

## Оптимизационная модель функционирования транспортно-технологического процесса поставки лесопродукции с учетом влияния факторов стохастической неопределенности

А.М. Газизов<sup>1а</sup>, И.М. Еналеева-Бандура<sup>2б</sup>, А.Н. Баранов<sup>2с</sup>, С.А. Бровкин<sup>2д</sup>, В.А. Иванов<sup>3е</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>а</sup> ashatzgaz@mail.ru, <sup>б</sup> melnikov1978@inbox.ru, <sup>с</sup> aleksandr-baranov-55@mail.ru, <sup>д</sup> worb1@mail.ru, <sup>е</sup> ivanovva55@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7940-8444>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1333-6235>,

<sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6745-4523>, <sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>

Статья поступила 25.10.2023, принята 20.11.2023

*На сегодняшний день производственная среда функционирования потоковых процессов предприятий лесной отрасли, в том числе и процесса транспортировки лесопродукции от поставщиков до потребителей, характеризуется большой долей стохастической неопределенности (случайности), которая порождает различные отраслевые риски. В результате воздействия данных рисков на транспортно-технологический процесс поставки лесоматериалов обозначается существенное отклонение фактических технико-экономических показателей от плановых, что является одной из основных причин неэффективности организации и управления перевозочным процессом. Учитывая вышеотмеченное, можно утверждать, что существует необходимость учета стохастической составляющей при создании методов, моделей и алгоритмов, призванных оптимизировать транспортно-технологический процесс поставки лесопродукции. В этой связи в статье рассмотрена сущность транспортно-технологического процесса поставки лесопродукции; определены аспекты влияния стохастической неопределенности на процесс транспортировки лесных грузов; произведен анализ научных трудов в области математического моделирования в стохастической постановке; определена и охарактеризована свойственная структура процесса транспортировки лесоматериалов; на базе выработанной свойственной структуры и анализа научной литературы по данной проблематике разработана математическая модель функционирования транспортно-технологического процесса доставки лесоматериалов в условиях стохастической неопределенности. В основу разработанной модели положены элементы теории вероятности и комбинаторики, методы линейного и динамического программирования, а также системный и отраслевой подходы; отмечены преимущества разработанной модели и даны рекомендации по ее практическому использованию.*

**Ключевые слова:** факторы стохастической неопределенности; транспортно-технологический процесс; лесопродукция; лесная отрасль; математическая модель.

## Optimization model of the functioning of the transport and technological process for the supply of forest products considering the influence of stochastic uncertainty factors

A.M. Gazizov<sup>1а</sup>, I.M. Enaleeva-Bandura<sup>2б</sup>, A.N. Baranov<sup>2с</sup>, S.A. Brovkin<sup>2д</sup>, V.A. Ivanov<sup>3е</sup>

<sup>1</sup> Ural State Forest Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy St., Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>а</sup> ashatzgaz@mail.ru, <sup>б</sup> melnikov1978@inbox.ru, <sup>с</sup> aleksandr-baranov-55@mail.ru, <sup>д</sup> worb1@mail.ru, <sup>е</sup> ivanovva55@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7940-8444>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1333-6235>,

<sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6745-4523>, <sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>

Received 25.10.2023, accepted 20.11.2023

*To date, the production environment for the functioning of the flow processes of forest industry enterprises, including the process of transporting forest products from suppliers to consumers, is characterized by a large share of stochastic uncertainty (randomness), which generates various industry risks. As a result of the impact of these risks on the transport and technological process of timber supply, a significant deviation of the actual technical and economic indicators from the planned ones is determined, which is one of the main reasons for the inefficiency of the organization and management of the transportation process. Considering the above, it can be argued that there is a need to take into account the stochastic component when creating methods, models and algorithms designed to optimize the transport and technological process of supplying forest products. In this regard, the article considers the essence of the transport and technological process of supplying forest products; aspects of the influence of stochastic uncertainty on the process of*

*transporting timber cargoes are determined; the analysis of scientific papers in the field of mathematical modeling in a stochastic formulation is carried out; the specific structure of the timber transportation process is determined and characterized; on the basis of the developed characteristic structure and analysis of scientific literature on this issue, a mathematical model of the functioning of the transport and technological process of delivering timber under conditions of stochastic uncertainty is developed. The developed model is based on elements of probability theory and combinatorics, methods of linear and dynamic programming, as well as system and sectoral approaches. The advantages of the developed model are noted and recommendations for its practical use are given.*

**Keywords:** factors of stochastic uncertainty; transport and technological process; forest products; forest industry; mathematical model.

**Введение.** В современных экономических условиях лесная отрасль характеризуется наличием большого количества различных отраслевых проблем, в основном инфраструктурных, к которым следует отнести недостаточную транспортную и энергетическую обеспеченность, а также низкий уровень развития дорожной инфраструктуры на территориях лесного фонда. Наряду с указанными проблемами, порождающими сбои в работе предприятий лесного комплекса, имеет место экономическая нестабильность, которая образуется в большей степени посредством негативного влияния факторов стохастической неопределенности внутренней и внешней производственной среды на технологические процессы лесной отрасли в целом и транспортно-технологический процесс поставки лесопроductии в частности. Негативное влияние факторов стохастической неопределенности на транспортно-технологический процесс поставки лесопроductии обуславливается довольно весомым отклонением под воздействием различных случайных явлений производственной среды фактических технико-экономических показателей функционирования процесса от плановых. Данное обстоятельство влечет за собой неэффективность функционирования процесса транспортировки лесных грузов. В этой связи обозначается необходимость углубления теоретических исследований в целях выработки практически применимых новых подходов к организации и управлению процессом транспортировки через создание новых моделей на базе отраслевого подхода в стохастической постановке с учетом динамической составляющей.

**Объекты и методы исследования.** Под транспортно-технологическим процессом (ТТП) поставки лесопроductии от производителей до потребителей следует понимать сложную структуру, состоящую из множества взаимозависимых звеньев, к которым относятся пункты заготовки древесины (пункты отправления); перевалочные пункты и терминалы (нижние склады предприятия, склады сезонного хранения, перевалочные пункты, прирельсовые склады и т. д.); потребители (пункты назначения древесины); транспортные связи между всеми пунктами отправления, перевалки, хранения и потребления [1; 2]. Причем все отмеченные элементы структуры транспортно-технологического процесса предприятий лесной отрасли имеют динамический характер и тесно сопряжены с воздействием возможных негативных явлений, заданных случайными величинами в функционировании процесса транспортировки. Данные величины в научной литературе [3–5; 6] принято определять как неопределенность стохастического характера, или стохастическую составляющую. Стохастическая составляющая транспортно-технологического процесса поставки лесопроductии вытекает из его специфических характеристик, таких как сезонность заготовок; использование различных видов транспортных средств; колебание запасов лесоматериалов, цен и тарифов; большая территориальная разобщенность; широкая номенклатура видов перевозимой лесопроductии, начиная непосредственно, с мест лесозаготовки; зависимость от природных условий и т. п. (рис. 1).



**Рис. 1.** Влияние стохастической неопределенности на транспортно-технологический процесс поставки лесопроductии

Исходя из анализа материала, представленного на рис. 1, специфические особенности функционирования ТТП предприятий лесной отрасли находятся в тесном сопряжении с факторами стохастической неопределенности внутренней и внешней производственной среды функционирования данного процесса.

Таким образом, пренебрежение учетом отмеченной неопределенности при управлении процессом транспортировки может привести к катастрофическим последствиям в аспекте финансовой устойчивости предприятий — как поставщиков, так и потребителей лесопродукции. Поэтому процесс транспортировки лесных грузов нуждается в оптимизации с учетом отмеченных условий. Реализация указанной оптимизации возможна посредством применения того или иного методологического аппарата, в основе которого лежит определенный инструмент или их комбинация.

На сегодняшний день в научной литературе [1; 3–16] существует множество трудов, направленных на поиск путей эффективного моделирования функционирования технологических процессов в условиях стохастической неопределенности с учетом динамики как самого процесса, так и производственной среды, в которой функционирует данный процесс.

Посредством анализа указанных научных работ:

- выявлено, что применение в качестве ключевых инструментов деревьев принятия решений и основанное на их анализе планирование сценариев, данное утверждение касается математических моделей [11];

- определено, что отмеченные оптимизационные математические модели в основном имеют детерминированный характер, т. е. динамика моделируемого процесса учитывается множественностью различных сценариев, что не является верным, так как уходящее в бесконечность количество сценариев исключает практическую адекватность подобных моделей [4];

- установлено, что данные модели в основном характеризуются множественностью входных параметров (факторный набор) без учета степени их влияния на технологический процесс (первостепенные либо второстепенные, которыми в принципе можно пренебречь, согласно источнику [1]);

- раскрыто, что в основе подобных моделей редко лежит отраслевой подход к объекту исследования, а также нечасто встречаются аналитическая формализация данных моделей и линейная зависимость между переменными, входящими в модель [5–7; 9; 14];

- определено, что в целях оптимизации технологических процессов лесной отрасли подобные модели используются пока еще недостаточно активно. Хотя, в рамках оптимизации процесса транспортировки лесных грузов, проработка различных сценариев транспортировки позволит дать ответ на вопрос о том, какими дополнительными ресурсами необходимо располагать для выполнения плана поставки, эффективного управления запасами, а также рационализации маршрутов перевозок [14; 17];

- выявлено, что надежная, универсальная и простая в практическом применении модель, оптимизирующая процесс транспортировки лесопродукции в условиях стохастической неопределенности с учетом динамики данного процесса на базе отраслевого подхода, в научной литературе отсутствует.

В этой связи очевидна необходимость данной разработки. В целях выработки адекватной к реалиям производственной среды оптимизационной математической модели следует охарактеризовать свойственную структуру процесса транспортировки лесопродукции и определить аспекты моделирования ее элементов [4–6; 15; 18–23].

На основе анализа источников [3; 4–6; 7–14] и отмеченного выше, указанная структура является интегрированной, состоящей из трех элементов (составляющих): детерминированной, динамической и стохастической (рис. 2).



**Рис. 2.** Характеристика свойственной структуры транспортно-технологического процесса предприятий лесной отрасли

Каждая составляющая имеет собственные свойства и отличительные характеристики, данные составляющие находятся между собой в синергетических связях и оказывают друг на друга непосредственное влияние. Относительно отмеченного влияния следует отметить, что свойственная структура транспортно-технологического процесса поставки лесоматериалов (ТТП) имеет иерархический характер, при котором указанные выше составляющие структуры ТТП, имеют принадлежность к определенному уровню.

Первый уровень представляет собой детерминированные показатели указанного процесса, второй уровень задается динамическими показателями ТТП, которые описывают движение детерминированных (статичных) показателей во времени и пространстве, и третий уровень, который определен наличием в процессе транспортировки стохастической составляющей, — данная составляющая оказывает влияние как на динамические показатели, так и на детерминированные. Как отмечалось ранее, данное влияние приносит существен-

ное отклонение фактических показателей функционирования ТТП от плановых.

В этой связи данная нами характеристика свойственной структуры, в основе которой лежит иерархический характер ее составляющих, должна стать базисом создания и гарантом большей адекватности к реалиям производственной среды, подлежащего выработке методологического аппарата, призванного обеспечить повышение эффективности процесса транспортировки лесных грузов.

С учетом вышеизложенного ниже представлена авторская разработка, содержащая в себе подробное описание всех зависимостей, входящих в целевую функцию и систему ее ограничений.

**Результаты и обсуждение.** Разработка оптимизационной модели функционирования транспортно-технологического процесса поставки лесопродукции с учетом влияния факторов стохастической неопределенности основана на вероятностном подходе к функционированию системы «поставщик – транспорт – потребитель», при котором предполагается, что элементы структуры транспортных потоков задаются случайным образом, посредством влияния факторов стохастической неопределенности производственной среды и подлежат изменениям во времени и пространстве. Набор указанных факторов и вариации их комбинирования определяют количество сценариев функционирования структуры транспортных потоков. Любой из множества возможных сценариев функционирования отмеченной структуры может проявиться в реалиях случайным образом, данное обстоятельство наделяет отмеченную структуру случайным характером, проявление в реалиях какого-либо из множества обозначенных сценариев представляет собой ее математическое ожидание. Математическое ожидание возникновения случайной  $k$ -й структуры транспортных потоков определяется согласно выражению (1):

$$\begin{cases} M[\xi = F_k] = \sum_{k=1}^K F_k \cdot P_k \\ P_k = \lim_{K \rightarrow \infty} k/K \\ K = \frac{(l+r-1)!}{r!(l-1)!} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $M[\xi = F_k]$  — математическое ожидание возникновения случайной  $k$ -й структуры транспортных потоков,  $k \in (1, \dots, K)$ ,  $p$ . При возникновении множественных сценариев  $k$  математическое ожидание может быть равно среднегеометрической величине  $M[F_k] = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^K F_k}$ ;  $K$  — количество сценариев формирования структуры транспортных потоков;  $l$  — общее количество факторов стохастической неопределенности, выбранных в качестве основных, оказывающих влияние на транспортно-технологический процесс предприятий лесной отрасли;  $r$  — количество факторов стохастической неопределенности в  $k$ -м сценарии формирования структуры транспортных потоков (неупорядоченная выборка с возможными повторениями из  $l$ );  $F_k$  — структура организации процесса транспортировки лесопродукции в зависимости от сценария  $k$ ,  $p$ ;  $P_k$  — вероятность возникновения  $k$ -го сценария формирования структуры транспортных потоков, причем каждый  $k$ -й сценарий из количества сценариев  $K$  может возникнуть только один раз.

Определение оптимальной структуры организации процесса транспортировки лесопродукции ставится как задача поиска минимума целевой функции  $F_k(t)$ , соответственно, данная функция представляет собой совокупную величину издержек предприятия потребителя на приобретение лесопродукции. Указанный показатель генерирует в себе следующие составляющие:

–  $F_{k1}(t)$  — издержки на приобретение лесопродукции (закупочная цена за  $1 \text{ м}^3$  по видам лесопродукции у  $i$ -го поставщика) в период времени  $t = 0, \dots, T, p$ ;

–  $F_{k2}(t)$  — издержки на хранение нереализованного  $j$ -му потребителю объема по видам лесопродукции, образующегося у  $i$ -го поставщика в период времени  $t, p$ . Также данный показатель учитывает потери прибыли  $i$ -го поставщика в результате нереализации лесного продукта;

–  $F_{k3}(t)$  — издержки, образующиеся в результате сбоя производственной программы у  $j$ -го потребителя ввиду поставки по видам лесопродукции от  $i$ -го поставщика позже нормативного времени на доставку, в период времени  $t, p$ .

Формализация определения отмеченных величин, также по своей сути являющихся интегральными, в аналитическом виде имеет следующий вид:

$$F_{k1}(t) = \int_{t=0}^T (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{d=1}^D [C_i(t) + C_{ij}^{TP}(t)] \cdot X_{ij}(t)) dt, \quad (2)$$

где  $C_i$  — закупочная цена за  $1 \text{ м}^3$  по видам лесопродукции у  $i$ -го поставщика, в период времени  $t, p$ ;  $C_{ij}^{TP}$  — транспортные издержки на доставку  $1 \text{ м}^3$  по видам лесопродукции от  $i$ -го поставщика  $j$ -му потребителю, в период времени  $t, p$ ;  $i$  — поставщик лесопродукции,  $i \in \{1, \dots, m\}$ ;  $j$  — потребитель лесопродукции (дилер, оптовый посредник,  $j \in \{1, \dots, n\}$ );  $d$  — вид подвижного состава,  $d \in \{1, \dots, D\}$ ;  $r$  — вид лесопродукции,  $r \in \{1, \dots, R\}$ ;  $X_{ij}$  — объем лесопродукции, доставляемой  $j$ -му потребителю от  $i$ -го поставщика, в период времени  $t, \text{ м}^3$ :

$$F_{k2}(t) = \int_{t=0}^T (\sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R [C_i^*(t) + \Pi_i \cdot \Delta t_i] \cdot U_i(t)) dt, \quad (3)$$

где  $C_i^*$  — издержки на хранение  $1 \text{ м}^3$  по видам лесопродукции у  $i$ -го поставщика, в период времени  $t, p$ ;  $\Pi_i$  — потери прибыли  $i$ -го поставщика в результате нереализации лесного продукта в период времени  $t, p$ ;  $\Delta t$  — временной интервал хранения нереализованного объема по видам лесопродукции, дней;  $U_i$  — объем по видам лесопродукции, подлежащей хранению, в период времени  $t, \text{ м}^3$ ;

$$F_{k3}(t) = \int_{t=0}^T (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{d=1}^D C_j^{**}(t) \cdot X_{ij}^*(t) \cdot \Delta t^*) dt, \quad (4)$$

где  $C_j^{**}$  — издержки, образующиеся в результате сбоя производственной программы у  $j$ -го потребителя от доставки лесопродукции позже нормативного времени от  $i$ -го поставщика на  $1 \text{ м}^3$  по видам лесопродукции, в период времени  $t, p$ ;  $X_{ij}^*$  — объем лесных продуктов по видам лесопродукции, доставленной позже нормативного времени от  $i$ -го поставщика  $j$ -му потребителю, в период времени  $t$ , по видам подвижного состава,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta t^*$  — временной интервал запаздывания доставки по видам подвижного состава.

Соответственно, показатель выручки лесозаготовителей представляет собой величину  $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_i(t) \cdot X_{ij}(t) - F_{k2}(t)$ , а показатель затрат потребителей может быть описан величиной  $F_{k1}(t) + F_{k3}(t)$  в период времени  $t$ . Тогда среднеквадратическое отклонение каждого из сценариев функционирования транспортно-технологического процесса поставки лесопродукции от среднего значения данных сценариев в период времени  $t$  будет определяться выражением:

$$\begin{cases} \sigma_6 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \left[ \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D C_i(t) \cdot X_{ij}(t) - F_{k2}(t) \right)_k - \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D C_i(t) \cdot X_{ij}(t) - F_{k2}(t) \right)_{cp} \right]^2}{K}} \\ \sigma_3 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \left[ \sum_{d=1}^D (F_{k1}(t) + F_{k3}(t))_k - \sum_{d=1}^D (F_{k1}(t) + F_{k3}(t))_{cp} \right]^2}{K}} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $\sigma_6$  — среднее квадратическое отклонение выручки поставщиков лесопroduкции по  $k$ -м сценариям;  $\sigma_7$  — среднее квадратическое отклонение затрат потребителей лесопroduкции по  $k$ -м сценариям.

Показатели среднее квадратическое отклонения определяют меру погрешности в экспериментальных расчетах.

Практическая реализация разработанной авторской модели возможна при следующих ограничениях:

1. Детерминированной сбалансированной связи объемов производства и потребления:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{d=1}^D X_i(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D X_j(t), \quad (6)$$

где  $X_i(t)$  — объем лесного продукта по видам лесопroduкции, произведенный  $i$ -м поставщиком, в период времени  $t$ ,  $m^3$ ;  $X_j(t)$  — объем лесного продукта по видам лесопroduкции, необходимый для качественной реализации производственной программы  $j$ -му потребителю, в период времени  $t$ ,  $m^3$ .

2. По естественным причинам не отрицательного значения показателей структуры организации процесса транспортировки лесопroduкции (объемов, запасов, единиц подвижного состава):

$$X_{ij}(t) \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$U_j(t) \geq 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (8)$$

3. Динамики ТТП поставки лесопroduкции:

$$\sum_{d=1}^D X'_{ij}(t) = \sum_{d=1}^D X''_{ij}(t + t_{ij}), \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; t = 0, \dots, T, \quad (9)$$

где  $X'_{ij}$  — объем лесного продукта по видам доставляемой лесопroduкции от  $i$ -го поставщика  $j$ -му потребителю, в период времени  $t$ ,  $m^3$ ;  $X''_{ij}$  — объем лесного продукта по видам доставленной лесопroduкции  $j$ -му потребителю от  $i$ -го поставщика, в период времени  $(t + t_{ij})$ ,  $m^3$ ;  $t_{ij}$  — нормативное время доставки, дней.

4. Динамической связи складских запасов поставщиков и потребителей:

$$\sum_{d=1}^D U_i(t + 1) = \sum_{d=1}^D U_i(t) + \sum_{i=1}^m \sum_{d=1}^D X_{ip}(t) - \sum_{d=1}^D X_j(t), \quad (10)$$

где  $X_{ip}(t)$  — объем лесного продукта по видам лесопroduкции, прибывающей на склады  $i$ -го поставщика, т. е. формирование запаса, на период времени  $t$ ,  $m^3$ ;  $U_i(t)$  — суммарный

объем лесного продукта по видам лесопroduкции у  $i$ -го поставщика, на период времени  $t$ .

5. Динамической сбалансированной связи производства и потребления:

$$\int_{t=0}^T (\sum_{i=1}^m \sum_{d=1}^D X_i(t)) dt = \int_{t=0}^{t+t_{ij}} (\sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D X_j(t)) dt. \quad (11)$$

Предлагаемая математическая модель в стохастической постановке с учетом динамики процесса транспортировки (1)–(11) обеспечивает оптимизацию организации структуры потоков лесных грузов с учетом факторов стохастической неопределенности за счет распределения лесоматериалов в менее затратные пункты потребления, принимая во внимание затраты на транспортировку, а также посредством определения пунктов потребления с минимальными издержками на хранение лесопroduкции.

Апробация разработанной модели проведена на ряде предприятий лесного комплекса Красноярского края. Погрешность в расчетах составила менее 7 %, соответственно, сходимость теоретических положений и экспериментальных результатов составила более 93 %. В результате использования авторской модели эффективность транспортно-технологического процесса поставки лесопroduкции возросла на 25 %.

Следует указать, что расчеты с использованием разработанной модели производятся на краткосрочный временной период. По нашему мнению, оптимальным сроком составления прогноза является год. Также необходимо обозначить, что разработанная модель может использоваться при поквартальном и помесечном планировании функционирования процесса транспортировки лесоматериалов.

**Выводы.** Разработанная модель, по отношению к существующим моделям функционирования транспортно-технологического процесса поставки лесопroduкции с учетом влияния факторов стохастической неопределенности обладает следующими преимуществами: учет многовариантности лесных грузов, транспортных средств, пунктов перегрузки и т. п.; а также предлагаемая математическая модель в стохастической постановке с учетом динамики процесса транспортировки обеспечивает корректное вычисление влияния факторов неопределенности на функционирование транспортно-технологического процесса предприятий лесной отрасли, а также позволяет получить количественный результат при применении качественных значений показателей планируемого процесса.

#### Литература

- Салминен Э.О., Борозна А.А., Тюрин Н.А. Лесопромышленная логистика. СПб.: ЛТА, 2010. С. 120-127.
- Enaleeva-Bandura I.M., Kovalev R.N., Vasilijev V.I. 2020 Mathematical model of transport network planning on the territory of the forest fund (IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/918/1/012048> (дата обращения: 20.11.2023).
- Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б. Специальные направления в линейном программировании. 2-е изд., испр. М.: КРАСАНД, 2010. 528 с.
- Тронин В.Г., Галныкина К.С., Стенина А.С. Математические методы анализа рисков в инновационных проектах // Вестн. УлГУ. 2015. № 1. С. 48-56.
- Шапиро Д. Моделирование цепи поставок / пер. с англ. В.С. Лукинского. СПб.: Питер, 2006. 720 с.
- Юдин Д.Б. Математические модели управления в условиях неполной информации: задачи и методы стохастического программирования. М.: КРАСАНД, 2017. 400 с.
- Бочкарев А.А. Оптимизация перевозок контейнерных грузов // Логистика и управление цепями поставок. 2012. № 1. С. 43-55.
- Бочкарев А.А. Процессный подход к моделированию и интегрированному планированию цепи поставок: теория и методология: моногр. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing Gmbh & Co, 2011. 290 p.
- Гладков Е.Г. Задача обоснования развития лесотранспортной сети для одновременно вырубаемых лесосек // Информационные системы управления в лесном комплексе: материалы науч.-технической конф. (26 нояб. 1999 г.). СПб.: ЛТА, 1999. С. 31-33.
- Гладков Е.Г. Линейная модель регионального лесопромышленного управления с активным лесовыращиванием // Лесопромышленная логистика и информационные системы в лесном комплексе: материалы междунар. науч.-технической конф. (11 апр. 2003 г.). СПб.: ЛТА, 2003. С. 27-30.
- Гладков Е.Г. Планирование процесса лесозаготовок в современных условиях // Лесная пром-сть. 2003. № 1. С. 35-37.

12. Гнедаш М.А. Выбор рациональных способов перевозки бытовой техники железнодорожным транспортом: дис. ... канд. техн. наук. Липецк, 2006. 275 с.
13. Гудков В.А., Вельможин А.В., Ширяев С.А., Миротин Л.Б. Логистический аспект теории транспортных процессов // Бизнес и логистика - 2002: сб. материалов IV Московского междунар. логистического форума (6-9 февр. 2002 г.). М., 2002. С. 38-45.
14. Мадера А.Г. Моделирование и принятие решений в менеджменте: руководство для будущих топ-менеджеров. М.: Изд-во «ЛКИ», 2015. 688 с.
15. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Задачи и методы линейного программирования: математические основы и практические задачи. 3-е изд. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 320 с.
16. Якушев Н.В., Александров А.Э. Управление большими системами: сб. тр. М.: ИПУ РАН, 2006. Вып. 12-13. С. 28-29.
17. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1985. V. 15, № 1. P. 116-132.
18. Andersson G., Flisberg P., Liden B., Rönnqvist M. RuttOpt - a decision support system for routing of logging trucks // Canadian Journal of Forest Resources. 2008. № 38. P. 1784-1796.
19. Duhamel C., Potvin J-Y., Rousseau J-M. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows // Transportation Science. 1997. V. 31, № 1. P. 49-59.
20. Gerasimov Yu.Yu., Sokolov A.P., Fjeld D. Improving Cut-to-length Operations Management in Russian Logging Companies Using a New Decision Support System // Baltic Forestry. 2013. V. 19, №1 (36). P. 89-105.
21. Gunnarsson H. Supply chain optimization in the forest industry // Linköping Studies in Science and Technology. 2007. № 1105. 25 p.
22. Kok F.L., Meyer C.M., Kopfer H., Shatten J.M.J. A Dynamic Programming Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and European Community Social Legislation // Transportation Science. 2010. № 44. P. 442-454.
23. Carlsson D., D'Amours S., Martel A., Rönnqvist M. Decisions and methodology for planning the wood fiber flow in the forest supply chain, in Koster R. and Delfmann W. (Eds): Recent developments in supply chain management. Helsinki: University Press, 2008. P. 11-39.
6. YUdin D.B. Mathematical models of control in conditions of incomplete information: tasks and methods of stochastic programming. M.: KRASAND, 2017. 400 p.
7. Bochkarev A.A. Optimization of container cargo transportation // Logistics and supply chain management. 2012. № 1. P. 43-55.
8. Bochkarev A.A. Process approach to modeling and integrated supply chain planning: theory and methodology: monogr. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011. 290 p.
9. Gladkov E.G. The task of substantiating the development of a forest transportation network for simultaneously cut down cutting areas // Informacionnye sistemy upravleniya v lesnom komplekse: materialy nauch.-tekhnicheskoy konf. (26 noyab. 1999 g.). SPb.: LTA, 1999. P. 31-33.
10. Gladkov E.G. Linear model of regional forest management with active reforestation // Lesopromyshlennaya logistika i informacionnye sistemy v lesnom komplekse: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (11 apr. 2003 g.). SPb.: LTA, 2003. P. 27-30.
11. Gladkov E.G. Planning of the logging process in modern conditions // Lesnaya prom-st'. 2003. № 1. P. 35-37.
12. Gnedash M.A. Choosing rational ways to transport household appliances by rail: dis. ... kand. tekhn. nauk. Lipeck, 2006. 275 p.
13. Gudkov V.A., Vel'mozhin A.V., SHiryaev S.A., Mirotin L.B. Logistic aspect of the theory of transport processes // Biznes i logistika - 2002: sb. materialov IV Moskovskogo mezhdunar. logisticheskogo foruma (6-9 fevr. 2002 g.). M., 2002. P. 38-45.
14. Madera A.G. Modeling and decision-making in management: a guide for future top managers. M.: Izd-vo «LKI», 2015. 688 p.
15. YUdin D.B., Gol'shtejn E.G. Tasks and methods of linear programming: mathematical foundations and practical tasks. 3-e izd. M.: LIBROKOM, 2010. 320 p.
16. YAKushev N.V., Aleksandrov A.E. Managing large systems: sb. tr. M.: IPU RAN, 2006. Vyp. 12-13. P. 28-29.
17. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1985. V. 15, № 1. P. 116-132.
18. Andersson G., Flisberg P., Liden B., Rönnqvist M. RuttOpt - a decision support system for routing of logging trucks // Canadian Journal of Forest Resources. 2008. № 38. P. 1784-1796.
19. Duhamel C., Potvin J-Y., Rousseau J-M. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows // Transportation Science. 1997. V. 31, № 1. P. 49-59.
20. Gerasimov Yu.Yu., Sokolov A.P., Fjeld D. Improving Cut-to-length Operations Management in Russian Logging Companies Using a New Decision Support System // Baltic Forestry. 2013. V. 19, №1 (36). P. 89-105.
21. Gunnarsson H. Supply chain optimization in the forest industry // Linköping Studies in Science and Technology. 2007. № 1105. 25 p.
22. Kok F.L., Meyer C.M., Kopfer H., Shatten J.M.J. A Dynamic Programming Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and European Community Social Legislation // Transportation Science. 2010. № 44. P. 442-454.
23. Carlsson D., D'Amours S., Martel A., Rönnqvist M. Decisions and methodology for planning the wood fiber flow in the forest supply chain, in Koster R. and Delfmann W. (Eds): Recent developments in supply chain management. Helsinki: University Press, 2008. P. 11-39.

#### References

1. Salminen E.O., Borozna A.A., Tyurin N.A. Timber industry logistics. SPb.: LTA, 2010. P. 120-127.
2. Enaleeva-Bandura I.M., Kovalev R.N., Vasilijev V.I. 2020 Mathematical model of transport network planning on the territory of the forest fund (IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/918/1/012048> (data obrashcheniya: 20.11.2023).
3. Gol'shtejn E.G., YUdin D.B. Special directions in linear programming. 2-e izd., ispr. M.: KRASAND, 2010. 528 p.
4. Tronin V.G., Galnykina K.S., Stenina A.S. Mathematical methods of risk analysis in innovative projects // Vestnik of ULSTU. 2015. № 1. P. 48-56.
5. SHapiro D. Supply chain modeling / per. s angl. V.S. Lukinskogo. SPb.: Piter, 2006. 720 p.