочно-пакетирующей машиной, трелёвку пачек деревьев скиддером, обрезку сучьев и раскряжёвку на сортаменты сучкорезно-раскряжёвочной машиной;
- сортиментная механизированная технология, включающая в себя валку деревьев, обрезку сучьев и раскряжёвку на сортаменты бензопилой, трелёвку форвардером;
- сортиментная механизированная технология, включающая в себя валку деревьев, обрезку сучьев и раскряжёвку на сортаменты харвестером, трелёвку форвардером;

– деревьями, механизированная технология, включающая в себя валку деревьев бензопилой, трелёвку чокерным трелёвочным трактором;

– деревьями, машинизированная технология, включающей в себя валку деревьев валочно-пакетирующей машиной, трелёвку скиддером.

Каждая из перечисленных технологий заготовки древесины имеет как свои достоинства, так и недостатки, подробный анализ которых описан в работах [8, 10, 13]. Эффективность технологии и системы машин зависит от множества факторов, таких как: вид рубок, природно-производственные условия, тип применяемых машин и механизмов, объём заготовки и др.

Так, например, при малообъёмных заготовках древесины предлагается применять механизированную технологию заготовки деревьями [14, 15] – валка деревьев осуществляется универсальными бензиномоторными пилами, трелёвка чокерной трелёвочной машиной, перемещение на верхний склад и штабелёвку трактором с погрузочным оборудованием и бревнозахватом, обрезку сучьев сучкорезной машиной, раскряжёвку на сортименты универсальными бензиномоторными пилами. Может также применяться машинизированная технология заготовки деревьями – валка осуществляется гусеничным экскаватором, трелёвка бесчокерным трелёвочным трактором с манипулятором и кониковым зажимным устройством или трелёвочным трактором с кониковым зажимным устройством увеличенного объёма без манипулятора, обрезку сучьев делимбером или процессором, раскряжёвку на сортименты универсальными бензиномоторными пилами.

При рубках ухода слабой и очень слабой интенсивности, а также при рубках семенных деревьев и выборочных санитарных рубках рекомендуется механизированная сортиментная технология заготовки с применением бензомоторной пилы и мини-трактора – валка, обрезка сучьев и раскряжёвка, осуществляется бензопилой, а подбор и подтрелёвка заготовленных сортиментов к пасечному волоку или другим местам складирования мини-трактором [16, 17, 18].

При заготовке древесины в смешанных насаждениях с низким классом товарности рекомендуются модернизированные сортиментная и хлыстовая машинизированные технологии [19]. Сортиментная технология осуществляется с подсортировкой древесины по размерно-качественным характеристикам – валка деревьев осуществляется харвестером, далее в зависимости от качества и породы дерева, харвестер производит его обработку по определённой технологической схеме. Если деревья, подходят по своим характеристикам для производства пиловочника, то обрезка сучьев и раскряжёвка на сортименты осуществляется харвестером, трелёвка форвардером. Если деревья, подходят по своим характеристикам только для производства балансов и топливной древесины, то обрезка сучьев и раскряжёвка на сортименты осуществляется харвестером, далее отрезанные части деревьев укладываются пачками в формирующе-транспортный модуль и осуществляется их трелёвка форвардером, раскряжёвка пачек на балансы и штабелёвка погрузчиком перекидного типа со смонтированной на нём установкой для пачковой раскряжёвки. Хлыстовая технология осуществляется

с подсортировкой древесины по размерно-качественным характеристикам – валка деревьев осуществляется валочно-пакетирующей машиной, далее в зависимости от качества и породы дерева, валочно-пакетирующая машина производит его обработку по определённой технологической схеме. Если деревья, подходят по своим характеристикам для производства пиловочника, то укладка в пачки осуществляется валочно-пакетирующей машиной, обрезка сучьев и раскряжёвка процессором. Если деревья подходят по своим характеристикам только для производства балансов и топливной древесины, то деревья укладываются пачками в формирующе-транспортный модуль и осуществляется их трелёвка скиддером, обрезка сучьев осуществляется процессором, раскряжёвка стационарной установки для пачковой раскряжёвки.

Для рубок промежуточного пользования на труднодоступных территориях и на особо охраняемых природных территориях предложена технология заготовки с использованием аэростатно-канатных систем [20, 21] – обрезка сучьев осуществляется захватно-срезающим устройством аэростата, фиксация и удержание дерева грузозахватным механизмом аэростата, валка дерева бензопилой вальщика, подъём и трелёвка лебёдкой аэростата.

При выборочных рубках рекомендуется сортиментная машинизированная двухэтапная технология [22]. Первый этап включает: наводку харвестерной головки на ствол дерева, его захват в комлевой части, перемещение харвестерной головки по стоящему дереву с одновременной обрезкой сучьев на высоте в пределах технических возможностей манипулятора, спиливание оставшейся части дерева, обрезку на ней сучьев и раскряжёвку на сортименты. На втором этапе производится повторная наводка харвестерной головки на оставшуюся комлеву часть («пень»), спиливание, столкновение с пня и раскряжёвку на сортименты. Далее сортименты транспортируются форвардером.

При заготовке лесоматериалов на лесных плантациях рекомендуется хлыстовая и сортиментная механизированные технологии [23, 24]. При хлыстовой технологии валка осуществляется бензопилой слева, и справа от полосы междурядья шириной. Причём деревья укладываются к оси междурядья под определёнными углами. Обрезка сучьев осуществляется также бензопилой, при этом моторист бензопилы складывает их на полосу по ширине волока. Трелёвка осуществляется чокерным трелёвочным трактором. При сортиментной технологии валка деревьев осуществляется бензопилой слева и справа от широкого междурядья вершиной в направлении, противоположном направлению трелёвки. Обрезка сучьев осуществляется также бензопилой, при этом моторист бензопилы складывает их на волок и выполняет раскряжёвку хлыстов на сортименты. Трелёвка осуществляется форвардером. Движение форвардера вглубь пасеки предусматривает сначала расчистку волока отвалом машины с перемещением впередилежащих сортиментов в сторону узких полос с двухрядным размещением лесных культур и последующим сбором и трелёвкой перемещённых таким образом сортиментов в погрузённом положении.

При заготовке древесины в условиях горных лесосек рекомендуются традиционные хлыстовая и сортиментная механизированные технологии, дополненные самоходными лебёдками, которые удерживают и перемещают лесные машины по склонам [25, 26, 27]. Также применяются хлыстовая и сортиментная механизированные технологии, дополненные канатными трелёвочными установками или канатными трелёвочно-сучкорезно-раскряжёвочными машинами, которые трелюют деревья со склонов [25, 28].

Отсутствие научно-обоснованной технологии заготовки реставрационных сортиментов, учитывающей отличительные особенности их заготовки, является существенной проблемой. В связи с чем очевидна острая потребность в разработке научно-обоснованной технологии заготовки реставрационных сортиментов и системы машин для её функционирования, учитывающей все особенности заготовки реставрационных сортиментов, и позволяющей повысить эффективность лесозаготовительного производства в данном направлении.

Целью исследования является обоснование технологии заготовки реставрационных сортиментов и системы машин для её функционирования.

Заготовка реставрационных сортиментов ведётся на основании технического задания, получаемого от организации, занимающейся реставрацией памятников деревянной архитектуры, которая выступает в роли заказчика, а лесозаготовительная организация в роли исполнителя. В техническом задании указываются в сводной спецификации конкретные размеры (диаметр и длина) каждого из реставрационных сортиментов, которые представляют собой штучный уникальный товар.

Выбор вида рубок при заготовке реставрационных сортиментов. Обоснование технологии заготовки реставрационных сортиментов начнём с определения планируемого вида рубок. В соответствии с существующей классификацией (Приказ от 1 декабря 2020 года № 993 Об утверждении Правил заготовки древесины и особенностей заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации (с изменениями на 17 октября 2022 года)) заготовка древесины может осуществляться по следующим видам – сплошные, постепенные и выборочные рубки. При этом выборочные рубки классифицируются по объёму вырубленной древесины за один приём (интенсивности рубки) на следующие виды: очень слабой интенсивности – объём вырубленной древесины до 10 % от общего запаса; слабой интенсивности 11–20 %; умеренной интенсивности – 21–30 %; умеренно высокой интенсивности – 31–40 %; высокой интенсивности – 41–50 %; очень высокой интенсивности – 61–70 %. Также рубки делят на рубки спелых, перестойных лесных насаждений; рубки средневозрастных, припевающих, спелых, перестойных лесных насаждений при вырубке погибших и повреждённых лесных насаждений, уходе за лесами; и рубки лесных насаждений любого возраста на лесных участках, предназначенных для строительства, реконструкции и эксплуатации объектов лесной и лесоперерабатывающей инфраструктуры. На основании перечисленных отличительных особенностей заготовки реставрационных сортиментов данная заготовка относится к выборочным рубкам

очень слабой интенсивности спелых и перестойных лесных насаждений.

Моделирование технологических операций по заготовке реставрационных сортиментов. Определив вид рубок, перейдём к выбору технологических операций, из которых будет состоять технология заготовки реставрационных сортиментов. Наиболее распространёнными операциями при заготовке древесины являются валка, пакетирование, трелёвка, очистка от сучьев, сортировка, раскряжёвка, штабелёвка, дробление, лесопиление, погрузка. Состав и порядок технологических операций зависят от различных факторов, например, таких как почвенно-грунтовые условия, наличие на лесосеке жизнеспособного подроста хозяйственно ценных пород и его размеров, крупномерность насаждения, место выполнения операций, состав системы лесосечных машин и др. [10]. Обычно первой технологической операцией выбирается валка, но учитывая описанные отличительные особенности заготовки реставрационных сортиментов перед операцией валки необходимо осуществить операцию отбора и клеймения деревьев, которая является основополагающей всей технологии, т. к. главным фактором выбора операций является соответствие деревьев характеристикам реставрационных сортиментов. После валки, опять же ввиду перечисленных отличительных особенностей заготовки реставрационных сортиментов, необходимо осуществить очистку от сучьев, раскряжёвку на сортименты и их трелёвку.

На первой стадии моделирования предлагается использовать элементы теории множеств для формального описания технологии заготовки реставрационных сортиментов, их характеристик, состава и порядка технологических операций. Адаптируя к нашей задаче теоретико-множественный подход, рассмотренный в работах [30, 31, 32], на самом верхнем уровне модель технологии заготовки реставрационных сортиментов, включающую характеристики реставрационных сортиментов, состав и порядок выбранных технологических операций, и их взаимосвязи опишем кортежем (1), (который можно понимать, как специализированный список):

$$Z = \langle O, T, B \rangle, \quad (1)$$

где O – объект заготовки; T – технологические операции по заготовке реставрационных сортиментов; B – взаимосвязи между объектом заготовки и технологическими операциями по заготовке реставрационных сортиментов.

Проведём декомпозицию компонентов модели технологии заготовки реставрационных сортиментов (1).

Объект заготовки опишем кортежем (2):

$$O = \langle OO, OC, OC, OM \rangle, \quad (2)$$

где OO – наименование и описание объекта заготовки (объектом заготовки являются реставрационные сортименты из определённой породы древесины – сосны, ели или дуба, характеризующиеся высокими физико-механическими свойствами – плотностью и прочностью, без пороков древесины, т. е. без биоразрушений,

механических повреждений и низкой кривизны, а также имеющими большие геометрические характеристики – диаметры и длины сортиментов в соответствии с ГОСТ 9463-2016. Межгосударственный стандарт. Лесоматериалы круглые хвойных пород. Технические условия (введён в действие Приказом Росстандарта от 30.09.2016 № 1255-ст). Реставрационные сортименты относятся к 1 сорту – первоклассные лесоматериалы круглые); *ОС* – наименование и описание субъекта заготовки (субъектом заготовки являются лесозаготовительные предприятия и специализированные организации, занимающиеся реставрацией памятников деревянной архитектуры); *ОЦ* – цель и задачи заготовки, определяющие назначение технологии и её целевое использование (целями и задачами заготовки является получение реставрационных сортиментов идентичных разрушенным заменяемым историческим элементам для реставрации памятников деревянной архитектуры); *ОМ* – модель объекта заготовки (объект заготовки, реставрационные сортименты, смоделируем в виде цилиндрических анизотропных тел с диаметром d_d , длиной l_d , плотностью древесины ρ_d , и плотностью их распределения на участке леса n_{PC}).

Технологические операции по заготовке реставрационных сортиментов опишем кортежем (3):

$$T = \langle TK, TB, TO, TP, TT \rangle, \quad (3)$$

где *TK* – операция отбора и клеймения деревьев, соответствующих требованиям к реставрационным сортиментам; *TB* – операция валки деревьев; *TO* – операция очистки деревьев от сучков; *TP* – операция раскряжёвки хлыстов на реставрационные сортименты; *TT* – операция трелёвки реставрационных сортиментов.

Проведём декомпозицию компонентов модели технологических операций по заготовке реставрационных сортиментов (3).

Учитывая описанные отличительные особенности заготовки реставрационных сортиментов и операцию отбора и клеймения деревьев, соответствующих требованиям к реставрационным сортиментам, предлагается осуществлять следующим образом. На основе сводной спецификации технического задания на заготовку и данных лесной таксации выявляются наиболее вероятные участки произрастания деревьев, соответствующих требованиям к реставрационным сортиментам. Далее в лесхозы Федерального агентства лесного хозяйства России, к которым относятся выявленные наиболее вероятные участки произрастания деревьев, отправляются запросы, позволяющие уточнить данные лесной таксации и локализовать подходящие участки. После чего на данные участки отправляется таксатор, который измеряет мерной вилкой и дальномером геометрические характеристики деревьев, оценивает возраст деревьев, условия произрастания и видимые пороки, а также отсутствие следов подсочки леса, лесных пожаров и проведения мелиоративных работ [7]. Ввиду сложности и многокритериальности оценки деревьев, соответствующих требованиям к реставрационным сортиментам, таксатор должен иметь высокую квали-

фикацию. Затем деревья, наиболее соответствующие требованиям к реставрационным сортиментам, маркируются и посредством GPS/GNSS приёмника фиксируются их точные географические координаты посредством глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) или системы глобального позиционирования (GPS). Для определения соответствия физико-механических свойств древесины требованиям к реставрационным сортиментам, а также наличия скрытых пороков древесины с каждого промаркированного дерева берутся керны буравом Пресслера [33, 34]. Взятые керны деревьев транспортируются в лабораторию, где осуществляется определение физико-механических свойств древесины и скрытых пороков древесины. На основании лабораторных исследований определяется соответствие каждого из промаркированных деревьев требованиям к реставрационным сортиментам и формируется окончательный перечень деревьев, отобранных для заготовки реставрационных сортиментов.

В соответствии с чем, операцию отбора и клеймения деревьев, соответствующих требованиям к реставрационным сортиментам, опишем кортежем (4):

$$TK = \langle TKX, TKM, TKP \rangle \quad (4)$$

где *TKX* – характеристики операции отбора и клеймения деревьев (место выполнения операции лесосека, лаборатория; производительность операции Q_k); *TKM* – машины и оборудования для отбора и клеймения деревьев (мерная вилка, дальномер, GPS/GNSS приемник, бурав Пресслера, лабораторное оборудование); *TKP* – квалифицированный персонал для отбора и клеймения деревьев (таксатор высокой квалификации, лаборант).

Валка деревьев заключается в отделении их стволов на уровне прикорневой шейки или выше с оставлением пня. В общем случае операцию валки деревьев можно осуществлять бензопилой, валочно-пакетирующей машиной или харвестером. При заготовке реставрационных сортиментов выбор машин и оборудования зависит от отличительных особенностей заготовки реставрационных сортиментов. В соответствии с которыми деревья, соответствующие требованиям к реставрационным сортиментам, единичны, уникальны и удалены друг от друга на большие расстояния, при этом заготавливается небольшое количество деревьев. Для валки таких деревьев валочно-пакетирующей машиной и харвестером требуется строительство дорог, что экономически не целесообразно при малом объёме заготовки, кроме того, данные машины имеют высокую производительность работы и стоимость, в связи с чем не эффективны при таком объёме заготовки. Причём использование валочно-пакетирующих машин и харвестеров является причиной многочисленных повреждений стволов и крон оставляемых деревьев, уничтожения подроста, нарушения почвенного покрова и корней [20]. При таком объёме заготовки и удалённости деревьев подходит только валка бензопилой. При валке деревьев бензопилой сначала выполняется подпил дерева посредством одного или двух резов у основания ствола со стороны направления падения дерева, далее осуществляется окончательное пиление и сталкивание

дерева путём придания дереву импульса для валки в заданном направлении с помощью различных инструментов и приспособлений.

Кроме того, к отличительным особенностям заготовки реставрационных сортиментов относятся большие диаметры деревьев. Следовательно, при валке деревьев необходимо, чтобы рабочие органы машин и оборудования обеспечивали возможность их валки. Так при валке деревьев бензопилой её возможности зависят от длины шины (a_B) и мощности двигателя (P_B). Для валки деревьев больших диаметров необходимы бензопилы с большей длиной шины и мощностью двигателя.

Также отличительными особенностями заготовки реставрационных сортиментов является удалённость и неравномерность распределения подходящих лесоматериалов по большим территориям и отсутствие дефектов древесины (т. е. не допускаются при пилении дерева сколы, отщепы, неровный распил и др.). Следовательно, для валки деревьев бензопилой потребуется один вальщик высокой квалификации и помощник вальщика.

Таким образом, операцию валки деревьев опишем кортежем (5):

$$TB = \langle TBX, TBM, TBP \rangle, \quad (5)$$

где TBX – характеристики операции валки деревьев (место выполнения операции лесосека; производительность операции Q_B); TBM – машины и оборудования для валки деревьев (профессиональная бензопила с длиной шины (a_B) и мощностью двигателя (P_B)); TBP – персонал для валки деревьев (один вальщик высокой квалификации и один помощник вальщика).

После операции валки предлагается операция очистки от сучков. Ввиду того, что при заготовке реставрационных сортиментов использование валочно-пакетирующих машин и харвестеров экономически нецелесообразно и неэффективно, операцию очистки от сучков предлагается осуществлять профессиональной бензопилой. Диаметр сучков значительно меньше диаметра деревьев, следовательно, для операции очистки от сучков необходима бензопила с меньшей длиной шины (a_0) и мощностью двигателя (P_0). Для очистки деревьев от сучков потребуется один помощник вальщика.

В соответствии с чем, операцию очистки от сучков опишем кортежем (6):

$$TO = \langle TOX, TOM, TOP \rangle, \quad (6)$$

где TOX – характеристики операции очистки от сучков (место выполнения операции лесосека; производительность операции Q_0); TOM – машины и оборудования для очистки от сучков (профессиональная бензопила с длиной шины (a_0) и мощностью двигателя (P_0)); TOP – квалифицированный персонал для очистки от сучков (один помощник вальщика).

После операции очистки от сучков предлагается операция раскряжёвки на реставрационные сортименты. Операция раскряжёвки, как и операция валки, ввиду нецелесообразности и неэффективности тяжёлой

лесозаготовительной техники, предлагается осуществлять той же профессиональной бензопилой с длиной шины ($a_P = a_B$) и мощностью двигателя ($P_P = P_B$). Операция раскряжёвки включает в себя разметку и непосредственно раскряжёвку. Каждый хлыст раскряжёвывается на реставрационные сортименты в соответствии со сводной спецификацией технического задания. Обычно длина реставрационных сортиментов от 6 до 12 м.

Как было отмечено ранее, отличительной особенностью заготовки реставрационных сортиментов является отсутствие дефектов древесины. Поэтому при раскряжёвке хлыстов не допускаются сколы, отщепы, неровный распил и др. Следовательно, для раскряжёвки хлыстов на реставрационные сортименты потребуется один вальщик высокой квалификации и помощник вальщика.

В соответствии с чем, операцию раскряжёвки на реставрационные сортименты опишем кортежем (7):

$$TP = \langle TPX, TPM, TPI \rangle, \quad (7)$$

где TPX – характеристики операции раскряжёвки на реставрационные сортименты (место выполнения операции лесосека; производительность операции Q_P); TPM – машины и оборудования для раскряжёвки на реставрационные сортименты (профессиональная бензопила с длиной шины ($a_P = a_B$) и мощностью двигателя ($P_P = P_B$)); TPI – квалифицированный персонал для раскряжёвки на реставрационные сортименты (один вальщик высокой квалификации и один помощник вальщика).

После операции раскряжёвки на реставрационные сортименты предлагается операция их трелёвки на верхний склад. В общем случае операцию трелёвки можно осуществлять чокерным трелёвочным трактором, скиддером, форвардером, мини-трактором (мини-трелёвщиком) с прицепом и захватом, лошадьми. Операция трелёвки сортиментов чокерным трелёвочным трактором, скиддером и форвардером затруднена по тем же причинам, что и при операции валки валочно-пакетирующей машиной и харвестером: потребность строительства дорог, высокая производительность работы машин, высокая стоимость машин, повреждение стволов и крон оставляемых деревьев, уничтожение подроста, нарушение почвенного покрова и корней. Для трелёвки реставрационных сортиментов, с учётом отличительных особенностей их заготовки, подходят только мини-тракторы (мини-трелёвщики) с прицепом и захватом. Вследствие того, что в соответствии с отличительными особенностями заготовки реставрационных сортиментов заготовка должна осуществляться только в зимний период, то для этих целей может использоваться конная трелёвка, распространённая в Венгрии и Мексике [35, 36]. Конная трелёвка наносит меньше вреда верхнему слою почвы, лесным насаждениям, молодым деревьям и природным ценностям, чем механизированная трелёвка лесоматериалов, поэтому она считается экологически безопасным методом трелёвки [37].

Кроме того, к отличительным особенностям заготовки реставрационных сортиментов относятся их большая длина и вес. Следовательно, при трелёвке реставрационных сортиментов необходимо, чтобы маши-

ны и оборудование обеспечивали возможность их трелёвки. Так при трелёвке реставрационных сортиментов мини-тракторами (мини-трелёвщиками) с прицепом и захватом их возможности зависят от грузоподъёмности (C_T), мощности двигателя (P_T) и длины грузового отсека (L_T). Операция трелёвки включает в себя погрузку реставрационных сортиментов и непосредственно их трелёвку. Погрузка реставрационных сортиментов в прицеп осуществляется захватом. Ввиду большой длины реставрационных сортиментов, отсутствия дорог и высоких требований к качеству реставрационных сортиментов их трелёвка до верхнего склада является сложной задачей. Следовательно, для трелёвки реставрационных сортиментов потребуется один трелёвщик высокой квалификации.

В соответствии с чем, операцию трелёвки реставрационных сортиментов опишем кортежем (8):

$$TT = \langle TTX, TTM, TTP \rangle, \quad (8)$$

где TTX – характеристики операции трелёвки реставрационных сортиментов (место выполнения операции лесосека; производительность операции Q_T); TTM – машины и оборудования для трелёвки реставрационных сортиментов (мини-трактора (мини-трелёвщики) с прицепом и захватом грузоподъёмностью (C_T), мощностью двигателя (P_T) и длиной грузового отсека (L_T)); TTP – квалифицированный персонал для трелёвки реставрационных сортиментов (один трелёвщик высокой квалификации).

Взаимосвязи между объектом заготовки и технологическими операциями по его заготовке можно описать кортежем (8):

$$B = \langle f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 \rangle, \quad (8)$$

где $Q_K = f_1(n_{PC})$ – производительность операции отбора и клеймения деревьев зависит от плотности распределения реставрационных сортиментов на участке леса; $Q_B = f_2(d_D, a_B, P_B)$ – производительность операции валки деревьев зависит от диаметра деревьев, длины шины бензопилы и мощности её двигателя; $Q_O = f_3(l_D, a_O, P_O)$ – производительность операции очистки деревьев от сучков зависит от длины деревьев, длины шины бензопилы и мощности её двигателя; $Q_P = f_4(d_D, a_P, P_P)$ – производительность операции раскряжевки хлыстов на реставрационные сортименты зависит от диаметра дерева, длины шины бензопилы и мощности её двигателя; $Q_T = f_5(d_D, l_D, \rho_D, C_T, P_T)$ – производительность операции трелёвки реставрационных сортиментов зависит от диаметра, длины и плотности древесины деревьев, грузоподъёмности мини-трактора (мини-трелёвщики) с прицепом и захватом и мощности его двигателя.

Обобщая рассмотренные отличительные особенности заготовки реставрационных сортиментов, предложенные модели технологических операций по их заготовке, взаимосвязи между технологическими операциями предлагается следующая технология заготовки

реставрационных сортиментов и систем машин для её функционирования:

- отбор и клеймения деревьев, соответствующих требованиям к реставрационным сортиментам;
- валка деревьев бензопилой на лесосеке;
- очистки деревьев от сучков бензопилой на лесосеке;
- раскряжевка хлыстов на реставрационные сортименты бензопилой на лесосеке;
- трелёвка реставрационных сортиментов на верхний склад мини-трактором (мини-трелёвщиком) с прицепом и захватом.

Блок-схема предлагаемой технологии заготовки реставрационных сортиментов представлена на рис. 1.

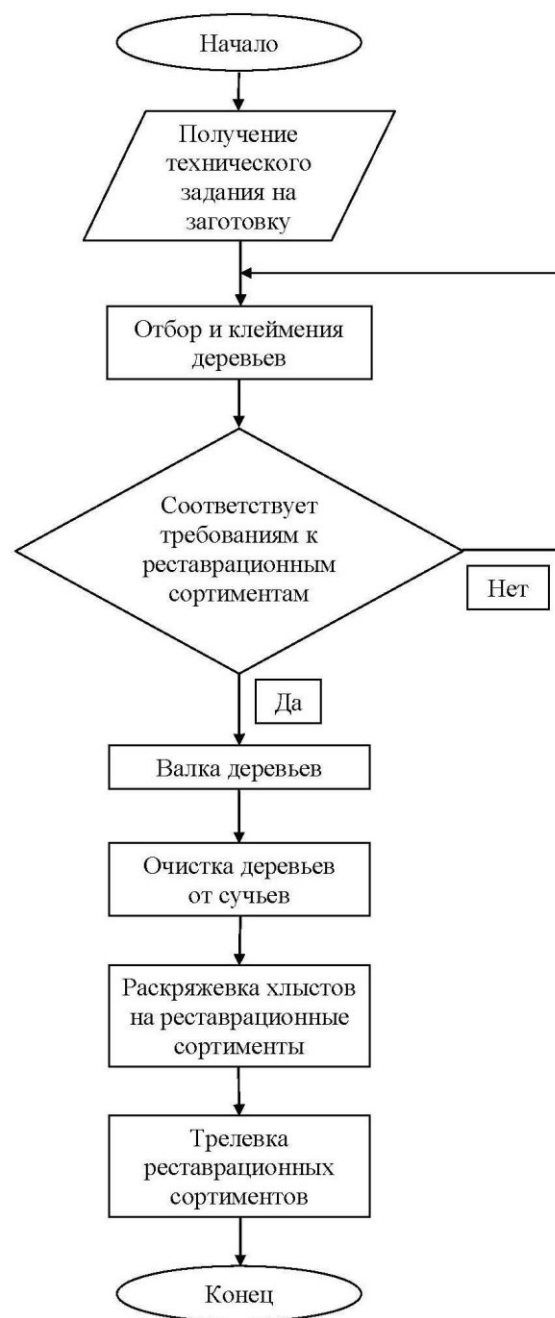


Рис. 1. Блок-схема технологии заготовки реставрационных сортиментов

В соответствии с существующей классификацией предложенную технологию заготовки реставрационных сортиментов можно отнести к механизированной сортиментной технологии заготовке лесоматериалов.

Оценка эффективности технологии заготовки реставрационных сортиментов. Эффективность предложенной технологии заготовки реставрационных сортиментов можно оценивать по ряду критериев, детальный анализ которых требует отдельного рассмотрения. В данной работе, опираясь на представленные выше результаты исследования ((1)–(8) и рис. 1), приведём обобщенные ключевые оценки эффективности технологии заготовки реставрационных сортиментов.

1. Качество заготавливаемых реставрационных сортиментов: предлагаемая технология учитывает все отличительные особенности заготовки реставрационных сортиментов, получаемые сортименты высокого качества и соответствуют требованиям, предъявляемым к лесоматериалам, применяемым при реставрации памятников деревянной архитектуры.

2. Экономическая эффективность заготовки: производительность заготовки невысокая, что обусловлено отличительными особенностями заготовки реставрационных сортиментов (удалённостью и неравномерностью распределения подходящих лесоматериалов по большим территориям), но и величина затрат на заготовку также невысокая, т. к. для заготовки не требуется строительство дорог и применение дорогостоящей лесозаготовительной техники, основной вид затрат – это заработная плата.

3. Воздействие на окружающую среду: предлагаемая система машин для заготовки реставрационных сортиментов наносит минимальное повреждение почвогрунтов, деревьев, оставляемых на доразращивание, и подраста хозяйственно-ценных пород.

4. Безопасность и комфортность условий труда: большинство технологических операций предложенной технологии заготовки выполняются бензопилами, работа с которыми относится к профессиям с тяжёлыми условиями труда; для повышения безопасности и комфортности условий труда рекомендуется использовать бензопилы, оснащённые рукоятками, подобно бензо-

пиле Husqvarna 262, и работать только в шумозащитных наушниках [38].

Важно отметить, что предлагаемая технология заготовки реставрационных сортиментов разработана с учётом современных требований к повышению технико-экономической эффективности и экологической безопасности. При этом были приняты во внимание научные основы технологий лесозаготовок, представленные в процитированных выше публикациях российских и зарубежных авторов, а также в работах [39, 40, 41].

Заключение. В ходе исследования осуществлён анализ требований, предъявляемых к лесоматериалам, применяемым при реставрации памятников деревянной архитектуры, и выявлены отличительные особенности заготовки реставрационных сортиментов. Получены следующие результаты.

1. Обоснован вид рубок – выборочные рубки очень малой интенсивности в спелых и перестойных лесных насаждениях. Предложен лесотехнический термин «реставрационный сортимент».

2. В рамках обоснования технологии заготовки реставрационных сортиментов детализированы технологические операции и системы машин для их заготовки – отбор и маркировка деревьев, валка деревьев, очистка деревьев от сучков, раскряжёвка хлыстов на сортименты, трелёвка сортиментов на верхний склад. Причём валка деревьев, очистка деревьев от сучков, раскряжёвка хлыстов на сортименты выполняются на лесосеке с использованием бензопил; трелёвка сортиментов осуществляется мини-трактором (мини-трелёвщиком) с прицепом и захватом, также может использоваться конная трелёвка.

3. С использованием элементов теории множеств разработана модель технология заготовки реставрационных сортиментов как вариант механизированной сортиментной технологии заготовки реставрационных сортиментов.

4. Как продолжение исследований по теме данной работы предполагается анализ технико-экономических аспектов и экологической безопасности в целях совершенствования технологии заготовки реставрационных сортиментов.

Литература

1. Бодэ А.Б., Зинина О.А., Косенков А.Ю., Попов В.А. Традиционное строительство из дерева и плотницкое мастерство. М. : Институт Наследия, 2019. 316 с.
2. Švajlenka J., Kozlovská M. Construction Systems Based on Wood // Efficient and Sustainable Wood-based Constructions. 2022. Pp. 17–34.
3. Martín J.A., López R. Biological Deterioration and Natural Durability of Wood in Europe // Forests. 2023. Vol. 14. Pp. 283.
4. van Niekerk P.B., Brischke C., Niklewski J. Estimating the Service Life of Timber Structures Concerning Risk and Influence of Fungal Decay – A Review of Existing Theory and Modelling Approaches // Forests. 2021. Vol. 12. No. 5. Pp. 588.
5. Zabel R., Morrell J. Wood Microbiology: Decay and Its Prevention. Academic Press, 2020. 576 p.
6. Незвицкая Т.В. Руководящие принципы сохранения церкви преображения господня кижского погоста, объекта все-мирного наследия ЮНЕСКО // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 6. С. 88–99.
7. Заготовка, хранение и атмосферная сушка реставрационного леса [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://site.kizhi.karelia.ru/info/about/razdel-ii-zagotovka-hranenie-i-atmosfernaya-sushka-spetsialnogo-restavratsionnogo> (дата обращения 04.06.2024).
8. Сютнев В.С. и др. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия. Joensuu: НИИ леса Финляндии METLA, 2008. 127 с.
9. Пятакин В.И. [и др.]. Технология и машины лесосечных работ : учебник ; под ред. В.И. Пятакина. СПб. : СПбГЛ-ТУ, 2012. 362 с.
10. Герц Э.Ф. Оценка технологии лесопользования на лесосечных работах. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2003. 120 с.
11. Bont L.G., Fraefel M., Frutig F., Holm S., Ginzler C., Fischer C. Improving forest management by implementing best suitable timber harvesting methods // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 302. Pp. 114099.

12. Кривошеев А.А., Швецов А.С., Бурмистрова О.Н., Григорьев И.В., Ревяко С.И., Охлопкова М.К. Обоснование необходимости исследования воздействия валочно-трелёвочно-процессорных машин на почвогрунты лесосек на склонах // *Resources and Technology*. 2024. № 21 (4). С. 66–120.
13. Козулин Н.А., Матов М.Б. Анализ эффективности технологий лесозаготовительных производств в современных условиях развития России // *International agricultural journal*. 2022. № 4. С. 1493–1523.
14. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Чураков А.А. Эффективные технологии и системы машин для малообъёмных заготовок древесины // *Энергия: экономика, техника, экология*. 2018. № 2. С. 61–66.
15. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Тамби А.А. Повышение эффективности проведения малообъёмных лесозаготовок // *Устойчивое развитие науки и образования*. 2017. № 2. С. 159–167.
16. Уразова А.Ф., Герц Э.Ф. Рациональная организация рубок ухода с использованием безомоторной пилы и мини-трактора // *Леса России и хозяйство в них*. 2022. № 4. С. 82–87.
17. Теринов Н.Н., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Залесов С.В., Терехов Г.Г., Толкач О.В. Технологические схемы использования мини-тракторов на рубках ухода за лесом // *Resources and Technology*. 2023. № 20 (4). С. 1–27.
18. Мехренцев А.В., Герц Э.Ф., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Технологический процесс выборочных рубок с применением малогабаритного трактора // *Леса России и хозяйство в них*. 2024. № 1 (88). С. 142–150.
19. Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2023. № 2 (392). С. 88–105.
20. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Технологии промежуточных рубок на труднодоступных территориях // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2021. № 4. С. 117–130.
21. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Аэростатические аппараты для лесозаготовок в труднодоступных районах // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2022. № 1. С. 110–127.
22. Дербин В.М., Дербин М.В. Совершенствование сортиментной заготовки древесины // *Лесотехнический журнал*. 2015. № 1. С. 128–135.
23. Ширнин Ю.А., Рукомойников К.П., Гайсин И.Г., Ширнин А.Ю. Обоснование необходимости развития стратегии технологических процессов лесопользования на лесных плантациях // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2021. Т. 25. № 3. С. 49–57.
24. Spinelli R., Magagnotti N., De Francesco F., Kováč B., Heger P., Heilig D., Heil B., Kovács G., Zemánek T. Cut-to-Length Harvesting Options for the Integrated Harvesting of the European Industrial Poplar Plantations // *Forests*. 2022. Vol. 13. Pp. 1478.
25. Каляшов В.А., До Туан Ань, Хитров Е.Г., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек // *Resources and Technology*. 2022. № 19 (2). С. 1–47.
26. Каляшов В.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Сравнительный анализ видов трелёвки на горных склонах // *Вестник АГАТУ*. 2022. № 2 (6). С. 41–59.
27. Enache A., Kühmaier M., Visser R., Stampfer K. Forestry operations in the European mountains: A study of current practices and efficiency gaps // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2016. Vol. 31. Pp. 412–427.
28. Dinca L., Constandache C., Postolache R., Murariu G., Tupu E. Timber Harvesting in Mountainous Regions: A Comprehensive Review // *Forests*. 2025. Vol. 16. Pp. 495.
29. Принципы сохранения исторических деревянных построек», принятых на 19-й Генеральной Ассамблее ИКОМОС в Индии, 2017 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://iwc.icomos.org/assets/iwcc-2017-principles-russian.pdf> (дата обращения 04.06.2024).
30. Щеголева Л.В., Воронов Р.В., Питухин Е.А. Моделирование автоматизированных систем мониторинга // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 12.
31. Бондарев И.С., Гаврицков С.А., Логунов О.С., Наркевич М.Ю. Представление результатов теоретико-множественного анализа сложной системы // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2024. № 5 (122). С. 18–30.
32. Chachuat B., Houska B., Paulen R., Peri'c N., Rajyaguru J., Villanueva M.E. Set-Theoretic Approaches in Analysis, Estimation and Control of Nonlinear Systems // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48 (8). Pp. 981–995.
33. Румянцев Д.Е., Фролова В.А. Проблемы диагностики аварийности деревьев в урбанизированной среде // *Принципы экологии*. 2021. № 2. С. 102–119.
34. Gao S., Wang X., Wiemann M.C., Brashaw B.K., Ross R.J., Wang L. A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees // *Annals of Forest Science*. 2017. Vol. 74. Pp. 27.
35. Malatinszky Á., Ficsor C., Tormáné Kovács E. Which Factors Determine the Distribution of Low-Impact Horse Logging in the Hungarian State-Owned Forests? // *Forests*. 2022. Vol. 13. Pp. 1959.
36. Knežević J., Gurda S., Musić J., Halilović V., Sokolović D., Bajrić M. The Impact of Animal Logging on Residual Trees in Mixed Fir and Spruce Stands // *South-East European Forestry*. 2018. Vol. 2. Pp. 107–114.
37. Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F. How and how much, do harvesting activities affect forest soil, regeneration and stands? // *Current Forestry Report*. 2020. Vol. 6. Pp. 115–128.
38. Соколов А.П. Условия труда на основных видах работ, выполняемых с помощью бензопил на лесозаготовках // *Труды лесинженерного факультета ПетрГУ*. № 7. 2008. С. 113–119.
39. Графова Е.О., Сюнёв В.С., Горбач В.В. Анализ факторов негативного воздействия лесозаготовительного производства на природную среду Северо-Западного региона РФ // *Лесотехнический журнал*. 2023. № 2 (50). С. 5–24.
40. Хитров Е.Г., Просужих А.А., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Исследование взаимосвязей свойств почвогрунтов как опорных поверхностей движения лесных машин // *Resources and Technology*. 2020. № 2. С. 45–79.
41. Катаров В.К., Алешина Н.В., Сюнёв В.С., Ратькова Е.И., Марков В.И. Оценка уплотнённого состояния почвогрунтов при строительстве лесной дороги // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. 2021. № 6. С. 106–117.

References

1. Bode A.B., Zinina O.A., Kosenkov A.Yu., Popov V.A. Traditional wood construction and carpentry. M. : Institute of Heritage-age, 2019. 316 p.
2. Švajlenka J., Kozlovská M. Construction Systems Based on Wood // *Efficient and Sustainable Wood-based Constructions*. 2022. Pp. 17–34.
3. Martín J.A., López R. Biological Deterioration and Natural Durability of Wood in Europe // *Forests*. 2023. Vol. 14. Pp. 283.
4. van Niekerk P. B., Brischke C., Niklewski J. Estimating the Service Life of Timber Structures Concerning Risk and Influence of Fungal Decay – A Review of Existing Theory and Modelling Approaches // *Forests*. 2021. Vol. 12. No. 5. Pp. 588.
5. Zabel R., Morrell J. Wood Microbiology: Decay and Its Prevention. Academic Press, 2020. 576 p.
6. Nezvitskaya T.V. Principles of preservation of the church of transfiguration of the lord in kizhi, the object of the world

- heritage of UNESCOH. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 6. Pp. 88–99.
7. Harvesting, storage and atmospheric drying of restoration timber [Electronic resource]. URL: <https://site.kizhi.karelia.ru/in-fo/about/razdel-ii-zagotovka-hranenie-i-atmosferneya-sushka-spetsialnogo-restavratsionnogo> (date of address 04.06.2024).
 8. Syuney V.S. et al. Comparison of logging technologies in logging companies of the Republic of Karelia. Joensuu: Finnish Forest Research Institute METLA, 2008. 127 p.
 9. Patyakin V.I. [et al.]. Technology and machines for logging operations: textbook; edited by V.I. Patyakin. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University, 2012. 362 p.
 10. Gerts E.F. Assessment of forest management technology in logging operations. Ekaterinburg : Ural. State Forestry University, 2003. 120 p.
 11. Bont L.G., Fraefel M., Frutig F., Holm S., Ginzler C., Fischer C. Improving forest management by implementing best suitable timber harvesting methods // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 302. Pp. 114099.
 12. Krivosheev A., Shvetsov A., Burmistrova O., Grigorev I., Revyako S., Okhlopko M. Substantiation of the need to study the impact of felling-skidding-processing machines on the soils of cutting areas on the slopes // Resources and Technology. 2024. No. 21 (4). Pp. 66–120.
 13. Kozulin N.A., Matov M.B. Analysis of the efficiency of technologies of logging industries in modern conditions of development in Russia // International agricultural journal. 2022. No. 4. Pp. 1493–1523.
 14. Grigorev I., Grigoreva O., Churakov A. Efficient technologies and machine systems for small-volume timber harvesting // Energiia: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2018. No. 2. Pp. 61–66.
 15. Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Tambi A.A. Improving the effectiveness of low-volume logging // Sustainable development of science and education. 2017. No. 2. Pp. 159–167.
 16. Urazova A.F., Gertz E.F. Rational organization of thinning with a gasoline-powered saw and a mini tractor // Forests of Russia and economy in them. 2022. No. 4. Pp. 82–87.
 17. Terinov N., Hertz E., Mehrentsev A., Zalesov S., Terekhov G., Tolkach O. Technological schemes of using mini-tractors for cleaning cutting in forest // Resources and Technology. 2023. No. 20 (4). Pp. 1–27.
 18. Mehrentsev A.V., Hertz E.F., Terinov N.N., Urazova A.F. Technological process of selective felling using a small-sized tractor // Forests of Russia and economy in them. 2024. No. 1 (88). Pp. 142–150.
 19. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Substantiation of Technological Processes and Machinery Systems for Logging Operations // Russian Forestry Journal. 2023. No. 2 (392). Pp. 88–105.
 20. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Technologies of Intermediate Felling in Difficult to Access Areas // Russian Forestry Journal. 2021. No. 4. Pp. 117–130.
 21. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Aerostatic Aircraft for Logging in Remote Forest Areas // Russian Forestry Journal. 2022. No. 1. Pp. 110–127.
 22. Derbin V.M., Derbin M.V. Improving cut-to-length of timber // Forestry engineering journal. 2015. No. 1. Pp. 128–135.
 23. Shirmin Y.A., Gaisin I.G., Rukomojnikov K.P., Shirmin A.Y. Strategy for technological processes of forest management in forest plantations // Forestry Bulletin. 2021. Vol. 25. No. 3. Pp. 49–57.
 24. Spinelli R., Magagnotti N., De Francesco F., Kováč B., Heger P., Heilig D., Heil B., Kovács G., Zemánek T. Cut-to-Length Harvesting Options for the Integrated Harvesting of the European Industrial Poplar Plantations // Forests. 2022. Vol. 13. P. 1478.
 25. Kalyashov V., An Do Tuan, Hitrov E., Grigoreva O., Gur'ev A., Novgorodov D. Modern systems of machinery and technologies for timber harvesting and reforestation in mountain forests // Resources and Technology. 2022. No. 19 (2). Pp. 1–47.
 26. Kalyashov V., Grigorev I., Grigoreva O. Comparative analysis of types of skidding on mountain slopes // Vestnik of ASAU. 2022. No. 2 (6). Pp. 41–59.
 27. Enache A., Kühmaier M., Visser R., Stampfer K. Forestry operations in the European mountains: A study of current practices and efficiency gaps // Scandinavian Journal of Forest Research. 2016. Vol. 31. Pp. 412–427.
 28. Dinca L., Constandache C., Postolache R., Murariu G., Tupu E. Timber Harvesting in Mountainous Regions: A Comprehensive Review // Forests. 2025. Vol. 16. Pp. 495.
 29. Principles for the Conservation of Historic Wooden Buildings, adopted at the 19th ICOMOS General Assembly in India, 2017 [Electronic resource]. URL: <http://iiwc.icomos.org/assets/iiwc-2017-principlesrussian.pdf> (date of address 04.06.2024).
 30. Shchegoleva L.V., Voronov R.V., Pitukhin E.A. Modeling of automated monitoring systems // Engineering journal of Don. 2023. No. 12.
 31. Bondarev I.S., Gavritskov S.A., Logunova O.S., Narkevich M.Yu. Presenting the results of a set-theoretic analysis of a complex system // Cherepovets State University Bulletin. 2024. No. 5 (122). Pp. 18–30.
 32. Chachuat B., Houska B., Paulen R., Perić N., Rajyaguru J., Villanueva M.E. Set-Theoretic Approaches in Analysis, Estimation and Control of Nonlinear Systems // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48 (8). Pp. 981–995.
 33. Rumyantsev D., Frolova V. The problem of diagnosing the accident rate of trees in an urban environment // Principy ekologii. 2021. No. 2. Pp. 102–119.
 34. Gao S., Wang X., Wiemann M.C., Brashaw B.K., Ross R.J., Wang L. A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees // Annals of Forest Science. 2017. Vol. 74. Pp. 27.
 35. Malatinszky Á., Ficsor C., Tormáné Kovács E. Which Factors Determine the Distribution of Low-Impact Horse Logging in the Hungarian State-Owned Forests? // Forests. 2022. Vol. 13. Pp. 1959.
 36. Knežević J., Gurda S., Musić J., Halilović V., Sokolović D., Bajrić M. The Impact of Animal Logging on Residual Trees in Mixed Fir and Spruce Stands // South-East European Forestry. 2018. Vol. 2. Pp. 107–114.
 37. Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F. How and how much, do harvesting activities affect forest soil, regeneration and stands? // Current Forestry Report. 2020. Vol. 6. Pp. 115–128.
 38. Sokolov A.P. Working conditions for the main types of work performed with chainsaws in logging // Works of the forestry engineering faculty of PetrSU. No. 7. 2008. Pp. 113–119.
 39. Grafova E.O., Syuney V.S., Gorbach V.V. The negative impact factor analysis to the environment from logging production in the North-West region of the Russian Federation // Forestry Engineering journal. 2023. No. 2 (50). Pp. 5–24.
 40. Hitrov E., Prosuzhikh A., Rudov S., Kunickaya O., Grigorev I. Research of interrelations of soil properties as supporting surfaces for forest machinery movement // Resources and Technology. 2020. No. 2. Pp. 45–79.
 41. Katarov V.K., Aleshina N.V., Syuney V.S., Rat'kova E.I., Markov V.I. Assessment of soil compacted state in forest road construction // Forestry Bulletin. 2021. No. 6. Pp. 106–117.