

Обоснование выбора математического метода исследования организации строительства лесовозных автомобильных дорог

М.Н. Казачек^{1a}, Д.М. Левушкин^{2b}, Ю.А. Боровлев^{3c}, И.И. Савченко^{4d}, А.С. Сергеев^{5e},
А.А. Скрыпников^{4f}, И.А. Высоцкая^{4g}, А.Ю. Жук^{6h}

¹ Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, Россия

³ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
пр. Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск, Россия

⁴ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия

⁵ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, Пермь, Россия

⁶ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^a marinan@inbox.ru, ^b levushkin@mgul.ac.ru, ^c borovlevury@mail.ru, ^d ilona.savchenko.2016@mail.ru,

^e pnipu_sk@mail.ru, ^f skrypnikovvsafe@mail.ru, ^g i.a.trishina@gmail.com, ^h ftslk@brstu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-7458-1422>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1321-5631>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-0068-5906>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-5487-3987>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>,

^g <https://orcid.org/0000-0001-6521-9570>, ^h <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

Статья поступила 25.10.2023, принята 03.11.2023

Выбор метода исследования очень важен для получения адекватных результатов при решении задач, связанных с совершенствованием проектирования организации строительства (ПОС). Ввиду сложности этих задач часто возникает необходимость применения серьезного математического аппарата. Поэтому в настоящей статье будет дан краткий обзор математических методов, применявшихся при решении задач, связанных с организацией строительства лесовозных автомобильных дорог. Математические методы, применявшиеся при решении задач организации строительства, можно подразделить на два основных класса: детерминированные и стохастические. В свою очередь, детерминированные методы можно условно подразделить на методы аналитического расчета изучаемых параметров исследуемого объекта и методы аналитического моделирования исследуемого объекта, а стохастические методы — также на методы аналитического расчета изучаемых параметров исследуемого объекта и методы имитационного моделирования исследуемого объекта. В результате анализа математических методов исследования можно сделать вывод о том, что метод имитационного моделирования является наилучшим при исследовании сложных организационных систем, так как он позволяет наиболее адекватно по сравнению с другими методами описать объект исследования и, следовательно, получить более точные результаты. Отсюда вытекает, что при автоматизированном ПОС автомобильных дорог для выработки организационных решений и их оценки в качестве рабочего инструмента необходима имитационная модель реализации ПОС автомобильной дороги.

Ключевые слова: лесовозные автомобильные дороги; математические методы; автоматизированное проектирование.

Justification for the choice of a mathematical method for studying the organization of construction of logging roads

M.N. Kazachek^{1a}, D.M. Levushkin^{2b}, Yu.A. Borovlev^{3c}, I.I. Savchenko^{4d}, A.S. Sergeyev^{5e},
A.A. Skrypnikov^{4f}, I.V. Vysotskaya^{4g}, A.Y. Zhuk^{6h}

¹ Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, ul. Timiryazeva 8, Voronezh, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, ul. Baumanskaya 2-ya, 5/1, Moscow, Russia

³ Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry of SB RAS, prospekt Akademika Lavrentyeva, 3, Novosibirsk, Russia

⁴ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue 19, Voronezh, Russia

⁵ Perm National Research Polytechnic University Russian Federation, Komsomolsky pr., 29, Perm, Russia

⁶ Bratsk State University, st. Makarenko, 40, Bratsk, Russia

^a marinan@inbox.ru, ^b levushkin@mgul.ac.ru, ^c borovlevury@mail.ru, ^d ilona.savchenko.2016@mail.ru,

^e pnipu_sk@mail.ru, ^f skrypnikovvsafe@mail.ru, ^g i.a.trishina@gmail.com, ^h ftslk@brstu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-7458-1422>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1321-5631>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-0068-5906>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-5487-3987>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>,

^g <https://orcid.org/0000-0001-6521-9570>, ^h <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

The article was received 25.10.2023, accepted 03.11.2023

The choice of research method is very important for obtaining adequate results when solving problems related to improving the design of construction organizations. Due to the complexity of these problems, there is often a need to use serious mathematical tools. Therefore, this article will give a brief overview of the mathematical methods used in solving problems related to the organization of construction of logging roads. Mathematical methods used in solving construction organization problems can be divided into two main classes: deterministic and stochastic. In turn, deterministic methods can be conditionally divided into methods of analytical calculation of the studied parameters of the object under study and methods of analytical modeling of the object under study, and stochastic methods - also into methods of analytical calculation of the studied parameters of the object under study and methods of simulation modeling of the object under study. As a result of the analysis of mathematical research methods, we can conclude that the simulation method is the best when studying complex organizational systems, since it allows the most adequate description of the research object compared to other methods and, therefore, obtain more accurate results. It follows that in the automated design of the organization of highway construction, in order to develop organizational decisions and evaluate them, a simulation model for the implementation of the highway PIC is required as a working tool.

Key words: logging roads; mathematical methods; computer-aided design.

Введение. Выбор метода исследования очень важен для получения адекватных результатов при решении задач, связанных с совершенствованием проектирования организации строительства. Ввиду сложности этих задач часто возникает необходимость применения серьезного математического аппарата. Поэтому в настоящей статье будет дан краткий обзор математических методов, применявшихся при решении задач, связанных с организацией строительства лесовозных автомобильных дорог.

Постановка задачи. Математические методы, применявшиеся при решении задач организации строительства, можно подразделить на два основных класса: детерминированные и стохастические. В свою очередь, детерминированные методы можно условно подразделить на методы аналитического расчета изучаемых параметров исследуемого объекта и методы аналитического моделирования исследуемого объекта, а стохастические методы — также на методы аналитического расчета изучаемых параметров исследуемого объекта и методы имитационного моделирования исследуемого объекта.

Методика. Примерами работ с применением детерминированных методов аналитического расчета изучаемых параметров могут служить [1–3]. Так, в работах Ю.А. Куликова, Ю.И. Совватеева и Н.А. Мамед-Заде таким методом рассчитываются заделы при взаимоувязке специализированных потоков, а также очередности выполнения работ, планирование труда рабочих и распределение ресурсов.

Следует отметить, что точность расчетов с применением подобных методов чрезвычайно низка, так как, во-первых, при таком подходе нельзя никоим образом учесть воздействие случайных факторов на ход строительного процесса, а во-вторых, весьма приблизительно описываются закономерности функционирования исследуемого объекта, что существенно снижает практическую ценность результатов расчета.

К работам с применением методов аналитического моделирования относятся [4; 5]. В этом случае модель исследуемого объекта представляет собой систему ограничений, а основной задачей является оптимизация величины выбранного критерия оптимальности, выражаемой целевой функцией, с учетом этих ограничений.

П.И. Сорокиным таким методом была решена задача оптимизации основных параметров организации потока земляных работ на группе объектов: был определен качественный и количественный состав комплектов машин, составлен оптимальный план перебазирования машин, определены производительности потоков, себестоимости работ, а также зоны способов разработки грунта по пикетам трассы. В качестве критерия оптимальности использовалась величина общих приведенных затрат на производство земляных работ при максимально возможной в данных условиях (оптимальной) загрузке машин в потоке работ. Модель потока земляных работ представлена системой нелинейных ограничений.

В работах Н.Д. Татенко, В.С. Зверева, В.И. Кочемасова, В.К. Курьянова, В.Н. Макеева, А.В. Скрышниковой предложена модель дорожно-строительного потока представляет собой систему линейных ограничений; целевая функция, выражающая величину экономического эффекта от равномерного использования ресурсов и сокращения сроков ввода в эксплуатацию отдельных участков и всей дороги в целом при круглогодичном строительстве, также линейна. В результате получена задача линейного программирования, которая по причине большой размерности решается методами ветвей и границ и динамического программирования.

М.Б. Селютинной разработан эвристический итерационный алгоритм оптимизации детерминированного сетевого графика по критерию минимизации времени завершения комплекса работ с помощью распределения ресурсов различных видов между работами. При этом были учтены ограничения на количество ресурсов, взаимозаменяемость ресурсов, наличие многоцелевых ресурсов и т. п.

В.А. Хлебниковым была предложена математическая модель для выбора средств возведения земляного полотна, с помощью которой можно определять состав ведущих машин отряда, строящего земляное полотно, с учетом распределения объемов земляных работ по трассе, групп разрабатываемого грунта, производительностей машин. Задача также решается с помощью эвристического алгоритма.

В диссертации Т.В. Бобровой решена задача минимизации функции накопления задела в плановый период в стоимостном выражении, что обеспечивает оптимизацию заделов в натуральных показателях. Ограничения, являющиеся моделью комплексного дорожно-строительного потока, заданы системой линейных неравенств. Задача решается с помощью эвристического алгоритма, в основу которого положены вычислительные схемы динамического программирования.

Решение задачи. На примере этих работ можно оценить многообразие аналитических моделей и предоставляемые ими возможности при исследовании организации строительства. Применение аналитических моделей дает гораздо более точные результаты, чем аналитический расчет интересующих параметров, поскольку таким образом можно достаточно адекватно описать исследуемый объект. Недостатком аналитических моделей является то, что при попытке более точного описания объекта их сложность весьма возрастает, в результате чего задачу оптимизации величины выбранного критерия становится практически невозможно решить точными методами, и необходимо создавать эвристический алгоритм, правильность которого нуждается в доказательстве. Еще один недостаток — невозможность прямого учета и изучения влияния случайных факторов. Это можно сделать лишь косвенным путем.

Примером тому могут служить работы И.С. Николаева и Ю.И. Петрашкевича. Так, в работе решается задача составления оптимального календарного плана строительства нескольких объектов дорожно-строительной организацией. Критери-

ем оптимальности при этом является минимизация отклонений от заданных директивных сроков ввода объектов в эксплуатацию или минимизация продолжительности строительства комплекса объектов. Влияние природных и организационных факторов и изменения интенсивности выполнения работ учитываются только путем задания в исходных данных средних продолжительностей времени безотказной работы и времени простоя, коэффициента, характеризующего влияние административных мероприятий, и доверительной вероятности для каждого из потоков и всех видов работ, ими выполняемых. С помощью этих величин рассчитывается продолжительность выполнения работы потоком и, тем самым, детерминированно учитывается влияние случайных факторов.

В ряде работ отечественных ученых [6–8] представлена сложная «организационно-техническая модель работы парка машин на дорожно-строительных работах годовой программы под воздействием всей совокупности производственных условий с учетом нормативной эксплуатации машин». Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений с ограничениями. Критерием оптимальности внутригодового использования производственной мощности дорожной организации в заданных производственных условиях принят объем ввода лесовозной автомобильной дороги в эксплуатацию. Экономически оптимальный уровень использования производственной мощности дорожной организации при введении резервов определен по критерию суммарных приведенных затрат. Однако учет случайных факторов можно осуществить, задавая на входе модели только их конкретные значения (например, наиболее вероятные и т. п.). Тем не менее, модель показала достаточно хорошую (в пределах 90 %) адекватность реальному процессу дорожного строительства.

Рассмотрим стохастические методы. Они в явном виде учитывают вероятностный характер строительного процесса. Полный перечень и классификация факторов, влияющих на ход строительства, приведены в работах В.М. Лазебника и являются в настоящее время общепринятыми. В работах с использованием стохастических методов обычно учитываются те факторы, которые авторы считают наиболее существенными.

Аналитические стохастические методы расчета предложены в работах [9; 10]. Общей чертой этих методов является то, что учет влияния случайных факторов происходит благодаря участию в расчетах функций распределения (или плотностей распределения) случайных величин значений этих факторов.

В работах О.Б. Билецкого, И.С. Николаева, В.Г. Козлова, А.Н. Брюховецкого, В.А. Зеликова с помощью аналитических расчетов определяются оптимальные величины заделов специализированных потоков, причем целью является минимизация функции потерь, вызываемых простоями из-за отсутствия фронта работ, достижение максимальной производительности комплексного потока. При этом в обеих работах случайные величины времени безотказной работы и времени простоя специализированного потока считаются распределенными экспоненциально.

В предложенном П.Ф. Вайнкофом аналитическом методе расчета календарного плана в качестве случайных величин рассматриваются продолжительности времени выполнения некоторого вида работ ресурсом типа мощности с заданной интенсивностью, а функция распределения общего времени работы рассматриваемого ресурса представлена как композиция функций распределения этих величин.

Сходные методы, позволяющие свести сетевой график к одной эквивалентной ему работе с целью оценки его надежности, описаны в работах Б.М. Томаева и А.А. Гусакова, причем в последних рекомендуется принимать продолжительности работ сетевого графика распределенными согласно нормальному закону.

В работах А.А. Могилевича, Т.В. Бобровой и А.И. Исаковой имеется аналитический алгоритм, который используется для расчета уровня надежности комплексного

потока, для оценки надежности обеспечения АБЗ материалами и надежности выполнения плановых объемов работ последующим потоком в зависимости от обеспечения материалами предыдущего. При этом считается, что интенсивности специализированных потоков и их случайная наработка к моменту критического сближения распределены асимптотически нормально, на основе чего определяются функции распределения случайных величин объемов работ, выполненных потоками к моментам критического сближения. Принято, что сменная производительность специализированного потока и интенсивность потребления им материала в смену подчиняются закону бета-распределения.

Широкое распространение приобрели различные аналитические методы расчета вероятностных сетевых графиков.

Возможность учета влияния случайных факторов на ход строительного процесса — несомненное достоинство аналитических стохастических методов. Однако им присущ недостаток всех аналитических методов: при попытке учета нескольких случайных величин для повышения точности результатов сложность вычислений резко возрастает из-за необходимости расчета большого числа сверток функций плотностей распределения и произведений функций распределения рассматриваемых случайных величин.

Поэтому в настоящее время основные позиции в исследованиях сложных систем завоевывает метод имитационного моделирования. В основе этого метода лежит имитационное моделирование с применением современных компьютерных технологий процесса функционирования исследуемого объекта с имитацией воздействия случайных факторов путем реализации их значений с помощью различных датчиков случайных чисел. Имитационные модели свободны от недостатков, присущих аналитическим, и с их помощью при условии достаточной адекватности модели можно получать гораздо более точные сведения о различных сторонах исследуемого процесса.

Особенно эффективно использование имитационных моделей при исследовании сложных организационных систем, имеющих самые разные структуры и целевые назначения. При этом можно обеспечить достаточную адекватность реальному процессу независимо от его природы при условии строгого учета его основных закономерностей. Например, в ряде работ отечественных ученых [11–13] описывается имитационная модель, разыгрывающая возможные реализации политических ситуаций как в настоящем, так и в будущем при заданной расстановке политических сил.

Г.А. Федотов предлагает использовать на стадии разработки проекта автомобильной дороги имитационную модель транспортных потоков «для сравнения принципиальных вариантов проектных решений по степени удовлетворения ими наилучших условий движения». С помощью этой модели проектировщик может устанавливать основные показатели проектируемой дороги: пропускную способность, уровень удобства движения, показатели потенциальной опасности движения, скорость сообщения, транспортные расходы.

Общие принципы и приемы имитационного моделирования сложных систем описаны в работах [14; 15]. Особо следует выделить монографию Ю.А. Куликова, в которой дан обширный обзор развития имитационного моделирования (в частности, в строительстве). Кроме того, приведены имитационные модели реализации производственного потенциала отрасли, целевых строительных программ, а также имитационно-диалоговая система формирования решений по организации и управлению строительством.

Имитационные модели использовались при решении задач организации строительства авторами работ [16; 17].

Первыми из них следует признать имитационные модели специализированного потока, созданные О.Б. Билецким, в которых поток рассматривается как многофазная система массового обслуживания (СМО) с очередью. Количество фаз СМО соот-

ветствовало количеству частных потоков, входящих в состав специализированного. Н.А. Караем также разработана имитационная модель, в которой комплексный дорожно-строительный поток представлен как СМО специального вида.

Моделирование процесса функционирования комплексного дорожно-строительного потока, состоящего из нескольких специализированных потоков, осуществлено в работах И.С. Николаева, В.М. Могилевича и Т.В. Бобровой.

Довольно большое количество работ посвящено моделированию реализации календарных планов и сетевых графиков. Среди них прежде всего следует отметить имитационную модель расчета календарного плана возведения строительных объектов и комплексов, предлагаемую А.А. Гусаковым, Ю.А. Куликовым и др. в работах [18]. Аналогичные модели были созданы В.С. Резниченко, И.Г. Галкиным, Л.А. Афониным [19; 20].

В ряде работ отечественных ученых описана система имитационного моделирования, предназначенная для прогнозирования продолжительности строительства с учетом множества факторов, таких как погодные условия, переделки в работе, изменения в проектных решениях и т. д. Отличительной особенностью этой системы является одновременный учет большого количества факторов, оказывающих влияние на выполнение графика производства работ. Были выявлены факторы, влияющие на продолжительность строительства, оценена степень их совместного влияния и осуществлена имитация этого влияния с образованием альтернативных сроков выполнения строительства и оценкой вероятности выполнения строительства в заданный срок.

А.П. Канин в целях улучшения оперативно-производственного планирования дорожно-ремонтных работ разработал имитационную модель производственного процесса по ремонту и содержанию дорог. В основу имитационной модели положено представление производственного процесса как сложной динамической вероятностной системы «ресурсы – объекты работ». Каждому элементу моделируемой системы ставится в соответствие кусочно-линейный агрегат.

При создании имитационных моделей сложных объектов неизбежно принятие ряда допущений и условностей, упрощающих описание объекта моделирования. И здесь необходимо проследить за тем, чтобы вследствие принятых упрощений не нарушилась адекватность модели. С другой стороны, более детальное описание объекта, хоть и повышает адекватность модели, существенно усложняет саму модель. Поэтому требуется выбор некоторого рационального в этом плане варианта, что не всегда учитывалось составителями моделей, которые часто шли по пути их чрезмерного упрощения.

Важна также проблема выбора объекта моделирования, ибо от этого зависит практическая ценность модели. Примером не очень удачного выбора объекта моделирования может служить модель, приведенная в диссертационной работе С.П. Орешина. Она имитирует работу отряда, принимающего участие в строительстве земляного полотна автомобильной дороги. Ведущими машинами отряда являются экскаваторы. Целью ставится определение оптимального состава комплекта машин отряда по критерию минимизации суммарных приведенных затрат на выполнение работ или минимизации трудоемкости работ.

Результаты. Очевидно, что оптимизация состава одного отдельно взятого отряда бесполезна с практической точки зрения, так как строительство земляного полотна может осуществляться несколькими отрядами, ведущими машинами которых могут служить не только экскаваторы, но также скреперы и бульдозеры, состав отрядов непостоянен, так как может происходить передача технологических машин от одного отряда другому и т. п.

Отдельного внимания заслуживают имитационные модели процесса скоростного строительства дорожных одежд как

наиболее прогрессивного и перспективного способа дорожного строительства. В описании таких моделей, созданных американскими дорожниками, обсуждается имитационная модель процесса скоростного бетонирования автострад, позволяющая определять его различные параметры при варьированных производительностях смесительных установок, скоростях транспортировки смесей и размерах парка автомобилей-самосвалов, осуществляющих их транспортировку.

Ими же рассматривается имитационная модель выполнения строительных операций и, в частности, ее применение при моделировании процесса устройства цементобетонного покрытия двумя комплектами со скользящими формами с использованием двух смесительных установок для приготовления цементобетонной смеси. Показано, что с помощью модели можно исследовать влияние количества комплектов на стоимость строительства.

Аналогичные модели создавались в отечественными учеными Н.В. Заешвили, В.А. Хлебниковым и Б.И. Файном. Авторами реализована имитационная модель устройства основания и покрытия автомобильной дороги комплектом высокопроизводительных машин. Отличительной особенностью модели является то, что основное внимание уделено моделированию именно рациональной организации работ с учетом большого количества факторов. Это следует отметить, так как ни в одной из рассмотренных выше моделей исследуемый процесс не был описан столь подробно. Однако моделью не учитывается фактор наличия задела земляного полотна для обеспечения фронтом работ профилировщика при устройстве укрепленного основания, а также специфика лесовозных автомобильных дорог.

Б.И. Файном разработана имитационная модель поточного скоростного строительства, в которой рассматриваются отряды, входящие в состав производственно-транспортного комплекса строительства дорожной одежды, ведущими машинами которого являются экскаваторы. Но, поскольку эта имитационная модель была ориентирована только на изучение работы производственно-транспортного комплекса, она не дает достаточно полного представления о процессе скоростного строительства. В частности, по причине узкой ориентации модели в ней не учтено, что в строительстве земляного полотна автомобильной дороги высокой категории обычно принимает участие не один, а несколько отрядов, ведущими машинами которых не обязательно являются экскаваторы. Кроме того, модель является слишком схематичной для описания столь сложного процесса.

Итак, в результате анализа математических методов исследования можно сделать вывод о том, что метод имитационного моделирования является наилучшим при исследовании сложных организационных систем, так как он позволяет наиболее адекватно, по сравнению с другими методами, описать объект исследования и, следовательно, получить более точные результаты. Отсюда вытекает, что при автоматизированном проектировании организации строительства автомобильных дорог для выработки организационных решений и их оценки в качестве рабочего инструмента необходима имитационная модель реализации ПОС автомобильной дороги. При этом необходимо, чтобы исследуемый процесс строительства был охвачен с достаточной полнотой. В то же время, требуется четко ограничить те факторы, которые будет учитывать эта имитационная модель так, чтобы обеспечить достаточную ее адекватность и, в то же время, не переусложнить ее, поскольку это может повлечь значительное увеличение времени прогона модели на ЭВМ.

Выводы. На основании анализа работ можно сделать следующие выводы.

1. При проектировании организации строительства лесовозных автомобильных дорог необходимо применять экономико-математические методы, так как использование укрупненных нормативов ухудшает качество ПОС. Необходимо создание интеллектуально-информационной системы автома-

тизированного проектирования организации строительства лесовозных автомобильных дорог.

2. Использование при решении задач проектирования организации строительства величины уровня надежности организационной системы в качестве критерия оптимальности или в ограничениях — неправомерно.

3. Продолжительность строительства магистральной лесовозной автомобильной дороги должна определяться в ПОС оптимальным образом, в комплексе с другими организационными решениями.

4. Метод имитационного моделирования является наилучшим при исследовании сложных организационных систем, так

как он позволяет наиболее адекватно, по сравнению с другими методами, описать объект исследования и, значит, получить более точные результаты.

5. В качестве инструмента для разработки ПОС лесовозных автомобильных дорог необходимо создание имитационной модели реализации ПОС лесовозной автомобильной дороги. В целях обеспечения достаточной полноты модели она должна охватывать работу отрядов, возводящих земляное полотно, автотранспортных средств, комплектов машин для строительства дорожной одежды и смесительных установок.

Литература

1. Кукин В.Д., Кузина В.И. Задача Штейнера и методика проектирования лесотранспортных сетей: сб. тр. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. Вып. 1. С. 71-81.
2. Громская Л.Я. Обоснование рациональной структуры и размещения сети лесных автомобильных дорог на базе геоинформационных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 2011. 20 с.
3. Борисов Г.А., Земляченко В.Н., Сидоренко Г.И. Способ трассирования лесовозных дорог // Методы автоматизированного проектирования транспортных сетей. Петрозаводск: КарФ АН СССР, 1989. 126 с.
4. Antunes A., Seco A., Pinto N. An Accessibility-Maximization Approach to Road Network Planning // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Maiden: Blackwell Publishing, 2003. V. 18. P. 224-240.
5. Борисов Г.А., Кукин В.Д., Кузина В.И. Методы поиска наилучшего варианта сети лесовозных дорог // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2001. № 3. С. 64-70.
6. Ананьев В.А., Асикайнен А., Вялккю Э. Промежуточное пользование лесом на Северо-Западе России. Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии, 2005. 150 с.
7. Герасимов Ю.Ю., Давыдков Г.А., Кильпелайнен С.А., Соколов А.П., Сюньев В.С. Перспективы применения новых информационных технологий в лесном комплексе // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2003. № 5. С. 122-128.
8. Питухин А.В., Петров А.Н. Расчёт дорожных конструкций лесовозных автомобильных дорог // Транспортное дело России. 2011. № 1 (86). С. 120-123.
9. Ковалев Р.Н., Гуров С.В. Планирование транспортных систем лесных предприятий в условиях многоцелевого лесопользования. Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. лесотехн. акад., 1996. 252 с.
10. Смирнов М.Ю., Андрианов Ю.С. Весовой контроль на автомобильных дорогах. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. 118 с.
11. Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. Принятие оптимальных решений в лесном комплексе. Йоэнсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1999. 200 с.
12. Антонова Т.С. Обоснование методики размещения лесосек и транспортного освоения лесов лесозаготовительного предприятия на базе геоинформационных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 2012. 20 с.
13. Стуков В.П. Транспортные сети автомобильных дорог для освоения лесных массивов // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 1999. № 4.1. С. 69-71.
14. Шегельман И.Р. Лесная промышленность и лесное хозяйство: словарь. 4-е изд., перераб. и доп. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 278 с.
15. Бавбель Е.И., Лыщик П.А. Обоснование размещения лесотранспортных сетей // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2009. № 4.1. С. 82-88.
16. Мохирев А.П., Болотов О.В. Автоматизированное проектирование и оптимизация транспортной схемы освоения лесосырьевой базы [Электронный ресурс]. URL: http://science-bsea.bgita.ru/2003/leskomp_2003/mohirev.htm (дата обращения: 08.11.2023).
17. Соколов А.П., Герасимов Ю.Ю. Геоинформационная система для решения оптимизационной задачи транспортной логистики круглых лесоматериалов // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2009. № 3. С. 78-85.
18. Буторин Н.Н. Трассирование дороги по карте на экране монитора // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2007. № 2. С. 70-73.
19. ВСН 01-82. Инструкция по проектированию лесозаготовительных предприятий. Л.: Минлесбумпром СССР, 1982. 188 с.
20. Интенсивное лесопользование для России: опыт инноваций проекта «Пековский модельный лес». СПб., 2010. 184 с.

References

1. Kukin V.D., Kuzina V.I. Steiner's task and the method of designing forest transport networks: sb. tr. Petrozavodsk: KarNC RAN, 1994. Vyp. 1. P. 71-81.
2. Gromskaya L.YA. Substantiation of the rational structure and location of the forest highway network based on geoinformation systems: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01. SPb., 2011. 20 p.
3. Borisov G.A., Zemlyachenko V.N., Sidorenko G.I. Method of tracing logging roads // Methods of computer-aided design of transport networks. Petrozavodsk: KarF AN SSSR, 1989. 126 p.
4. Antunes A., Seco A., Pinto N. An Accessibility-Maximization Approach to Road Network Planning // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Maiden: Blackwell Publishing, 2003. V. 18. P. 224-240.
5. Borisov G.A., Kukin V.D., Kuzina V.I. Methods of searching for the most advantageous variant of the logging road network // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2001. № 3. P. 64-70.
6. Anan'ev V.A., Asikajnen A., Vyal'kkyu E. Anan'ev V.A., Asikajnen A., Vyal'kkyu E. Intermediate use of forest in the North-West of Russia. Joensuu: NII lesa Finlyandii, 2005. 150 p.
7. Gerasimov YU.YU., Davydov G.A., Kil'pelyajnen S.A., Sokolov A.P., Syunyov B.C. Prospects for the application of new information technologies in the forest complex // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2003. № 5. P. 122-128.
8. Pituhin A.B., Petrov A.N. Calculation of road structures of logging roads // Transport business of Russia. 2011. № 1 (86). P. 120-123.
9. Kovalev R.N., Gurov S.V. Planning of transport systems of forest enterprises in conditions of multi-purpose forest management. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skoj gos. lesotekhn. akad., 1996. 252 p.
10. Smirnov M.YU., Andrianov YU.S. Weight control on highways. Joshkar-Ola: MarGTU, 2002. 118 p.
11. Andreev V.N., Gerasimov YU.YU. Making optimal decisions in the forest complex. Joensuu: Izd-vo un-ta Joensuu, 1999. 200 p.
12. Antonova T.S. Antonova T.S. Substantiation of the methodology for the placement of cutting areas and transport development of forests of a logging enterprise based on geoinformation systems: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01. SPb., 2012. 20 p.
13. Stukov V.P. Transport networks of highways for the development of forests // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 1999. № 4.1. P. 69-71.
14. Shegel'man I.R. Forest industry and forestry: slovar'. 4-e izd., pererab. i dop. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2008. 278 p.
15. Bavbel' E.I., Lyschik P.A. Justification of the placement of forest transport networks // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2009. № 4.1. P. 82-88.
16. Mohirev A.P., Bolotov O.V. Computer-aided design and optimization of the transport scheme for the development of the forest resource base [Elektronnyj resurs]. URL: http://science-bsea.bgita.ru/2003/leskomp_2003/mohirev.htm (data obrashcheniya: 08.11.2023).
17. Sokolov A.P., Gerasimov YU.YU. Geoinformation system for solving the optimization problem of round timber transport logistics // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2009. № 3. P. 78-85.
18. Butorin H.H. Tracing the road on the map on the monitor screen // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2007. № 2. P. 70-73.
19. VSN 01-82. Instructions for the design of logging enterprises. L.: Minlesbumprom SSSR, 1982. 188 p.
20. Intensive forest management for Russia: innovation experience of the Pskov Model Forest project. SPb., 2010. 184 p.