

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 630*31

А.П. Соколов, В.А. Шаин, Д.И. Тукусер

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПЕРЕВОЗКАХ ДРЕВЕСИНЫ

Введение. Эффективность организации транспортных потоков на перевозках древесины является одним из важнейших факторов, принимаемых во внимание при решении задач планирования освоения лесных участков, пространственного размещения лесных складов и деревоперерабатывающих производств. Транспортная составляющая в производственных затратах лесозаготовительных компаний может достигать 50–60% [Ivannikov et al., 2020; Audy et al., 2022]. При этом адекватное прогнозирование транспортных издержек в лесной отрасли в достаточной степени затруднено. Это связано с необходимостью учета большого числа влияющих факторов, которые чаще всего не зависят друг от друга, что приводит к реализации очень многих их сочетаний и комбинаций. К таким факторам следует отнести пространственное распределение лесных ресурсов, плотность используемой дорожной сети, фактическое расположение и характеристики отдельных участков дорог, средние скорости движения по разным участкам, загруженность разных участков дорог трафиком, распределение загрузки трафиком в течение суток, используемые транспортные средства и их характеристики (грузоподъемность, скорость, расход топлива, надежность и др.), действующие нормы труда и отдыха водителей автомобилей, время работы складов отправки и назначения. Ключевое значение здесь получает точность оценки эксплуатационной скорости, реализующейся на конкретном маршруте, которая существенным образом зависит от характеристик используемых участков дорог, интенсивности движения по ним, а также от общего времени движения, т. к. чем больше время движения, тем больше необходимо сделать остановок для отдыха. Принимая во внимание большой диапазон возможных расстояний перевозки, кото-

рый в отдельных случаях может составлять 500 км и более, реальные значения эксплуатационной скорости также могут изменяться в очень широких пределах.

Одним из методов решения сложных задач по оценке производственной эффективности и планированию организации производства, в том числе по организации и планированию транспортных потоков, является метод имитационного моделирования. Этот метод хорошо зарекомендовал себя в вопросах анализа и синтеза цепей поставок [Ivanov, 2018], а также давно и широко используется для решения прикладных задач в области лесозаготовительного производства [Герасимов, Перский, 2004; Соколов, 2023].

На сегодняшний день разработаны разнообразные средства и программные среды для осуществления имитационного моделирования, в которых реализуются методы системной динамики, агентного и дискретно-событийного моделирования. Одним из мощных и быстро развивающихся решений на сегодняшний день является программная среда имитационного моделирования AnyLogic. Данная статья посвящена описанию разработанной авторами имитационной модели поставок древесины.

Материалы и методика исследования. Разработанная авторами модель использует сочетание двух подходов – агентного моделирования и дискретно-событийного моделирования. Соединение этих двух методов совместно с использованием технологии OpenMap позволило весьма эффективно решить поставленную задачу. Объектами моделирования являются сеть автомобильных дорог и транспортные потоки Республики Карелия и соседствующих с ней регионов Российской Федерации – Архангельской, Вологодской, Ленинградской и Мурманской областей. Представленные регионы традиционно характеризуются высоким уровнем развития лесного комплекса, поэтому решение описываемой задачи для этих территорий является весьма актуальным.

В качестве основного критерия эффективности транспортных потоков было решено использовать удельные транспортные затраты [Легкий, 2022]:

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

где C_T – удельные транспортные затраты, руб/м³; C_{var} – переменные затраты, руб/км; l – расстояние ездки, км; β – 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, м³.

Таким образом, при неизменных параметрах парка используемых транспортных средств и уровне операционной эффективности перевозчиков удельные транспортные затраты на каждом конкретном маршруте будут зависеть только от эксплуатационной скорости V :

$$C_T = f(V). \quad (2)$$

Эксплуатационная скорость на маршруте определяется отношением расстояния ездки к фактическому времени, прошедшему с момента начала движения от пункта погрузки до прибытия на пункт разгрузки:

$$V = \frac{l}{t_r}, \quad (3)$$

где t_r – время с момента начала движения от пункта погрузки до прибытия на пункт разгрузки (время ездки), ч:

$$t_r = \sum_{i=1}^M t_i, \quad (4)$$

где t_i – время движения автомобиля по участку маршрута i , ч; M – число участков маршрута с разными характеристиками.

Время движения по отдельному участку в свою очередь можно найти как:

$$t_i = \frac{l_i}{V_i} + t_i^{out}, \quad (5)$$

где l_i – длина участка i , км; V_i – средняя скорость движения по участку i , км/ч; t_i^{out} – время остановок на отдых, пришедшихся на участок i , ч.

В соответствии с работой [Шведовский, Клебанюк, 2021], скорость движения по участку дороги может быть определена по формуле:

$$V_i = V_i^0 - \alpha_i \cdot N_i, \quad (6)$$

где V_i^0 – скорость движения по участку i одиночного автомобиля при отсутствии помех, км/ч; N_i – суммарная интенсивность движения в обоих направлениях по участку i , ч⁻¹; α_i – коэффициент снижения скорости, который зависит от состава транспортного потока.

Суммарная интенсивность движения изменяется в течение суток, являясь по сути функцией времени. В разрабатываемой модели для учета изменения интенсивности движения, сутки были разбиты на двухчасовые интервалы. Суммарная интенсивность движения в обоих направлениях внутри двухчасового интервала принимается постоянной и вычисляется по формуле:

$$N_{ij} = \gamma_{ij} \cdot N_i^b, \quad (7)$$

где N_{ij} – интенсивность движения по участку i внутри периода j , ч⁻¹; γ_{ij} – доля среднесуточного числа транспортных средств, следующих через уча-

сток i в течение периода j ; N_i^b – среднесуточная интенсивность движения в одном направлении для участка i , сут^{-1} .

Таким образом, скорость движения автомобиля по участку дороги i внутри временного периода j будет определяться формулой:

$$V_{ij} = V_i^0 - \alpha_i \cdot \gamma_{ij} \cdot N_i^b. \quad (8)$$

Тогда время движения по участку i будет равно:

$$t_i = \sum_{j=1}^{12} \frac{l_{ij}}{V_{ij}} + t_i^{\text{out}}, \quad (9)$$

где l_{ij} – расстояние, пройденное автомобилем по участку i внутри временного периода j , км.

Расстояния l_{ij} будут зависеть от конкретного момента времени въезда автомобиля на участок i .

Значения коэффициентов γ , определяющих суточные колебания интенсивности дорожного движения, были определены для двухчасовых интервалов в соответствии с работой [Маркуц, 2018]. Они приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента γ

Values of the γ indexes

Период, ч	0–1	2–3	4–5	6–7	8–9	10–11	12–13	14–15	16–17	18–19	20–21	22–23
За городом	0,07	0,034	0,037	0,055	0,072	0,082	0,078	0,064	0,094	0,141	0,154	0,119
В городе	0,066	0,026	0,024	0,048	0,08	0,103	0,095	0,064	0,09	0,138	0,151	0,116

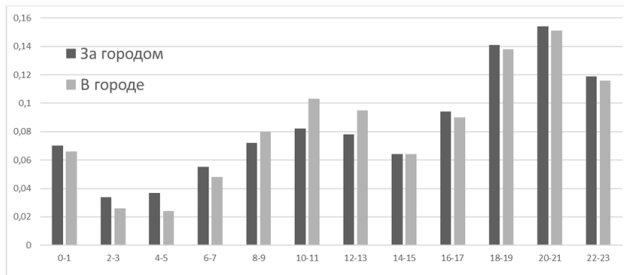


Рис. 1. Значения коэффициента γ

Fig. 1. Values of the γ indexes

Источником данных о среднесуточной интенсивности движения на различных участках дорожной сети стал сайт государственной системы контроля за формированием и использованием средств дорожных фондов (СКДФ), оператором которой является Федеральное дорожное агентство Росавтодор. Данная система предоставляет любому желающему большой объем информации обо всех федеральных, региональных и местных дорогах Российской Федерации, в том числе и данные мониторинга интенсивности движения. В состав сервиса СКДФ входит интерактивная карта, с помощью которой очень удобно получать всю необходимую информацию о любом участке дорожной сети (рис. 2).

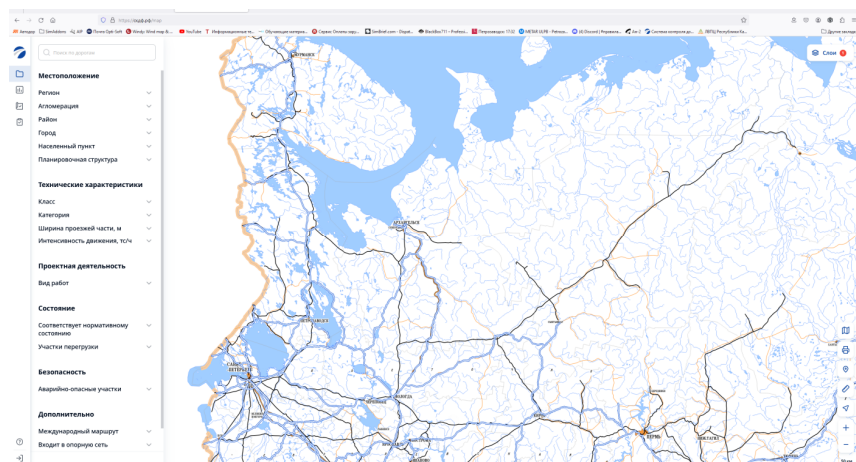


Рис. 2. Интерактивная карта СКДФ
Fig. 2. SKDF interactive map

В итоге для целей моделирования была собрана информация о 210 участках, принадлежащих 21 дороге различного значения. Среди них 5 дорог федерального значения и 16 региональных трасс. Интенсивность на разных участках варьируется в широких пределах от 49727 автомобилей в сутки на наиболее нагруженных участках вблизи г. Санкт-Петербурга до 35 автомобилей в сутки для дороги РЗ 86К-262 «Подъезд к д. Нижняя Салма».

Для оценки эффективности функционирования транспортных потоков в предлагаемой имитационной модели используется так называемый метод контрольного транспортного средства, который заключается в прямом за-

мере времени движения транспортного средства от места погрузки до места разгрузки. С учетом всего вышеизложенного, измеренное время будет зависеть от используемого маршрута, а также от момента начала движения, т. к. интенсивность движения изменяется в течение суток. Для получения полной картины для всего суточного цикла предлагается отправлять контрольные транспортные средства по маршруту с какой-либо постоянной периодичностью, например, каждые 10–15 мин, и фиксировать полученные результаты для дальнейшего анализа.

Результаты исследования. Реализация метода контрольного транспортного средства выполнена с использованием агентного моделирования в среде AnyLogic. При этом используется открытая популяция автомобилей-сортиментовозов, в которую новый экземпляр добавляется в момент начала движения очередного автомобиля и удаляется после достижения автомобилем точки назначения.

Имитация движения автомобилей происходит в среде ГИС, которая генерируется средствами AnyLogic с использованием технологии OpenMap. При этом среда ГИС содержит все необходимые для данной модели трассы дорог, что избавляет от выполнения трудоемких работ по созданию графа дорожной сети. Кроме того, среда содержит несколько встроенных маршрутизаторов, которые автоматически определяют оптимальные маршруты между заданными точками на карте.

Для изменения скорости движения автомобилей при переходе с одного участка дороги на другой, а также при изменении интенсивности движения, которое происходит в модели каждые два часа, используются инструменты дискретно-событийного моделирования. Как отмечалось выше, вся задействованная сеть дорог разделена на 210 участков, которые отличаются либо интенсивностью движения, либо базовой скоростью (скоростью при отсутствии помех). Для обозначения границ участков в используемую среду ГИС в местах соединения участков дорог были добавлены точечные объекты (ГИС-точки), в свойства которых записывались значения интенсивности и базовой скорости. На рис. 3 показан фрагмент ГИС-пространства с нанесенными пограничными точками.

Таким образом, прежде всего при выполнении модели необходимо обеспечить отправку автомобиля от точки к точке вдоль маршрута, изменяя при этом скорость при прохождении через очередную точку. Это было осуществлено с помощью блоков Библиотеки моделирования процессов AnyLogic, таких как `source`, `moveTo` и `sink` (рис. 4).

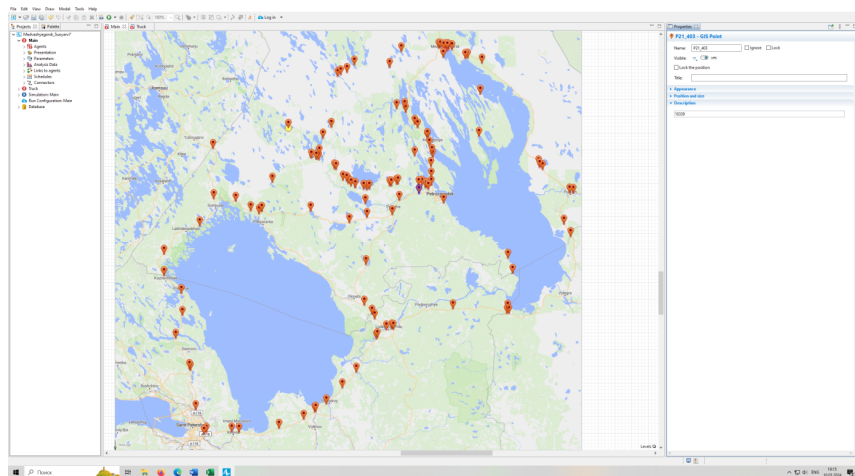


Рис. 3. Среда ГИС и пограничные точки
Fig. 3. GIS environment and junction points

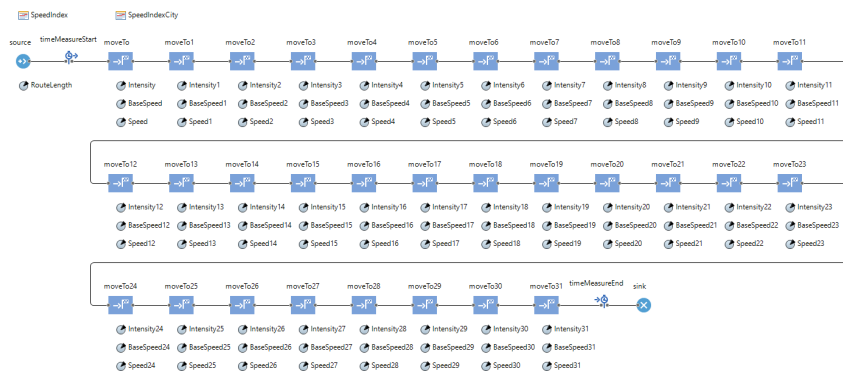


Рис. 4. Граф дискретно-событийной модели
Fig. 4. Discrete event model graph

Блок source с заданной периодичностью добавляет в популяцию агентов новый автомобиль-сортиментовоз. Блок sink удаляет автомобиль из популяции после достижения им конечной точки маршрута. Блоки moveTo отправляют автомобили к следующей точке на маршруте, при этом изменяя их скорость в соответствии с формулой (8). Для подсчета скорости каждому блоку moveTo ставятся в соответствие три параметра: Intensity –

базовая интенсивность для следующего участка маршрута, BaseSpeed – базовая скорость для следующего участка маршрута и Speed – расчетная скорость, определяемая по формуле (8). Также каждый блок moveTo увеличивает на единицу значение параметра stage агента. В дальнейшем по значению этого параметра определяется, на каком участке маршрута в данный момент находится каждый моделируемый автомобиль-сортиментовоз.

Учет суточных колебаний интенсивности дорожного движения реализован с помощью блоков Библиотеки моделирования процессов «Schedule», которые в том числе позволяют изменять значения заданных переменных в определенные моменты модельного времени. Блок «SpeedIndex» каждые два часа изменяет значение коэффициента γ для загородных дорог, блок «SpeedIndexCity» делает это применительно к городским участкам. Блок «Schedule» (рис. 5) содержит таблицу значений коэффициентов γ (табл. 1), которые сменяют друг друга в заданные моменты времени.

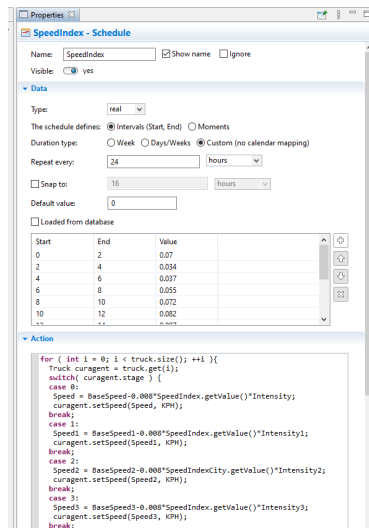


Рис. 5. Блок «Schedule»
Fig. 5. The block “Schedule”

Кроме того, в секцию «Action» этого блока добавлен программный код на языке Java, с помощью которого при достижении следующего двухчасового интервала изменяется скорость всех автомобилей с учетом характери-

стик того участка маршрута, на котором они в данный момент находятся (переменная stage). Без этого модель бы работала некорректно, задавая новую скорость только для автомобилей, начинающих движение по участку. Автомобили, уже находящиеся на участке, продолжали бы движение со старой скоростью, что в условиях, когда некоторые участки могут иметь достаточно большую длину, приводило бы к недопустимой величине ошибки.

Блоки timeMeasureStart и timeMeasureEnd служат для фиксации времени прохождения маршрута каждым автомобилем.

Кроме прочего, AnyLogic предоставляет мощные инструменты визуализации и анализа результатов. На рис. 6 показано окно анимации модели, в котором можно в режиме модельного времени наблюдать за движением агентов-автомобилей по заданному маршруту, за изменением их скорости и т. д. Также в окне в режиме on-line отрисовывается ряд графиков, показывающих изменение времени прохождения маршрута каждым следующим автомобилем, их среднюю скорость, а также статистические параметры, такие как распределение времени в пути, среднее время и средняя скорость для всех уже прибывших автомобилей. Кроме того, все численные параметры сохраняются во встроенной базе данных и могут быть впоследствии подвергнуты всестороннему анализу, в том числе и с использованием сторонних средств.

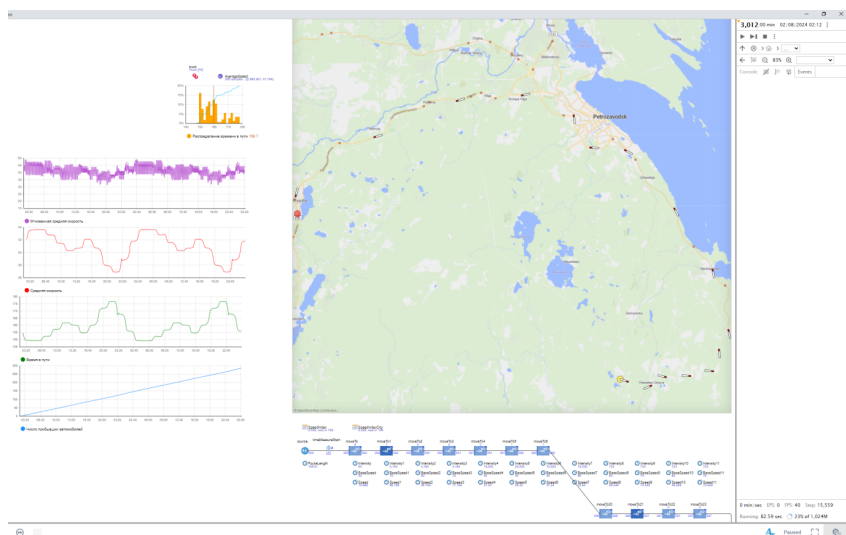


Рис. 6. Анимация выполнения модели
Fig. 6. Model animation window

Заключение. Разработанная имитационная модель поставок древесины, благодаря учету большого числа влияющих факторов, позволяет получать достаточно точные оценки эксплуатационной скорости автомобилей-сортиментовозов, реализующейся на конкретном маршруте на различных временных отрезках. Это в свою очередь позволяет оценивать экономическую эффективность и производить сравнение различных вариантов организации транспортных потоков, осуществлять поддержку принятия решений в вопросах планирования освоения лесных участков, размещения лесных складов, деревоперерабатывающих производств и элементов транспортной инфраструктуры.

Используемый для реализации пакет программ AnyLogic благодаря наглядным интерактивным инструментам управления моделями и мощным средствам визуализации, включая технологию OpenMap, делает достаточно простым взаимодействие пользователя с моделью и существенно облегчает интерпретацию получаемых результатов.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Герасимов Ю.Ю., Перский С.Н. Имитационная модель сплошных рубок на основе ГИС-технологий // Моделирование, оптимизация и интенсификация производственных процессов и систем: матер. Междунар. науч.–практич. конф. Вологда, 2004. С. 286–289.

Легкий С.А. Методический подход к расчету тарифов на грузовые автомобильные перевозки // Вести Автомобильно-дорожного института. 2022. №1(40). С. 64–75.

Маркуц В.М. Транспортные потоки автомобильных дорог. М.: Инфра-Инженерия, 2018. 148 с.

Соколов А.П. Имитационное моделирование процессов заготовки древесины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 245. С. 244–260.

Шведовский П.В., Клебанюк Д.Н. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. М.: Инфра-Инженерия, 2021. 616 с.

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. Vol. 34, iss. 5. P. 1–25.

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. Art. no. 012031.

Ivanov D. Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management. New York: Springer, 2018. 320 p.

References

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, vol. 34, iss. 5, pp. 1–25.

Gerasimov Yu.Yu., Persky S.N. Simulation model of clearcuts based on GIS technologies. *Modeling, optimization and intensification of production processes and systems*: proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Vologda, 2004, pp. 286–289. (In Russ.)

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, art. no. 012031.

Ivanov D. Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management. New York: Springer, 2018. 320 p.

Legkii S.A. Methodical Approach to the Tariff Calculation for Trucking. *Bulletin of the Automobile and Highway Institute*, 2022, no. 1(40), pp. 64–75. (In Russ.)

Markuts V.M. Road traffic flows. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2018. 148 p. (In Russ.)

Shvedovsky P.V., Klebanyuk D.N. Surveys and design of highways. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2021. 616 p. (In Russ.)

Sokolov A.P. Simulation modeling of wood harvesting processes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 245, pp. 244–260. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 12.11.2024

Соколов А.П., Шаин В.А., Тукусер Д.И. Имитационная модель для анализа транспортных потоков на перевозках древесины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 253. С. 178–190. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.253.178-190

В статье описывается разработанная авторами имитационная модель, предназначенная для анализа транспортных потоков на перевозках древесины. Благодаря учету большого числа влияющих факторов предлагаемая модель позволяет получать достаточно точные оценки эксплуатационной скорости автомобилей-сортиментовозов, реализующейся на конкретном маршруте на различных временных отрезках. Это в свою очередь позволяет оценивать

экономическую эффективность и производить сравнение различных вариантов организации транспортных потоков, осуществлять поддержку принятия решений в вопросах планирования освоения лесных участков, размещения лесных складов, деревоперерабатывающих производств и элементов транспортной инфраструктуры.

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

Sokolov A.P., Shain V.A., Tukuser D.I. Simulation model for wood procurement analysis. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 253, pp. 178–190 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.253.178-190

This paper describes a simulation model of the wood supply in wood procurement. The developed simulation model of wood supply due to taking into account a large number of influencing factors allows us to obtain the correct estimates of the operational speed of timber trucks on a specific route at different time intervals. This makes it possible to evaluate the economic efficiency and compare different variants of transport flows to support decision-making regarding the planning of forest operations and allocation of timber warehouses, wood processing plants and transport infrastructure units.

Keywords: supply chains, forest transport, wood procurement, simulation modeling, road network, traffic intensity, transport costs, timber truck.

СОКОЛОВ Антон Павлович – заведующий кафедрой транспортных и технологических машин и оборудования Петрозаводского государственного университета, доктор технических наук, профессор. SPIN-код: 9742-7110. ORCID: 0000-0002-0798-4634.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: a_sokolov@psu.karelia.ru

SOKOLOV Anton P. – DSc (Technical), Head of transport and production machines and equipment department of Petrozavodsk state university, Professor. SPIN-code: 9742-7110. ORCID: 0000-0002-0798-4634.

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Russia. E-mail: a_sokolov@psu.karelia.ru

ШАИН Всеволод Алексеевич – доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Петрозаводского государственного университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 3910-9180. ORCID: 0000-0002-4935-1595.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: shainva@yandex.ru

SHAIN Vsevolod A. – PhD (Technical), Associated professor of transport and production machines and equipment department of Petrozavodsk state university. SPIN-code: 3910-9180. ORCID: 0000-0002-4935-1595.

185910. Lenin Ave. 33. Petrozavodsk. Russia. E-mail: shainva@yandex.ru

ТУКУСЕР Данила Игоревич – студент Петрозаводского государственного университета. SPIN-код: 3954-3672.

85910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: tukuserdanila@yandex.ru

TUKUSER Danila I. – student of Petrozavodsk state university. SPIN-code: 3954-3672.

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Russia. E-mail: tukuserdanila@yandex.ru