

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/8>

УДК 630\*31



## Оценка эффективности организации транспортных потоков на перевозках древесины

Антон П. Соколов<sup>1</sup>✉, [a\\_sokolov@psu.karelia.ru](mailto:a_sokolov@psu.karelia.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-0798-4634>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

Статья посвящается описанию процесса оценки эффективности организации транспортных потоков для разных вариантов размещения предприятия по производству гофрошпонных панелей с помощью специализированной имитационной модели, разработанной в Петрозаводском государственном университете. Панели данного типа изготавливаются из шпона мягколиственных пород древесины, объемы переработки которой в Республике Карелия в настоящее время незначительны, и местные лесозаготовители испытывают определенные трудности с ее сбытом. Решение поставленной задачи базируется на использовании имитационной модели транспортных потоков на перевозках древесины, реализованной в среде ПО AnyLogic. С помощью предложенной имитационной модели возможно получать точные оценки эксплуатационной скорости автомобилей-сортиментовозов на конкретном маршруте с учетом дорожных условий, ограничений скорости, а также с учетом изменения интенсивности потока транспортных средств на разных участках маршрута. Благодаря этому появляется возможность сравнения экономической эффективности различных вариантов организации транспортных потоков. Для сравнения были выбраны варианты размещения производства в г. Медвежьегорске и в п. Пряжа. В качестве источников ресурсов выступают семь южных лесничеств Республики Карелия. Полученные результаты позволяют заключить, что более выгодным следует считать размещение предприятия в п. Пряжа. В этом случае суммарные транспортные затраты оказываются меньше на 2%, что соответствует экономии 5,8 млн. рублей в год. При этом годовой пробег всех транспортных средств сокращается на 42 900 км, что составляет 3,5%, однако это не приводит к сокращению общего времени работы транспортных средств, т. к. средняя эксплуатационная скорость оказывается на 0,6% меньше, чем в случае размещения в Медвежьегорске. Средние удельные транспортные затраты при размещении завода в Пряже оказываются меньше на 24,1 руб/м<sup>3</sup>. Таким образом, сокращение пробега на 3,5% ведет к сокращению затрат только на 2%.

**Ключевые слова:** транспорт леса, поставки древесины, имитационное моделирование, интенсивность дорожного движения, транспортные затраты, автомобили-сортиментовозы

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Соколов А. П. Оценка эффективности организации транспортных потоков на перевозках древесины / А.П. Соколов // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 123-137. – Библиогр.: с. 134-137 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/8>.

**Поступила** 14.12.2024. **Пересмотрена** 14.02.2025. **Принята** 03.03.2025. **Опубликована онлайн** 24.03.2025.

## Article

### Estimation of the supply chains efficiency in wood transportation

Anton P. Sokolov<sup>1</sup>✉, a\_sokolov@psu.karelia.ru  <https://orcid.org/0000-0002-0798-4634>

<sup>1</sup>*Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Petrozavodsk State University», Lenin av., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation*

#### Abstract

The article describes the process of efficiency estimation of different variants for locating an enterprise for the production of corrugated veneer panels using a specialized simulation model developed at Petrozavodsk State University. A corrugated veneer panel is a new type of panel-type building facing materials intended for interior decoration. Panels of this type are made of softwood veneer, the processing volumes of which in the Republic of Karelia are currently insignificant, and local loggers experience certain difficulties with its sale. The solution to the problem is based on the use of a simulation model of traffic flows in timber transport, implemented in the AnyLogic software environment. Using the proposed simulation model, it is possible to obtain accurate estimates of the operating speed of timber trucks on a specific route, taking into account road conditions, speed limits, and changes in the traffic intensity on different sections of the route. This makes it possible to compare the economic efficiency of different variants for traffic flows organizing. For comparison, the options of production placement in Medvezhyegorsk and Pryazha were selected. In this case, seven southern forestries of the Republic of Karelia act as sources of resources. The obtained results allow us to conclude that the placement of the enterprise for the production of corrugated veneer panels in Pryazha is more profitable. In this case, the total transport costs are 2% less, which corresponds to savings of 5.8 million rubles per year. In this case, the annual run of all trucks is reduced by 42,900 km, which is 3.5%, but this does not lead to a reduction in the total trucks operating time, since the average operating speed is 0.6% less than in the case of placement in Medvezhyegorsk. The average specific transport costs when placing the plant in Pryazha are 24.1 rubles/m<sup>3</sup> less. Thus, a 3.5% reduction in the run leads to a reduction in costs by only 2%.

**Keywords:** *supply chains; forest transport; wood procurement; simulation modeling; traffic intensity; transport costs; timber truck*

**Funding:** This work was supported by the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education (state research target, theme no. 075-03-2023-128).

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest.

**For citation:** Sokolov A.P. (2024). Estimation of the supply chains efficiency in wood transportation. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 123-137 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/8>.

**Received** 14.12.2024. **Revised** 14.02.2025. **Accepted** 03.03.2025. **Published online** 24.03.2025.

#### Введение

Изменения, происходящие в последние годы в экономике России, в том числе, обусловленные взятым курсом на широкое импортозамещение, развитие глубокой переработки природных ресурсов внутри страны, сокращением экспорта товаров с

низкой степенью переработки, санкционной политикой ряда западных стран и т. д. требуют выработки новых эффективных решений по использованию древесины в промышленных и потребительских целях [1]. Данная проблема особенно актуальна для приграничных районов, в течение длительного времени ориентировавшихся именно на экспорт

многих видов продукции. Отсутствие таких решений или их недостаточная эффективность станет причиной снижения объемов лесозаготовок и далее по цепочке, к необходимости уменьшения объемов переработки древесины и последующему сокращению занятости населения, что может привести к весьма негативным экономическим и социальным последствиям. Поэтому представляется актуальной разработка новых способов переработки временно невостребованных видов древесины и новых видов продукции их нее.

Новым перспективным материалом именно такого рода является гофрошпонная панель. Гофрошпонная панель – это новый вид строительных облицовочных материалов панельного типа, предназначенный для внутренней отделки помещений [2, 3]. Такие панели изготавливаются из шпона мягколиственных пород древесины, объемы переработки которой в Республике Карелия в настоящее время незначительны, и местные лесозаготовители испытывают определенные трудности с ее сбытом. Поэтому создание нового предприятия по производству гофрошпонных панелей с годовым объемом переработки около 240 000 м<sup>3</sup>, позволило бы в существенной мере увеличить эффективность функционирования лесного комплекса региона.

Важное значение имеет правильный выбор конкретного места размещения нового производства, в первую очередь с точки зрения бесперебойного снабжения предприятия сырьем при обеспечении приемлемого уровня затрат на транспортировку древесины. Это определяется тем, что по разным данным [4-7] транспортная составляющая в производственных затратах лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий может достигать 50-60%.

Данная статья посвящается описанию процесса оценки эффективности организации транспортных потоков для разных вариантов размещения предприятия по производству гофрошпонных панелей с помощью специализированной имитационной модели, разработанной в Петрозаводском государственном университете.

## Материалы и методы

Решение поставленной задачи базируется на использовании имитационной модели транспортных потоков на перевозках древесины, реализованной в среде ПО AnyLogic.

Имитационное моделирование широко используется при решении задач анализа и планирования цепей поставок [8-11]. В области лесозаготовительного производства этот метод тоже давно нашел свое успешное применение. При этом хорошо зарекомендовал себя метод агентного моделирования. Например, в работе [12] он используется для обоснования условий устойчивости лесохозяйственной деятельности. Также очень часто применяется дискретно-событийное моделирование. В работе [13] оно применяется для построения имитационной модели технологического заготовки древесины, в работе [14] – для моделирования технологического процесса вывозки древесины. Часто имитационное моделирование применяется для оценки параметров процессов взаимодействия лесных машин с лесной средой [15].

Разработанная имитационная модель основана на одновременном использовании агентного и дискретно-событийного моделирования и позволяет с большой точностью определять удельные транспортные затраты, которые вычисляются по формуле [16]:

$$C_T = \frac{C_{var} \cdot L}{\beta} + C_{fix} \cdot \left( \frac{L}{V} + t_l \right), \quad (1)$$

где  $C_T$  - удельные транспортные затраты, руб/м<sup>3</sup>;

$C_{var}$  - переменные затраты, руб/км;

$L$  - расстояние ездки, км;

$\beta$  - коэффициент использования пробега;

$C_{fix}$  - постоянные затраты, руб/ч;

$V$  - эксплуатационная скорость с учетом перерывов на отдых, км/ч;

$t_l$  - суммарное время погрузки и разгрузки, ч;

$q$  - грузоподъемность транспортного средства, м<sup>3</sup>.

При использовании одних и тех же транспортных средств, однотипном грузе и неизменном

подходе к организации перевозок, удельные транспортные затраты фактически будут зависеть только от реализующейся на маршруте эксплуатационной скорости  $V$ .

Для точного определения эксплуатационной скорости с учетом дорожных условий, ограничений скорости, а также с учетом изменения интенсивности потока транспортных средств на разных участках маршрута была разработана математическая модель, описанная в работе [17]. В соответствии с этой моделью эксплуатационная скорость на маршруте вычисляется по формуле:

$$V = \frac{L}{\sum_{i=0}^M \sum_{j=1}^{12} \frac{l_{ij}}{V_i^0 - \alpha_i \gamma_{ij} \cdot N_i^b} + t_i^{out}}, \quad (2)$$

где  $M$  - число участков маршрута с разными характеристиками;

$l_{ij}$  - расстояние, пройденное автомобилем по участку  $i$  внутри временного периода  $j$ , км;

$V_i^0$  - скорость движения по участку  $i$  одиночного автомобиля при отсутствии помех, км/ч;

$\alpha_i$  - коэффициент снижения скорости, который зависит от состава транспортного потока [18];

$\gamma_{ij}$  - доля среднесуточного числа транспортных средств, следующих через участок  $i$  в течение периода  $j$ ;

$N_i^b$  - среднесуточная интенсивность движения в одном направлении для участка  $i$ , сут<sup>-1</sup>;

$t_i^{out}$  - время остановок на отдых, пришедшихся на участок  $i$ , ч.

Как известно, интенсивность дорожного движения изменяется в течение суток. Это также подтверждается исследованиями, выполненными в отношении перевозок древесины [19]. В разработанной модели для учета изменения интенсивности движения, сутки были разбиты на двенадцать двухчасовых интервалов. Изменение интенсивности учитывается с помощью коэффициентов  $\gamma_{ij}$ . Значения коэффициентов для двухчасовых интервалов, на которые разбиваются сутки в описываемой модели были приняты в соответствии с исследованием [20].

Среднесуточная интенсивность движения по участкам дорог была определена с использованием интернет-ресурса государственной системы контроля за формированием и использованием средств

дорожных фондов (СКДФ). Сайт создан и поддерживается Федеральным дорожным агентством Росавтодор и содержит большой объем информации практически о всех дорогах Российской Федерации. В состав данных в том числе входят и постоянно обновляющиеся данные мониторинга интенсивности движения.

Схема альтернативных вариантов размещения предприятий и соответствующих им транспортных потоков показана на рис. 1.

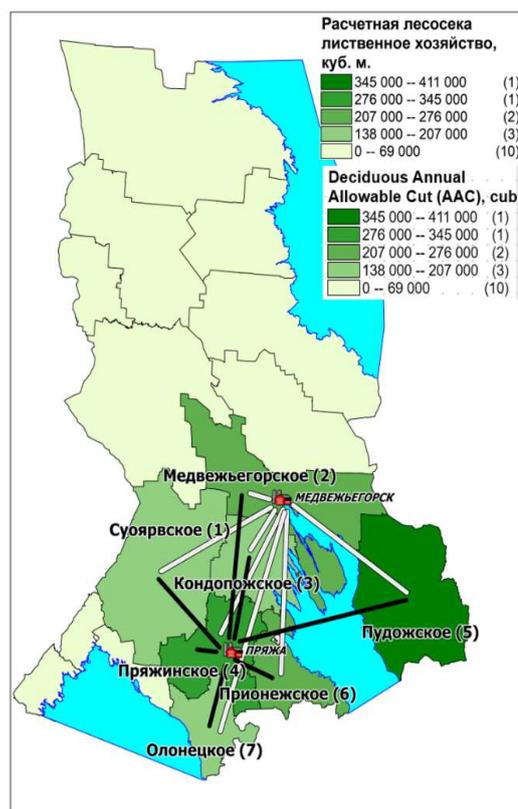


Рисунок 1. Альтернативные варианты размещения предприятия и транспортные потоки: (1)-(7) – коды лесничеств (см. табл. 1)

Figure 1. Enterprises allocation alternatives and traffic flows: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 1)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Как можно заметить (рис. 1) значительные запасы мягколиственной древесины сосредоточены в южной части Республики Карелия: в Пудожском, Суоярвском, Олонецком, Пряжинском, Прионеж-

ском, Кондопожском и Медвежьегорском лесничествах [21]. Поэтому предприятие по производству гофрошпонных панелей также целесообразно разместить в этой части республики. Производство должно располагаться в черте крупного населенного пункта или вблизи него, для достаточного обеспечения производства трудовыми ресурсами, удобства их доставки к месту работы, а также с точки зрения более простого подключения к коммунальным сетям. Для сравнения были выбраны варианты размещения производства в г. Медвежьегорске и в п. Пряжа. В качестве источников ресурсов в данном случае выступают семь южных лесничеств, вклад каждого из которых в снабжение предприятия был принят пропорциональным их годовой расчетной лесосеке в разрезе мягколиственной древесины (табл. 1, рис. 2). Это было сделано из соображений равномерности и неистощительности лесопользования. В целях экономии пространства на рис. 2 и в дальнейшем в таблицах и на рисунках наименования лесничеств будут заменяться их номером в скобках в соответствии с табл. 1.

Таблица 1  
Распределение поставок сырья по лесничествам

Table 1  
Contribution of each forest district to the wood supply

Лесничество   Forest district	ID	Расчетная лесосека по листовенному хозяйству, м <sup>3</sup>   Deciduous Annual Allowable Cut, m <sup>3</sup>	Доля   Share	Плановые годовые поставки, м <sup>3</sup>   Annual deliveries, m <sup>3</sup>
Пудожское   Pudozhskoye	(1)	410 300	0,233	55 975
Суоярвское   Suoyarvskoye	(2)	165 700	0,094	22 606
Олонецкое   Olonetskoye	(3)	166 100	0,094	22 660

Пряжинское   Pryazhinskoye	(4)	339 700	0,193	46 344
Прионежское   Prionezhskoye	(5)	229 200	0,130	31 269
Кондопожское   Kondopozhskoye	(6)	183 600	0,104	25 048
Медвежьегорское   Medvezhyegorskoye	(7)	264 600	0,150	36 098
<b>Всего   Total</b>		<b>1 759 200</b>	<b>1</b>	<b>240 000</b>

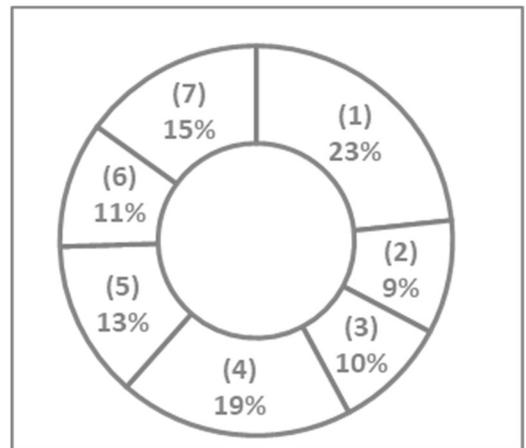


Рисунок 2. Распределение поставок сырья по лесничествам: (1)-(7)–коды лесничеств (см. табл. 1)

Figure 2. Contribution of each forest district to the wood supply: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 1)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

### Результаты и обсуждение

Для оценки величины транспортных затрат было выполнено 14 имитационных экспериментов в среде AnyLogic. В первых семи экспериментах пунктом назначения являлся г. Медвежьегорск, во вторых семи – п. Пряжа. Точкой отправления в каждом эксперименте было одно из семи рассматриваемых лесничеств. При этом места погрузки располагались вблизи географических центров лесничеств. Для определения средней эксплуатационной скорости движения автомобилей-сортиментовозов по маршруту в применяемой в данном исследовании имитационной модели используется так называемый метод контрольного транспортного средства.

В общем случае метод контрольного транспортного средства заключается в прямом замере времени движения транспортного средства от места погрузки до места разгрузки. Для изучения динамики изменения эксплуатационной скорости в течение суток было принято решение имитировать отправку автомобилей-сортиментовозов грузоместимостью 40 м<sup>3</sup> из пунктов отправления с периодичностью 10 мин. К анализу представлялись результаты для полных суток, начиная с 8.00. Базовые скорости движения устанавливались для федеральных трасс – 90 км/ч, для региональных – 40-75 км/ч в зависимости от их состояния, для лесных дорог – 15-25 км/ч. Внутри населенных пунктов базовые скорости задавались в пределах 30-70 км/ч, при этом принималось во внимание наличие знаков, ограничивающих скорость, и светофорных объектов в каждом конкретном населенном пункте. Коэффициенту использования пробега в данном исследовании было задано значение 0,6, а коэффициенту снижения скорости – 0,008 в соответствии с рекомендациями [18]. Используемое в исследовании значение переменных затрат составляло 90 руб/км, постоянных затрат – 3500 руб/ч, суммарного времени погрузки и разгрузки – 1 час. Перерывы для отдыха водителей были заданы в соответствии с Приказом министерства транспорта Российской Федерации от 16.10.2020 № 424 [22] следующим образом: первый перерыв продолжительностью 45 мин. через 4 часа 30 минут после начала

движения и далее пятнадцатиминутные перерывы каждые полтора часа движения.

В результате моделирования были получены значения времени движения, эксплуатационной скорости и удельных транспортных затрат для каждого из рейсов, стартовавших каждые 10 мин. в течение суток. На рис. 3 показаны графики изменения эксплуатационной скорости в течение суток для случая с размещением производства гофрошпонных панелей в г. Медвежьегорске.

Можно видеть, что эксплуатационная скорость варьируется в широких пределах от маршрута к маршруту: минимальное значение составляет 34 км/ч, максимальное – 70 км/ч. Кроме того, хорошо видны заметные суточные колебания скорости. Колебания тем больше, чем выше интенсивность движения на участках дорожной сети, включенных в маршрут. Для всех маршрутов заметно снижение эксплуатационной скорости в случае начала движения в промежутке времени между 15.00 и 21.00. Такие же графики для случая с размещением производства гофрошпонных панелей в п. Пряжа, приведены на рис. 4.

Можно отметить общее снижение эксплуатационной скорости и сокращение ее разброса. Суммарные результаты экспериментов приведены в табл. 2, табл. 3 и на рис. 5.

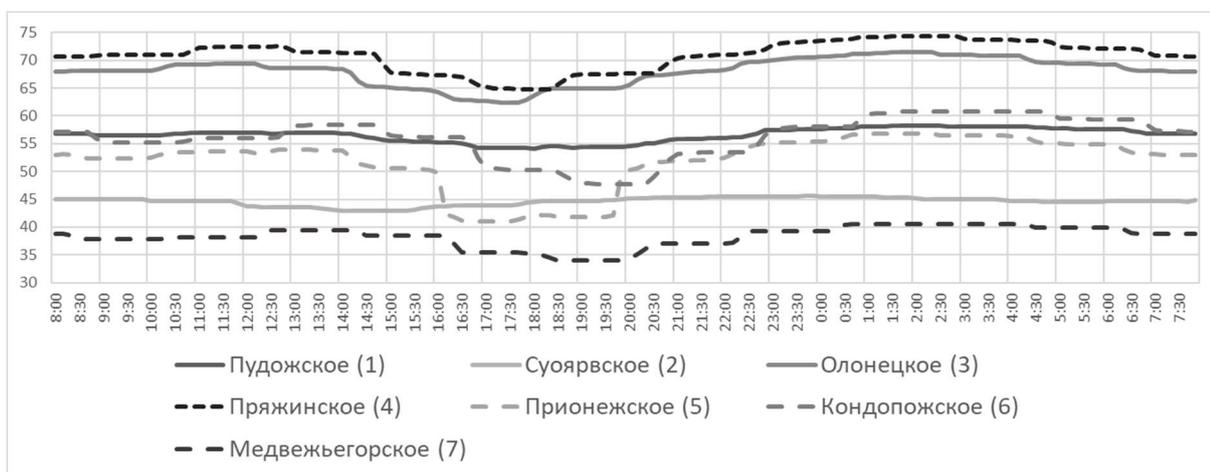


Рисунок 3. Эксплуатационная скорость для случая с размещением производства в г. Медвежьегорске, км/ч: (1)-(7)–коды лесничеств (см. табл. 1)

Figure 3. Operating speed for the case where the plant is located in Medvezhyegorsk, km/h: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 1)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

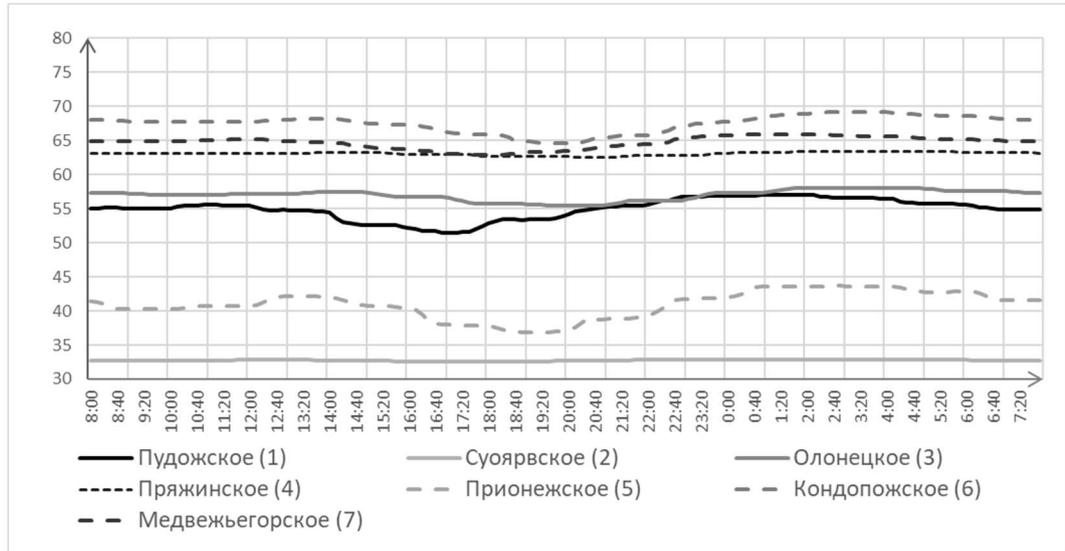


Рис. 4. Эксплуатационная скорость для случая с размещением производства в п. Пряжа, км/ч: (1)-(7)–коды лесничеств (см. табл. 1)

Figure 4. Operating speed for the case where the plant is located in Pryazha, km/h: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 1)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Таблица 2

Результаты (первая часть)

Table 2

Results (the first frame)

Лесничество   Forest district	ID	Длина маршрута, км   Distance, km			Годовой пробег, км x 10 <sup>3</sup>   Yearly run, km x 10 <sup>3</sup>			Суммарное время рейсов, ч x 10 <sup>3</sup>   Total truck operating time, h x 10 <sup>3</sup>		
		I	II	Изменение   Difference	I	II	Изменение   Difference	I	II	Изменение   Difference
Пудожское	(1)	221	414	+88%	308,8	579,9	+87,8%	327,8	633,7	+93,3%
Суоярвское	(2)	334	175	-47%	188,8	99,2	-47,5%	254,0	181,6	-28,5%
Олонецкое	(3)	267	74	-72%	151,0	41,9	-72,3%	133,4	44,1	-66,9%
Пряжинское	(4)	247	54	-78%	286,4	63,1	-78,0%	242,9	60,1	-75,3%
Прионежское	(5)	223	109	-51%	174,0	84,9	-51,2%	202,9	124,8	-38,5%
Кондопожское	(6)	86	140	+63%	53,9	87,7	+62,9%	57,8	78,1	+35,0%
Медвежьегорское	(7)	75	256	+240%	68,1	231,3	+239,6%	107,0	214,6	+100,6%
<b>Всего   Total</b>	-	-	-	-	<b>1230,9</b>	<b>1188,0</b>	<b>-3,5%</b>	<b>1325,8</b>	<b>1336,9</b>	<b>+0,8%</b>

I – Вариант с размещением производства в г. Медвежьегорске; | The plant located in the city of Medvezhyegorsk

II - Вариант с размещением производства в п. Пряжа | The plant located in in the village of Pryazha

Таблица 3

Результаты (продолжение)

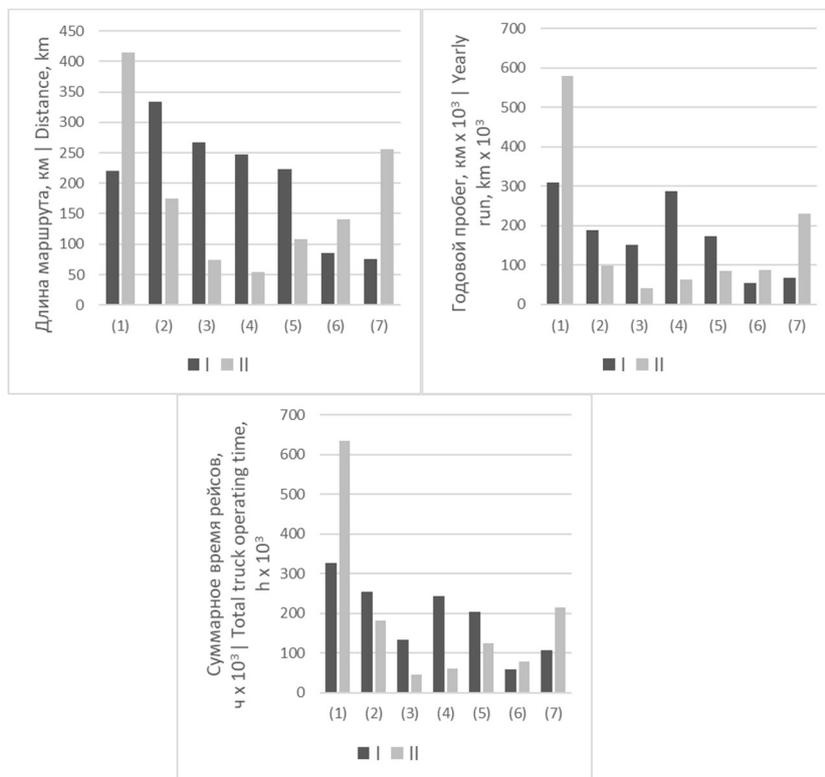
Table 3

Results (the second frame)

Лесничество   Forest district	ID	Средняя эксплуатационная скорость, км/ч   Average operating speed, km/h			Суммарные транспортные затраты, млн руб.   Costs per year, million rub.			Удельные транспортные затраты, руб/м <sup>3</sup>   Average unit costs, rub/m <sup>3</sup>		
		I	II	Изменение   Difference	I	II	Изменение   Difference	I	II	Изменение   Difference
Пудожское	(1)	56,5	55,0	-2,8%	70,3	128,9	+83,2%	1256,5	2302,0	+83,2%
Суоярвское	(2)	44,6	32,8	-26,6%	45,1	27,4	-39,2%	1996,0	1214,2	-39,2%
Олонецкое	(3)	68,0	57,0	-16,3%	32,4	10,8	-66,6%	1430,3	478,0	-66,6%
Пряжинское	(4)	70,8	63,1	-11,0%	61,2	17,0	-72,2%	1320,2	367,4	-72,2%
Прионежское	(5)	51,9	40,9	-21,2%	40,7	22,8	-44,1%	1300,5	727,6	-44,1%
Кондопожское	(6)	56,1	67,4	+20,1%	13,6	19,9	+45,9%	544,7	794,6	+45,9%
Медвежьегорское	(7)	38,3	64,7	+68,9%	19,6	50,4	+156,8%	543,4	1395,4	+156,8%
<b>Всего   Total</b>	-	<b>55,9</b>	<b>55,6</b>	<b>-0,6%</b>	<b>283,0</b>	<b>277,2</b>	<b>-2,0%</b>	<b>1179,1</b>	<b>1155,0</b>	<b>-2,0%</b>

I – Вариант с размещением производства в г. Медвежьегорске; | The plant located in the city of Medvezhyegorsk;

II - Вариант с размещением производства в п. Пряжа | The plant located in in the village of Pryazha



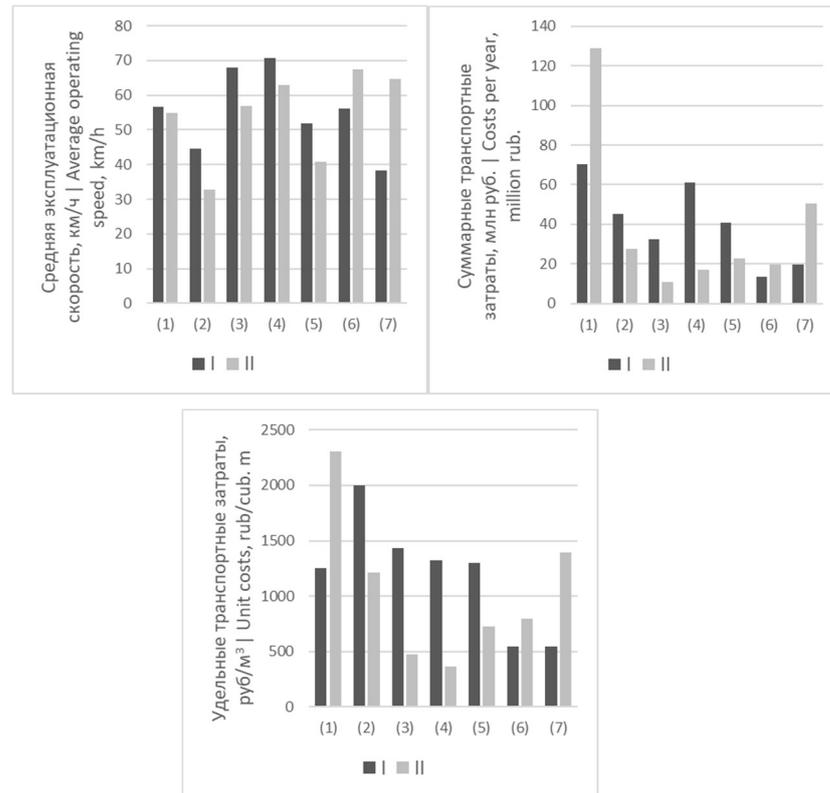


Рисунок 5. Суммарные результаты: (1)-(7) – коды лесничеств (см. табл. 1); I – Вариант с размещением производства в г. Медвежьегорске; II – Вариант с размещением производства в п. Пряжа

Figure 5. The summary results: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 1); I – The plant located in the city of Medvezhyegorsk; II – The plant located in in the village of Pryazha

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Результаты, представленные в табл. 2 и 3 и на рис. 5, позволяют сделать нижеследующие выводы. С точки зрения транспортных затрат более выгодным следует считать размещение предприятия по производству гофрошпонных панелей в п. Пряжа. В этом случае суммарные транспортные затраты оказываются меньше на 2%, что в абсолютном выражении соответствует экономии 5,8 млн. рублей в год.

При этом годовой пробег всех транспортных средств на перевозках мягколиственной древесины сокращается на 42 900 км, что составляет 3,5%, однако это не приводит к сокращению общего времени работы транспортных средств, т. к. средняя эксплуатационная скорость при размещении предприятия в Пряже оказывается на 0,6% меньше, чем в случае размещения в Медвежьегорске – сказывается расположение п. Пряжа вблизи со столицей Республики

Карелия г. Петрозаводском, т. е. в районе с гораздо большей интенсивностью движения по дорогам всех типов. Средние удельные транспортные затраты при размещении завода в Пряже оказываются меньше на 24,1 руб/м<sup>3</sup>.

Таким образом, сокращение пробега на 3,5% ведет к сокращению затрат только на 2%. Это еще раз подтверждает существенное влияние на эффективность транспортного процесса таких факторов, как интенсивность движения по разным участкам дорог, а также суточные ее колебания. Перенос производства с территории с меньшей интенсивностью дорожного движения (Медвежьегорск) на территорию с большей интенсивностью (Пряжа) привел к сокращению затрат на величину меньшую ожидаемой. Таким образом, при оценке эффективности организации транспортных потоков нецелесообразно ориентироваться только на изменение суммарного

пробега транспортных средств. Это подтверждает полезность описываемой в данной статье имитационной модели.

Кроме того, результаты моделирования показывают, что величина суточных колебаний эксплуатационной скорости существенно меньше в случае размещения производства в п. Пряжа (рис. 6).

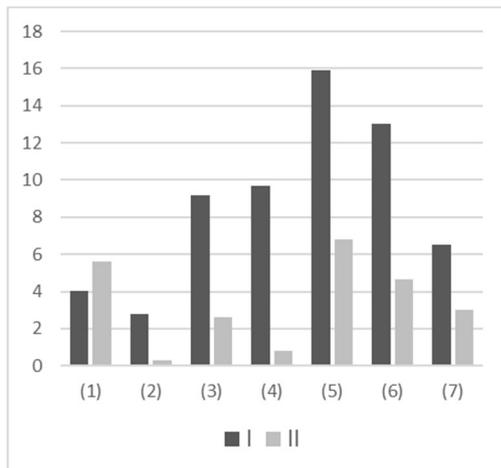


Рисунок 6. Размах средней оперативной скорости, км/ч.: (1)-(7) – коды лесничеств (см. табл. 1); I – Вариант с размещением производства в г. Медвежьегорске; II – Вариант с размещением производства в п. Пряжа

Figure 6. Average operating speed range, km/h.: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 2); I – The plant located in the city of Medvezhyegorsk; II – The plant located in the village of Pryazha

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Наибольший размах эксплуатационной скорости в обоих случаях наблюдается на маршрутах с точкой погрузки в Прионежском лесничестве (ID 5). При доставке древесины в г. Медвежьегорск эксплуатационная скорость изменялась на этом маршруте на 16 км/ч в течение суток. При доставке древесины в п. Пряжа размах становится более чем в два раза меньшим – 6,8 км/ч.

Это связано с размещением производственной площадки в черте достаточно большого города, в котором существенно меньше средняя эксплуатационная скорость, а также велики ее суточные колебания. Пряжа же представляет собой не слишком большой поселок городского типа.

Наибольшие значения размаха для Прионежского лесничества связаны с тем, что оба рассматриваемые маршрута в этом случае пролегают через территорию г. Петрозаводска – самого крупного города и столицы Республики Карелия.

Необходимо отметить, что результаты, представленные в таблице 2, в таблице 3 и на рис. 5. получены для случая круглосуточного и равномерного в течение суток осуществления перевозок. В случае использования другого режима работы, будут получены другие результаты. На рис. 7 представлены результаты для нескольких альтернативных режимов: дневного, ночного, круглосуточного, с прибытием транспортных средств на пункты назначения в дневное время.

Как и следовало ожидать, наибольшие удельные затраты приходятся на режим, предполагающий перевозки только в дневное время: с 8.00 до 20.00. В случае осуществления перевозок в ночное время, можно получить экономию 2 – 3,5 млн. руб. в год. Также на рис. 8 приведен вариант, когда предприятие осуществляет приемку груза только в дневное время. В этом случае затраты оказываются в целом чуть меньше, чем в случае круглосуточной работы. Кроме того, на графиках приведен случай, обозначенный как «Минимум» и представляющий собой затраты, определенные для самого выгодного из всех рассматриваемых 144 рейсов в сутки (с периодичностью 10 мин). Основные параметры этих рейсов приведены в таблице 4.

Все наиболее выгодные рейсы отправляются в ночное время и прибывают в точку назначения ранним утром. Учитывая, что при грузоподъемности автомобилей-сортиментовозов в 40 м<sup>3</sup>, число рейсов в день по разным лесничествам варьируется от 1 до 4, вполне возможно организовать перевозку в оптимальные сроки. В этом случае можно достичь годовой экономии 3,5 – 5 млн. руб., в зависимости от места расположения производства (рис. 8).

## Выводы

С помощью предложенной имитационной модели поставок древесины возможно получать достаточно точные оценки эксплуатационной скорости автомобилей-сортиментовозов на конкретном

маршруте в разное время суток. Благодаря этому появляется возможность сравнения экономической эффективности различных вариантов организации транспортных потоков.

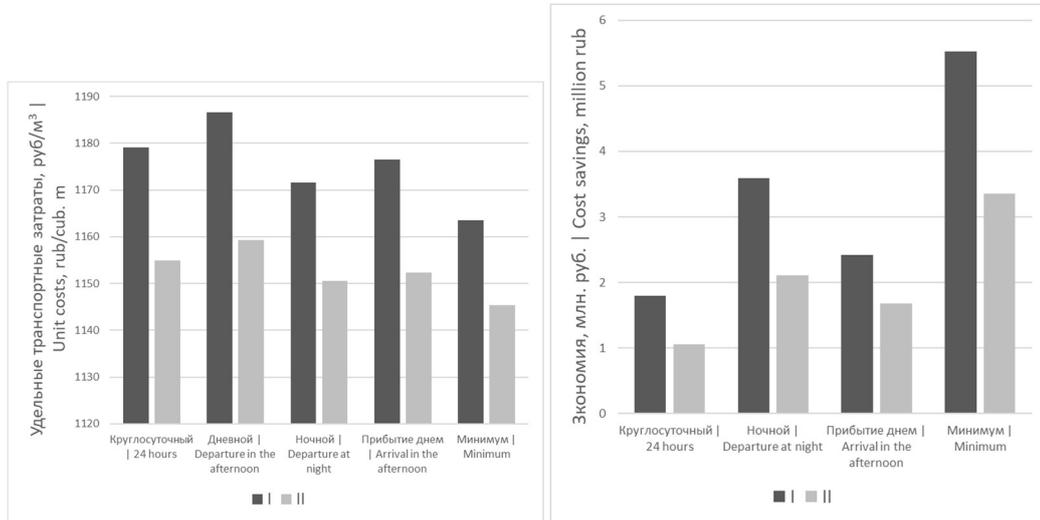


Рисунок 7. Результаты для альтернативных режимов работы: I – Вариант с размещением производства в г. Медвежьегорске; II – Вариант с размещением производства в п. Пряжа

Figure 7. The results for alternative operating modes: I – The plant located in the city of Medvezhyegorsk; II – The plant located in in the village of Pryazha

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Таблица 4

### Оптимальные рейсы

Table 4

### The best runs

Лесничество   Forest district	ID	Медвежьегорск   Medvezhyegorsk			Пряжа   Pryazha		
		Отправление   Departure	Прибытие   Arrival	Удельные затраты, руб/куб. м   Unit costs, rub/cub. m	Отправление   Departure	Прибытие   Arrival	Удельные затраты, руб/куб. м   Unit costs, rub/cub. m
Пудожское	(1)	2:10	5:57	1246,7	0:50	8:05	2277,3
Суоярвское	(2)	23:50	7:09	1981,3	1:40	7:00	1212,4
Олонецкое	(3)	2:00	5:43	1413,3	2:30	3:46	476,0
Пряжинское	(4)	2:40	5:59	1305,1	2:40	3:31	367,0
Прионежское	(5)	2:10	6:04	1264,3	2:40	5:09	712,5
Кондопожское	(6)	3:00	4:24	533,8	2:40	4:41	790,1
Медвежьегорское	(7)	2:40	4:31	533,5	0:50	4:43	1389,2
<b>Всего   Total</b>	-	-	-	<b>1163,5</b>	-	-	<b>1145,4</b>

Полезность модели подтверждается на конкретном примере решения задачи выбора места размещения нового производства. Полученные результаты подтверждают необходимость учета особенностей конкретных участков дорожной сети, включая суточные колебания интенсивности движения, при оценке транспортных затрат. Выполнение оценки эффективности только на основе изменения пробега транспортных средств может приводить к достаточно большим погрешностям при определении транспортных затрат.

Кроме того, модель позволяет выполнять оценку различных вариантов режимов работы мощностей на перевозках древесины и выявлять наиболее эффективные промежутки времени внутри суток для совершения рейсов с наименьшими удельными затратами.

В данном исследовании из соображений равномерности и неистощительности лесопользования вклад каждого из семи лесничеств в снабжение предприятия по производству гофрошпонных панелей был принят пропорциональным их годовой расчетной лесосеке в разрезе мягколиственной древесины (табл. 1, рис. 2) и не подлежал варьированию.

Принимая во внимание значительное превышение расчетной лесосеки над плановыми объемами поставок внутри равномерного сценария, представляется вполне допустимым изменение баланса поставок в пользу тех лесничеств, для которых значение транспортных затрат является более выгодным. Это может привести к существенному сокращению удельных и суммарных транспортных затрат.

Например, в случае с размещением предприятия по производству гофрошпонных панелей в п. Пряжа наивысшее значение удельных транспортных затрат показывает маршрут доставки древесины из Пудожского лесничества (рис. 5). Существенно сократить транспортные затраты удастся, если, например, отказаться от поставок из Пудожского лесничества и передать соответствующие объемы в Пряжинское лесничество, которое обладает достаточным запасом по расчетной лесосеке (табл. 1). Мы не стали приводить результаты моделирования для данного и подобных ему случаев. Это может стать темой для дальнейших исследований с использованием разработанной модели.

## Список литературы

1. Соколов А.П., Питухин Е.А., Шабаетов А.И., Галактионов О.Н., Зятева О.А. Концепция информационной системы поддержки принятия решений по повышению эффективности функционирования лесного комплекса. // Программная инженерия. – 2023. – Т.14, № 9. – С.419-430. DOI: <https://doi.org/10.17587/prin.14.419-430>
2. Galaktionov O.N., Sukhanov Yu.V., Vasilev A.S., Kuzmenkov A.A. Corrugated veneer joinery and construction material and its sound insulation properties // E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2024) – 2024. – N531. – P.01042. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202453101042>
3. Galaktionov O.N., Sukhanov Yu.V., Vasilev A.S., Kuzmenkov A.A., Kuznecov A.V., Lukashevich V.M. Evaluating thermal insulation property of the corrugated veneer birch wood panel offered to use as a modern cladding material for interior decoration // Ad Alta: Journal of Interdisciplinary Research. – 2023. – vol.13, N2. – P.357-360. DOI: <http://dx.doi.org/10.33543/1302>
4. Audy J., D’Amours S., Rönnqvist M. Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review // International Journal of Forest Engineering. – 2022. – 34(5). – P. 1-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>
5. Ivannikov V., Bukhtoyarov V., Kvitko K., Shvyrev A. Improvement of the methodology for the design of technological transport of timber industry enterprises // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – vol. 1001. – 012031. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012031>

6. Leonello E.C., Acuna M., Brown M., Esperancini M.S.T., Ballarin A.W., Guerra S.P.S., Eufrade-Junior H.d.J. The Impact of Wood Moisture Content on the Productivity and Costs of Forest Energy Supply Chains in Southeast Brazil // *Forests*. – 2024. – 15. – 139. DOI: <https://doi.org/10.3390/fl5010139>
7. Mokhirev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Analysis of the cost structure of timber transportation and their seasonal dynamics // *Forestry Engineering Journal*. – 2020. – 10(2). – P. 123-133. DOI: <http://dx.doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/12>
8. Hasani A., Khosrojerdi A. Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study. // *Transport Res E-Log*. – 2016. – N87. – P. 20-52. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.009>
9. Ivanov D., Tspoulanidis A., Schönberger J. *Global Supply Chain and Operations Management: A decision-oriented introduction into the creation of value*. – New York: Springer, 2017. – 578 p.
10. Ivanov D. *Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management* – New York: Springer, 2018. – 320 p.
11. Mistree F., Allen, J., Khosrojerdi A., Rasoulifar G. *Architecting Fail Safe Supply Networks*. – CRC Press, 2017. – 358 p.
12. Алферьев Д.А. Агент-ориентированное моделирование устойчивой лесной деятельности // *Искусственные общества*. – 2023. – Т. 18. – Выпуск 4. DOI: <http://dx.doi.org/10.18254/S207751800028426-7>
13. Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри // *Лесотехнический журнал*. – 2017. – №3. – С.307-314. DOI: [http://dx.doi.org/10.12737/article\\_59c2140d704ae5.63513712](http://dx.doi.org/10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712)
14. Рукомойников К.П., Мохирев А.П., Медведев С.О., Дербенева Е.Ю. Отдельные особенности имитационного моделирования технологического процесса вывозки древесины // *Наука и бизнес: пути развития*. – 2020. – № 10 (112). – С. 104-107.
15. Кручинин И.Н. Имитационное моделирование взаимодействия ходовой части лесотранспортной машины с опорной поверхностью // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. – 2016. – Т. 1. – С. 62-65.
16. Легкий С.А. Методический подход к расчету тарифов на грузовые автомобильные перевозки // *Вести Автомобильно-дорожного института*. – 2022. – №1(40). – С. 64-75.
17. Соколов А.П. Оценка эффективности процессов транспортировки древесины с помощью имитационного моделирования // *Ресурсы и технологии: интеграция науки и бизнеса: Материалы I Международного инженерного форума*. – Петрозаводск, 2024. – С.232-235.
18. Шведовский П.В., Клебанюк Д.Н. *Изыскания и проектирование автомобильных дорог*. – Москва: Инфра-Инженерия, 2021. – 616 с.
19. Goryaeva E.V., Mokhirev A.P., Medvedev S.O., Bragina N.A. Analysis of the Distribution of Movement Speed from Time of Day // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – 720. – 012029. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012029>
20. Маркуц В.М. *Транспортные потоки автомобильных дорог*. – Москва: Инфра-Инженерия, 2018. – 148 с.
21. Стратегия развития лесного комплекса Республики Карелия до 2030 года: Утверждена распоряжением Правительства Республики Карелия № 235р-П 29 марта 2019 г. – 56 с.
22. Об утверждении особенностей режима рабочего времени и времени отдыха, условий труда водителей автомобилей: Приказ Министерства транспорта РФ от 16 октября 2020 г. № 424.

### References

1. Sokolov A.P., Pitukhin E.A., Shabaev A.I., Galaktionov O.N., Zyateva O.A. *Koncepciya informacionnoj sistemy podderzhki prinyatiya reshenij po povysheniyu effektivnosti funkcionirovaniya lesnogo kompleksa*. [The Concept of an Information System to Support Decision-Making to Improve the Efficiency of the Forest Complex]. *Programmnyaya inzheneriya = Software Engineering*. 2023; 14(9): 419-430. (in Rus) DOI: <https://doi.org/10.17587/prin.14.419-430>

2. Galaktionov O.N., Sukhanov Yu.V., Vasilev A.S., Kuzmenkov A.A. *Corrugated veneer joinery and construction material and its sound insulation properties*. E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2024). 2024; 531: 01042. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202453101042>
3. Galaktionov O.N., Sukhanov Yu.V., Vasilev A.S., Kuzmenkov A.A., Kuznecov A.V., Lukashevich V.M. *Evaluating thermal insulation property of the corrugated veneer birch wood panel offered to use as a modern cladding material for interior decoration*. Ad Alta: Journal of Interdisciplinary Research. 2023; 13(2): 357-360. DOI: <http://dx.doi.org/10.33543/1302>
4. Audy J., D'Amours S., Rönnqvist M. *Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review*. International Journal of Forest Engineering. 2022; 34(5): 1-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>
5. Ivannikov V., Bukhtoyarov V., Kvitko K., Shvyrev A. *Improvement of the methodology for the design of technological transport of timber industry enterprises*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020; 1001: 012031. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012031>
6. Leonello E.C., Acuna M., Brown M., Esperancini M.S.T., Ballarin A.W., Guerra S.P.S., Eufrade-Junior H.d.J. *The Impact of Wood Moisture Content on the Productivity and Costs of Forest Energy Supply Chains in Southeast Brazil*. Forests. 2024; 15: 139. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15010139>
7. Mokhirev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. *Analysis of the cost structure of timber transportation and their seasonal dynamics*. Forestry Engineering Journal. 2020; 10(2): 123-133. DOI: <http://dx.doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/12>
8. Hasani, A., Khosrojerdi, A. *Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study*. Transport Res E-Log. 2016; 87: 20-52. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.009>
9. Ivanov D., Tsipoulanidis A., Schönberger J. *Global Supply Chain and Operations Management: A decision-oriented introduction into the creation of value*. New York: Springer, 2017: 578.
10. Ivanov D. *Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management*. New York: Springer, 2018, 320 p.
11. Mistree F., Allen, J., Khosrojerdi A., Rasoulifar G. *Architecting Fail Safe Supply Networks*. CRC Press, 2017, 358 p.
12. Alferev D.A. *Agent-orientirovanное моделирование устойчивой лесной деятельности*. [Agent-based Modeling of Sustainable Forestry Activities]. Iskusstvennye obshchestva = Artificial societies. 2023; 18(4). (in Rus). DOI: <http://dx.doi.org/10.18254/S207751800028426-7>
13. Sokolov A.P., Osipov E.V. *Imitacionное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри*. [Simulation of the production process of timber harvesting with the help of petri nets]. Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2017; 3: 307-314. (in Rus). DOI: [http://dx.doi.org/10.12737/article\\_59c2140d704ae5.63513712](http://dx.doi.org/10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712)
14. Rukomojnikov K.P., Mohirev A.P., Medvedev S.O., Derbeneva E.YU. *Otdel'nye osobennosti imitacionного моделирования технологического процесса вывозки древесины* [Some features of simulation modeling of the technological process of timber transportation] Nauka i biznes: puti razvitiya = Science and business: development ways. 2020; 10 (112): 104-107. (in Rus)
15. Kruchinin I.N. *Imitacionное моделирование взаимодействия ходовой части лесотранспортной машины с опорной поверхностью* [Simulation modeling of the interaction of the chassis of a forestry machine with the supporting surface]. Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse = Modernization and scientific research in the transport complex. 2016; 1: 62-65. (in Rus)

16. Legkij S.A. *Metodicheskiy podhod k raschetu tarifov na gruzovye avtomobil'nye perevozki*. [Methodological approach to calculating tariffs for road freight transportation]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta*. 2022; 1(40): 64-75. (in Rus)
17. Sokolov A.P. *Ocenka effektivnosti processov transportirovki drevesiny s pomoshch'yu imitacionnogo modelirovaniya*. [Evaluation of the efficiency of timber transportation processes using simulation modeling]. *Resursy i tekhnologii: integraciya nauki i biznesa: Materialy I Mezhdunarodnogo inzhenernogo foruma*. Petrozavodsk, 2024: 232-235. (in Rus)
18. Shvedovskij P.V., Klebanyuk D.N. *Izyskaniya i proektirovanie avtomobil'nyh dorog*. [Surveying and designing of highways]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2021: 616. (in Rus)
19. Goryaeva E.V., Mokhirev A.P., Medvedev S.O., Bragina N.A. *Analysis of the Distribution of Movement Speed from Time of Day*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021; 720: 012029. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012029>
20. Markuts V.M. *Transportnye potoki avtomobil'nyh dorog*. [Traffic flows on highways]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2018: 148.
21. *Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Respubliki Kareliya do 2030 goda*: Uтверждена распоряжением Правительст ва Respubliki Kareliya N 235r-P, 29 March 2019: 56. (in Rus)
22. *Ob utverzhdenii osobennostej rezhima rabochego vremeni i vremeni ot dyha, uslovij truda voditelej avtomobilej*: Prikaz Ministerstva transporta RF, 16 Oktober 2020, 424. (in Rus)

### Сведения об авторах

*Соколов Антон Павлович* – доктор техн. наук, профессор, зав/ кафедрой транспортных и технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0798-4634>, e-mail: [a\\_sokolov@psu.karelia.ru](mailto:a_sokolov@psu.karelia.ru).

### Information about authors

*Anton P. Sokolov* – Dr. Sci. (Tech.), Head of the Department of transporting and technology machinery and equipment, Petrozavodsk State University, Lenin av., 33, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0798-4634>, e-mail: [a\\_sokolov@psu.karelia.ru](mailto:a_sokolov@psu.karelia.ru).