

Леса России и хозяйство в них. 2026. № 1 (96). С. 154–162.

Forests of Russia and economy in them. 2026. № 1 (96). P. 154–162.

Научная статья

УДК 630*182

DOI: 10.51318/FRET.2026.96.1.017

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЛЕСООБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСАХ

Н. Н. Теринов¹, В. В. Побединский², Э. Ф. Герц³, А. В. Мехренцев⁴,
М. М. Ляхова⁵, Г. Г. Терехов⁶

²⁻⁵ Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

^{1,6} Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Николай Николаевич Теринов,

n_n_terinov@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена проблеме восстановления темнохвойных лесов. Одно из направлений ее решения – прогнозирование процесса лесообразования на основе имитационного моделирования. Изложены первые этапы создания имитационной модели по прогнозированию процесса лесообразования в темнохвойных лесах. Модель базируется на теории последовательности восстановительно-возрастных смен древесной растительности Ивашкевича – Колесникова. Установлено, что наиболее перспективным направлением для восстановления темнохвойных лесов является формирование коротко-производных насаждений, которые обладают наиболее высоким демутиационным потенциалом по отношению к длительно-производным. Характеризуются такие насаждения доминированием коренной древесной породы в составе верхнего яруса древостоя или в случае формирования производного мягколиственного насаждения она «обильно представлена в подросте». В первом случае восстановление темнохвойного насаждения происходит без смены пород, во втором случае – через одно поколение временно преобладающих некоренных пород (первично-производное насаждение). Естественный процесс формирования темнохвойных насаждений в рамках каждого направления лесообразования по коротко-производному типу сопровождается и ускоряется своим комплексом хозяйственных мероприятий и прежде всего своей системой рубок. Эти мероприятия являются обязательным элементом при создании имитационной модели лесообразовательного процесса в темнохвойных лесах. Моделирование такого сложного объекта целесообразно производить путем разделения на отдельные подсистемы или блоки. Таким образом, целью исследования являлась разработка первой части алгоритма имитационной модели процесса лесообразования в темнохвойных лесах с учетом хозяйственных мероприятий. Решались следующие задачи: 1) обоснование теоретической части процесса лесообразования темнохвойных лесонасаждений; 2) разработка общей схемы лесообразовательного процесса; 3) разработка первой части алгоритма лесообразовательного процесса темнохвойных лесонасаждений. Результатами работы является алгоритм первого блока модели лесообразовательного процесса темнохвойных насаждений, предназначенный для его

компьютерной реализации. Развитие предложенного алгоритма с использованием материалов лесоустройства позволит создать систему цифрового прототипирования лесообразовательного процесса.

Ключевые слова: цифровые технологии, лесообразовательный процесс, моделирование, алгоритм процесса лесообразования

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Ботанический Сад УрО РАН», № гос.регистрации 123112700125-1.

Для цитирования: Разработка имитационной модели лесообразовательного процесса в темных хвойных лесах // Н. Н. Теринов, В. В. Побединский, Э. Ф. Герц [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2026. № 1 (96). С. 154–162.

Original article

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF THE FOREST FORMATION PROCESS IN THE DARK CONIFEROUS FORESTS

Nikolay N. Terinov¹, Vladimir V. Pobedinsky², Eduard F. Gerts³,
Andrey V. Mekhrentsev⁴, M. M. Lyakhova⁵, G. G. Terekhov⁶

²⁻⁵ Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

^{1,6} Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

² Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

Corresponding author: Nikolay N. Terinov,

n_n_terminov@mail.ru

Abstract. The work is devoted to the problem of restoration of dark coniferous forests. One of the directions for its solution is forecasting the process of forest formation based on simulation modeling. The first stages of creating a simulation model for predicting the process of forest formation in dark coniferous forests are described. The model is based on the Ivashkevich-Kolesnikov theory of the sequence of restorative-age changes of woody vegetation. It has been established that the most promising direction for the restoration of dark coniferous forests is the formation of short-derived plantations, which have the highest demutation potential in relation to long-term derivatives. Such plantations are characterized by the dominance of the indigenous wood species in the upper tier of the forest stand, or in the case of the formation of a derivative soft-leaved plantation, it is “abundantly represented in the undergrowth”. In the first case, the restoration of a dark coniferous plantation occurs without changing species, in the second case – after one generation of temporarily predominant non-indigenous species (primary – derivative plantation). The natural process of formation of dark coniferous plantations within each direction of forest formation of the short-derived type is accompanied and accelerated by its own set of economic measures and, first of all, its own system of cutting. These measures are an indispensable element in the creation of a simulation model of the forest formation process in dark coniferous forests. Modeling of such a complex object belongs to the class of modeling large systems, which will be most accessible by dividing it into separate subsystems or blocks. Thus, the purpose of the research was to develop the first part of the algorithm of the simulation model of the process of forest formation in dark coniferous forests, taking into account economic measures. The following tasks were solved: 1) substantiation of the theoretical part of the process of forest formation of dark coniferous forest plantations; 2) development of a general scheme of the forest formation process; 3) development of the

first part of the algorithm of the forest formation process of dark coniferous forests. The results of the work are the algorithm of the first block of the model of the forest formation process of dark coniferous plantations, designed for its computer implementation. The development of the proposed algorithm using forest inventory materials will create a system for digital prototyping of the forest formation process.

Keywords: digital technologies, forest formation process, modeling, forest formation process algorithm

Funding: the research was carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institution Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. State registration number 123112700125-1.

For citation: Development of a simulation model of the forest formation process in the dark coniferous forests / N. N. Terinov, V. V. Pobedinsky, E. F. Gerts [et al.] // Forests of Russia and economy in them. 2026. № 1 (96). P. 154–162.

Введение

Современные исследования и управление производственными процессами различного уровня тесно связаны с использованием современных технических средств и цифровых технологий. Это космическое зондирование земной поверхности, использование беспилотных наземных, водных и летательных средств, обработка больших объемов данных и т. д. Все это начинает активно использоваться в лесной отрасли, начиная с учетных и проектных работ до отвода лесосек в рубку, подготовку и сопровождение необходимой документации. На сегодняшний день накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал, который реализован в правовых актах по ведению лесного хозяйства и эксплуатации лесов. Прогноз развития лесных насаждений и достижение планируемого результата в средне- и долгосрочной перспективе с учетом хозяйственных мероприятий является следующим шагом развития цифровых технологий в управлении лесами. С учетом значительного объема исследований по вопросу прогнозирования лесообразовательного процесса, его цифрового прототипирования предполагается решить отдельную часть такой проблемы на примере темнохвойных насаждений.

Цель, задачи, методы и средства исследований

Целью исследования являлась разработка первой части алгоритма имитационной модели процесса лесообразования в темнохвойных лесах с учетом хозяйственных мероприятий.

Для достижения цели решались следующие задачи.

1. Обоснование теоретической части процесса лесообразования темнохвойных лесонасаждений.
2. Разработка общей схемы лесообразовательного процесса.
3. Разработка первой части алгоритма лесообразовательного процесса темнохвойных лесонасаждений.

В работе использованы теория последовательности восстановительно-возрастных смен древесной растительности Ивашкевича – Колесникова, теория алгоритмов и программ, программа Microsoft Office Visio.

Результаты и их обсуждение

Согласно генетической типологии Ивашкевича – Колесникова при нарушении естественного хода лесообразовательного процесса в результате рубки, пожара, ветровала восстановление условно-коренных лесов происходит через последовательность восстановительно-возрастных смен древесной растительности (Колесников и др., 1973). Реализуется этот процесс через формирование коротко- или длительно-производных насаждений. Первые являются наиболее перспективным и по отношению ко вторым обладают наиболее высоким демулационным потенциалом (Восстановление..., 2020). Характеризуются такие насаждения доминированием коренной древесной породы в составе верхнего яруса древостоя, а в случае образования производного лиственного насаждения она «обильно представлена в подросте».

В любом случае формирование древостоя с преобладанием коренной древесной породы обеспечивается за период жизни одного ее поколения.

Таким образом, мы имеем два перспективных направления формирования условно-коренных насаждений в рамках процесса лесообразования по коротко-производному типу: без смены пород и формирование условно-коренного насаждения через преобладание одного поколения некоренной древесной породы в верхнем ярусе древостоя или через первично-производное насаждение (рис. 1).

Каждое направление сопровождается своим комплексом хозяйственных мероприятий. При участии в верхнем ярусе молодняка или средневозрастного древостоя четырех и более единиц хвойных пород (рис. 1, *а*), согласно действующим нормативным документам, осуществляется

комплекс рубок ухода. При формировании производного лиственного насаждения (рис. 1, *б*) на месте еловых насаждений с меньшим участием хвойных пород в верхнем ярусе и наличием 1,0–1,5 тыс. экз./га и более подроста последующей генерации (Исаева, 1984) разработан цикл рубок трансформации (Теринов, 2013). Эти перспективные направления с сопровождающими их хозяйственными мероприятиями явились основой для моделирования лесообразовательного процесса в темнохвойных лесах. Сам процесс моделирования заключается в прогнозировании процесса развития насаждения в зависимости от вероятностных переходов между блоками, т. е. состояниями насаждения. Первым шагом в этом направлении явилось создание графической информационно-модели в виде схемы, дающей

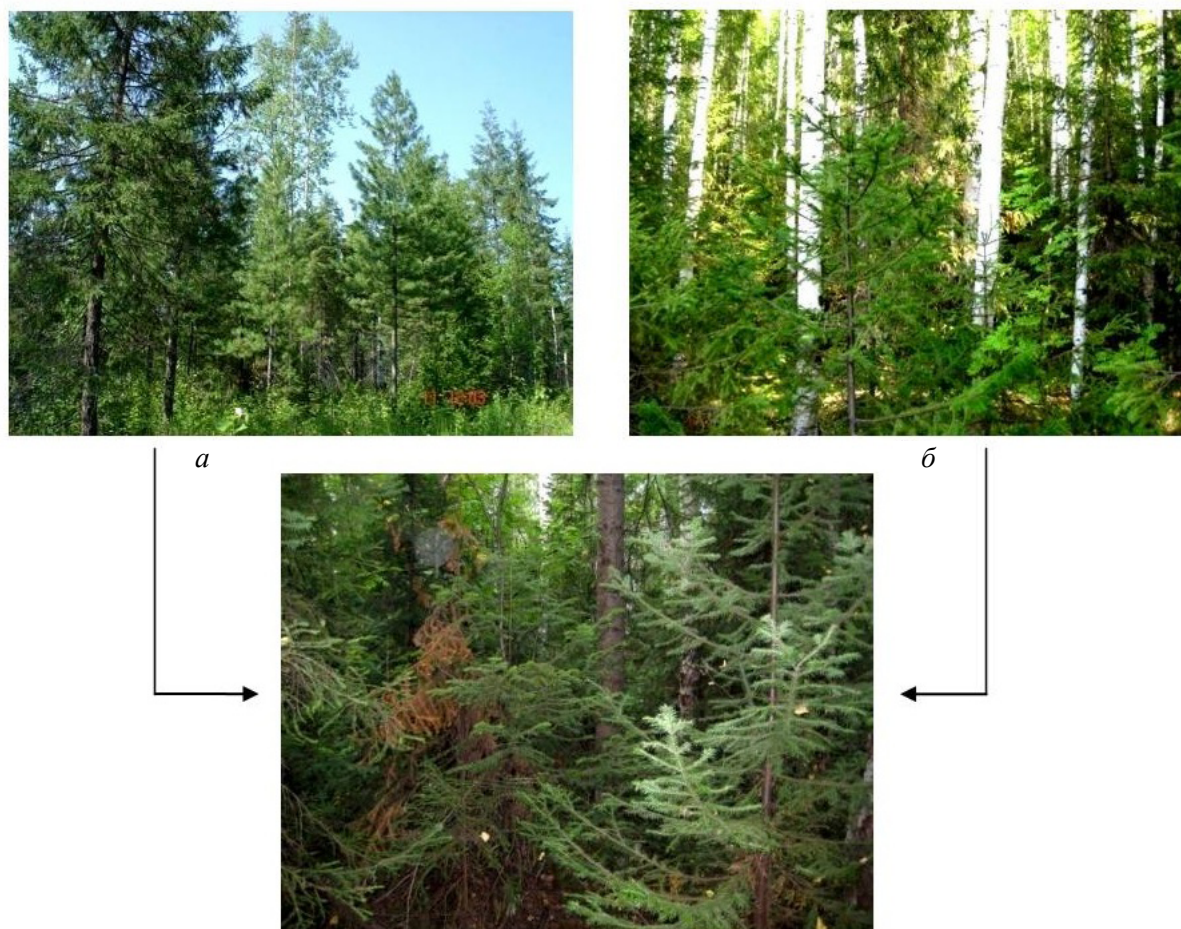


Рис. 1. Формирование темнохвойного насаждения при коротко-производном типе лесообразования:

а – без смены пород, *б* – через первично-производное насаждение

Fig. 1. Formation of dark coniferous plantations with a short-derivative type of forest formation:

a – without changing species, *b* – through a primary-derivative plantation

самое общее понятие о процессе (рис. 2). Схема представляет собой матрицу и состоит из блоков, в одних из которых прописаны параметры состояния древостоя, в других – хозяйственные мероприятия. Каждый блок обозначен первой цифрой и соответствует направлению лесообразования: цифра 1 – без смены пород, цифра 2 – через перво-производное лиственное насаждение (темный фон). Пунктирной линией обозначено нежелательное направление лесообразовательного процесса. Первое направление характеризуется преобладанием или равным участием в составе древостоя хвойных пород, т. е. пяти и более единиц. На начальных возрастных этапах древостоя допускается участие в его составе четырех единиц хвойных пород (позиции х.1.1, х.1.2, х.1.3). Есть вероятность, что в этом случае равное участие или преобладание хвойных пород в составе древостоя может быть достигнуто естественным способом (Исаева, 1975, Синельщиков, 1966). Соответственно, при втором направлении участие хвойных пород в составе древостоя составляет три и менее единицы. Вторая цифра соответствует классу возраста древостоя: для первого направления интервал между классами возраста составляет 20 лет, для второго направления – 10 лет. Каждая прямоугольная ячейка матрицы является платформой, где, кроме соотношения древесных пород, записаны и некоторые другие таксационные характеристики древостоя: относительная полнота, наличие подроста или деревьев более старшего возраста, находящихся в нижнем ярусе древостоя. При совпадении таксационной характеристики участка (выдела) с записанной в матрице открывается полная картина развития темнохвойного насаждения с сопровождающими этот процесс мероприятиями (обозначено овалом). Их своевременное и качественное выполнение обеспечивает высокую вероятность формирования производительных древостоев и восстановления и сохранения темнохвойных лесов. Например, позиция 1.6.2 соответствует спелому древостою шестого класса возраста (101–120 лет) с преобладанием хвойных пород в его составе и наличием подроста в нижнем ярусе. Такое состояние предполагает равномерно- или группово-

постепенную рубку (овал – позиция 1.6.2), после которой с высокой долей вероятности сформируется чистый или с преобладанием хвойных пород молодняк (переход на позицию 1.2). Другой пример: выполнение цикла рубок трансформации (позиции 2.3–2.6) позволяет не только практически исключить повторное формирование производного лиственного насаждения (вторично-производное насаждение), но и системой рубок трансформации сформировать темнохвойный молодняк или средневозрастной древостой минимум на 10–15 лет раньше, чем при существующих методах ведения лесного хозяйства (Теринов, 2024).

Для создания алгоритма лесообразовательного процесса необходим более детализированный вариант представленной схемы. Эта задача реализована в программе Microsoft Office Visio пока только для первого блока. Ее фрагмент показан на рис. 3. Из рис. 3 следует, что в этот блок (за некоторым исключением) попадают участки с равным участием или преобладанием хвойных пород (в схеме – хв) в составе древостоя. Далее идет их распределение по классам возраста и полноте. В зависимости от этих параметров назначаются соответствующие рубки ухода за лесом.

Начиная с приспевающих и спелых древостоев, в матрицу дополнительно вводятся данные по наличию подроста, его количеству и размещению по площади. Эти характеристики определяют хозяйственные мероприятия, от проведения которых будет зависеть дальнейшее направление процесса лесообразования.

Предлагаемая версия схемы лесообразовательного процесса в темнохвойных лесах и создаваемый на ее основе алгоритм и далее прототип имитационной модели предполагают некоторые ограничения. Прежде всего это касается показателя производительности древостоя и лесорастительных условий – гидрологического режима почвы и ее мощности. С точки зрения экономической целесообразности и сохранения природной среды нет необходимости в вырубке низкобонитетных древостоев на каменистых почвах и проведении выборочных рубок в сырых и мокрых условиях лесопроизрастания.

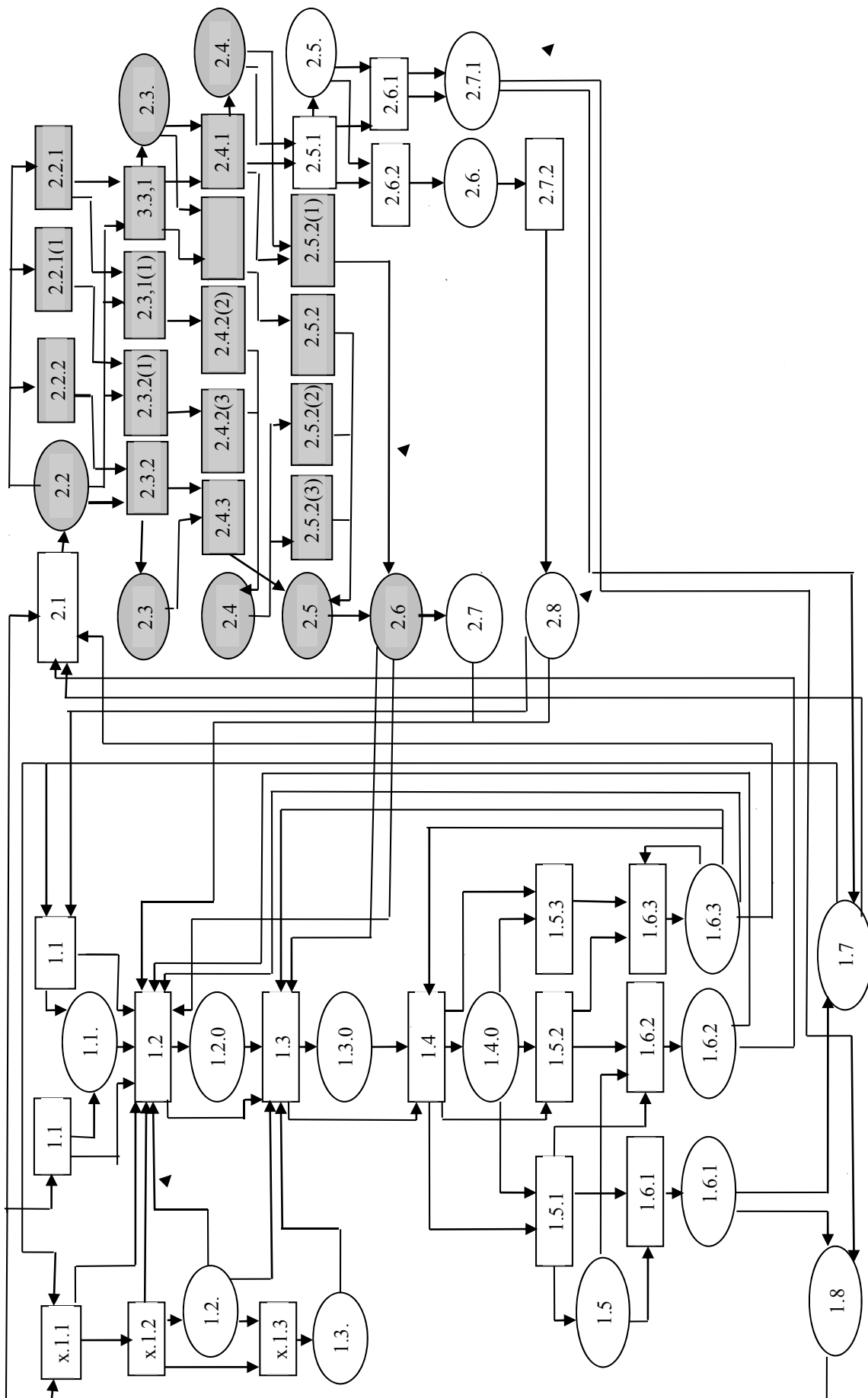


Рис. 2. Схема формирования темнохвойных насаждений
 Fig. 2. Scheme of the dark coniferous plantation formation

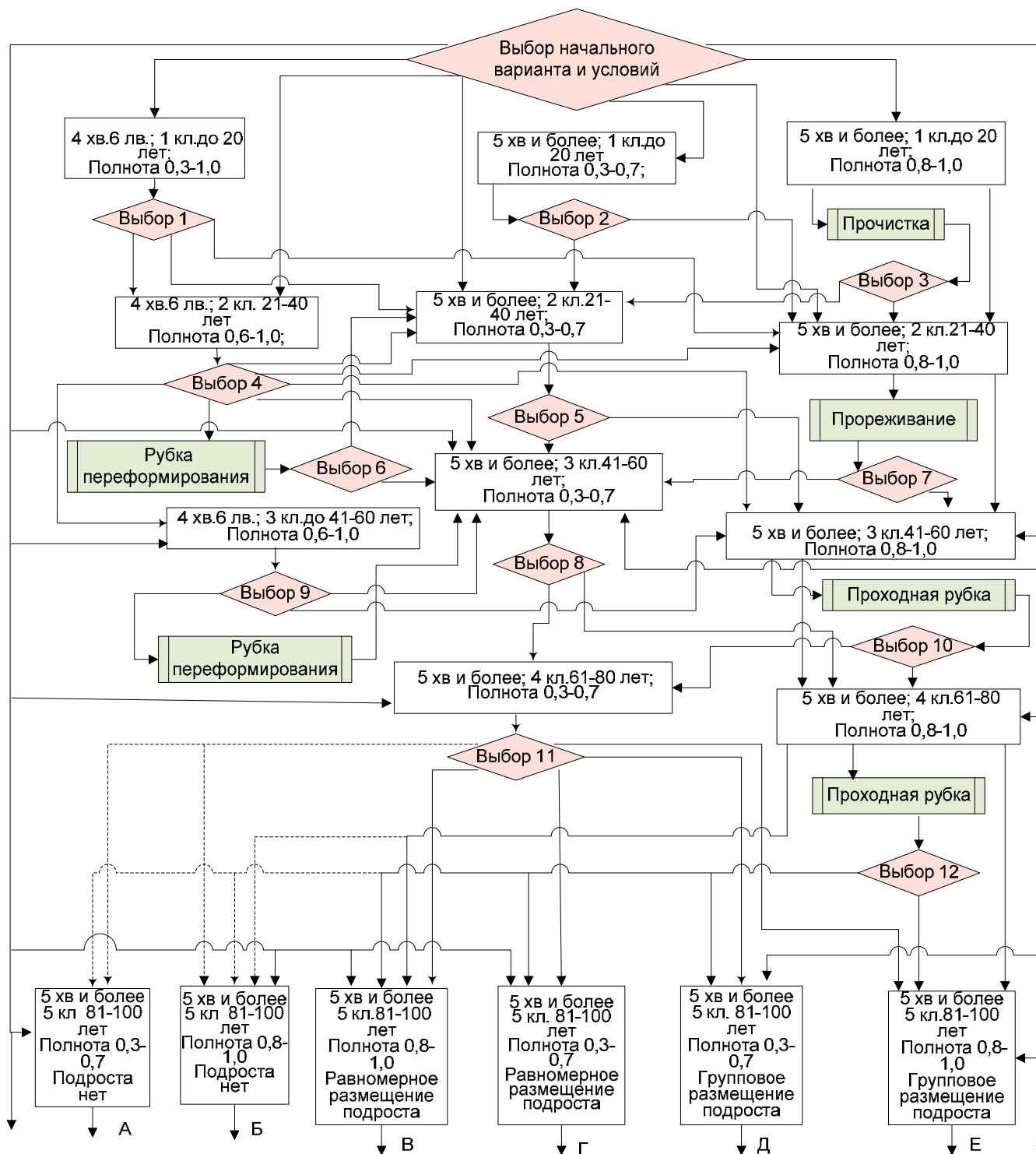


Рис. 3. Фрагмент первого блока алгоритма лесообразовательного процесса при доминировании в составе верхнего яруса древостоя темнохвойных пород
 Fig. 3. Fragment of the first block of the forest formation process algorithm with the dominance of dark coniferous species in the upper story of the forest stand

Для дальнейшего развития алгоритма и в конечном итоге создания цифрового прототипа лесообразовательного процесса в темнохвойных лесах необходима интеграция с материалами лесоустройства, выполненными в цифровом формате. Например, таксационные описания лесных участков (выделов) предоставляются на бумажном носителе и дублируются в электронном виде в программе Excel. Этот электронный ресурс позволяет группировать таксационные выделы по определенным показателям и использовать их напрямую в качестве входных параметров.

Выводы

1. Предложенная схема лесообразовательного процесса в темнохвойных лесах с учетом лесохозяйственных мероприятий разработана на основе известных теоретических положений.
2. Созданный алгоритм первого блока схемы предназначен для цифрового прототипирования лесообразовательного процесса темнохвойных насаждений.
3. На основе метода имитационного моделирования, современных программ и возможности компьютерной техники, материалов лесоустройства система ведения лесного хозяйства может быть поднята на новый уровень.

Список источников

- Восстановление еловых лесов: теория, отечественный опыт и методы решения / *Н. Н. Теринов, Е. М. Андреева, С. В. Залесов* [и др.] // Известия вузов. Лесной журнал. 2020. № 3. С. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-2
- Исаева Р. П.* Особенности формирования молодняков на сплошных концентрированных вырубках в темнохвойных лесах // Леса Урала и хозяйство в них. 1975. № 8. С. 59–69.
- Исаева Р. П.* Рекомендации по ведению лесного хозяйства на зонально-типологической основе в лесах Свердловской области. Пушкино : ВНИИЛМ, 1984. 56 с.
- Колесников Б. П., Зубарева Р. С., Смолоногов Е. П.* Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск : УНЦ АН СССР, 1973. 275 с.
- Синельщиков Р. Г.* Развитие лесов, формирующихся на еловых вырубках Среднего Урала // Лесное хозяйство. 1966. № 4. С. 24–27.
- Теринов Н. Н.* Метод восстановления темнохвойных лесов // Лесное хозяйство на современном этапе. Новые технологии и научные решения : сб. ст., посвящ. 90-летию Всерос. науч.-исслед. ин-та лесоводства и механизации лесн. хоз-ва. Пушкино : ВНИИЛМ, 2024. С. 62–68.
- Теринов Н. Н.* Метод формирования темнохвойных насаждений // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2013. № 1. С. 64–71.

References

- Isaeva R. P.* Features of the young forests formation in clear concentrated cutting in dark coniferous forests // Forests of the Urals and economy in them. 1975. № 8. P. 59–69. (In Russ.)
- Isaeva R. P.* Forest management recommendations on a zonal-typological basis in the forests of the Sverdlovsk region. Pushkino : ARRIFFM, 1984. 56 p.
- Kolesnikov B. P., Zubareva R. S., Smolonogov E. P.* Forest Site Conditions and Forest Types in Sverdlovsk Region. Sverdlovsk : Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, 1973. 275 p.
- Restoration of Spruce Forests : Theory, National Practice and Problem Solving / *N. N. Terinov, E. M. Andreeva, S. V. Zalesov* [et al.] // News of universities. Forest journal. 2020. № 3. P. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-2 (In Russ.)

- Sinelshchikov R. G.* Forests development forming in spruce cleared areas in the Middle Urals // *Forestry*. 1966. № 4. P. 24–27. (In Russ.)
- Terinov N. N.* Method of restoration of dark coniferous forests // *Forestry at current stage. New technologies and research solutions : collected papers dedicated to 90-th anniversary of the Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry*. Pushkino : ARRIFFM, 2024. P. 62–68. (In Russ.)
- Terinov N. N.* The Method of Formation of Dark-Coniferous Forest Stands // *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry*. 2013. № 1. P. 64–71. (In Russ.)

Информация об авторах

- Николай Николаевич Теринов* – доктор сельскохозяйственных наук,
n_n_terinov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>
- Владимир Васильевич Побединский* – доктор технических наук, профессор,
pobedinskyvv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>
- Эдуард Федорович Герц* – доктор технических наук, доцент,
gerz.e@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>
- Андрей Вениаминович Мехрентцев* – кандидат технических наук, доцент,
mehrentsev@yandex.ru; <https://orsid.org/0000-0002-2186-0152>
- Марина Марселевна Ляхова* – аспирант,
2273397@inbox.ru
- Геннадий Григорьевич Терехов* – доктор сельскохозяйственных наук.
terekhov_g_g@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2312-9224>

Information about the authors

- Nikolay N. Terinov* – Doctor of Agricultural Sciences,
n_n_terinov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>
- Vladimir V. Pobedinskiy* – Doctor of Technical Sciences, Professor,
pobedinskyvv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>
- Edward F. Gerts* – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
gerz.e@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>
- Andrey V. Mekhrentsev* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
mehrentsev@yandex.ru; <https://orsid.org/0000-0002-2186-0152>
- Marina M. Lyakhova* – postgraduate student,
2273397@inbox.ru
- Gennady G. Terekhov* – Doctor of Agricultural Sciences.
terekhov_g_g@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2312-9224>

Статья поступила в редакцию 01.08.2025; принята к публикации 25.11.2025.
The article was submitted 01.08.2025; accepted for publication 25.11.2025.
