

Р.С. Рогулин

ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ДВУХЭШЕЛОННОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ В ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ НА ТРАНСПОРТНОМ ГРАФЕ С ТРАНЗИТНЫМИ ВЕРШИНАМИ

Введение. Лесопромышленный комплекс характеризуется высокой зависимостью от транспортной логистики, что обусловлено пространственной разобщенностью ресурсов, многоэтапностью доставки через промежуточные пункты и значительной долей транспортных издержек в себестоимости. Это формирует необходимость оптимизации двухэшелонных задач, сочетающих магистральную доставку от предприятия к хамам и последующую дистрибуцию потребителям. Однако классические модели, использующие упрощенные схемы и агрегированные данные, оказываются неадекватны, так как игнорируют сложную топологию реальных дорожных сетей с транзитными узлами, что критично для согласованного планирования.

В связи с этим в работе предлагается новая модель двухэшелонной транспортной задачи для лесопромышленного комплекса, явно учитывающая инфраструктуру в виде взвешенного графа с транзитными вершинами. Её ключевое отличие – расчет стоимости маршрутов на основе кратчайших путей в исходном графе, что позволяет без упрощений оптимизировать согласованную работу магистрального и распределительного эшелонов с учетом ограничений по вместимости транспорта и спросу, повышая практическую применимость решений.

Формулировка задачи. Лесопромышленный комплекс сталкивается со сложной логистической задачей, связанной с многоэтапной доставкой продукции от предприятия к конечным потребителям. Этот процесс организован в виде двух эшелонов – магистрального (от депо к промежуточным хамам) и распределительного (от хабов непосредственно к потребителям). Ключевой проблемой является необходимость совместной оптимизации этих этапов с учетом реальной, сложной топологии транспортной сети, а не упрощенных схем.

Транспортная система моделируется как взвешенный ориентированный граф $G = (V, E)$, где V – множество вершин, E – множество дуг. Его вершины включают депо (предприятие I_0), хабы (множество пунктов перераспределения

I_1), потребителей (с заданным спросом I_2) и транзитные узлы (развязки, станции (I_T)). Транзитные вершины, не являясь пунктами погрузки или выгрузки, критически важны, так как определяют реальные доступные маршруты и затраты на перемещение. На систему наложены ограничения по вместимости транспортных средств и пропускной способности хабов.

Первый эшелон решает задачу маршрутизации: одно транспортное средство стартует из депо, посещает все или часть хабов, разгружая в них определенный объем продукции, и возвращается обратно. Объем груза, доставляемый в каждый хаб, является переменной оптимизации, ограниченной вместимостью транспортного средства.

Второй эшелон представляет собой классическую задачу маршрутизации с ограниченной вместимостью, но привязанную к конкретным хамам. Несколько транспортных средств, стартующих из каждого хама, должны обслужить всех прикрепленных потребителей, полностью удовлетворив их спрос. Маршруты строятся с учетом той же сетевой топологии, включая транзитные узлы.

Эшелоны связаны балансовым ограничением: объем продукции, распределенный от хама потребителям, не может превышать объем, доставленный в этот хаб на первом эшелоне. Целевая функция модели – минимизация суммарных транспортных издержек, которые рассчитываются на основе длин кратчайших путей в исходном транспортном графе, что позволяет точно учитывать реальную инфраструктуру.

Таким образом, предложенная модель обеспечивает комплексную оптимизацию двухуровневой логистики, согласуя решения магистральной доставки и финальной дистрибуции в условиях реальной сети с транзитными вершинами, что повышает ее адекватность и практическую применимость для лесопромышленного комплекса.

Цель и задачи исследования. Исследование направлено на разработку двухэшелонной модели оптимизации транспортной логистики для лесопромышленного комплекса, учитывающей реальную топологию сети. Ключевая цель – согласованное планирование магистральной доставки от предприятия к хамам и последующей дистрибуции к потребителям. Для этого требуется формализовать транспортную структуру в виде взвешенного графа, включающего депо, хабы, потребителей и транзитные вершины (развязки, узлы), которые критически влияют на построение маршрутов и затраты.

Математическая постановка задачи разделяет логику эшелонов: первый эшелон – это маршрутизация с посещением хабов, второй – распределение потоков с ограничениями по вместимости транспорта и спросу. Основная

методологическая задача – интегрировать полный транспортный граф с транзитными вершинами в линейную оптимизационную модель (MILP). Это достигается путем расчета стоимости маршрутов на основе кратчайших путей в графе, что сохраняет адекватность модели без потери линейности структуры.

Заключительные этапы работы включают численную апробацию модели на тестовых данных, приближенных к реальным условиям, для проверки корректности и анализа решений. Результаты позволят оценить практическую применимость модели для планирования в лесопромышленном комплексе и определить направления ее развития, в том числе с учетом факторов неопределенности.

Материалы исследования. Транспортные задачи и их многоэшелонные модификации составляют один из центральных разделов теории оптимизации, широко применяемый в логистике и управлении цепями поставок [Zoran, Drašković, 2024; Chen et al., 2025]. В двух- и трёхэшелонных постановках процесс доставки разделяется на последовательные уровни с промежуточными пунктами консолидации и перераспределения, что позволяет моделировать реальную структуру распределительных сетей [Aryza et al., 2024; He, 2024]. Однако агрегированный подход, традиционно используемый при описании связи между эшелонами, приводит к потере информации о взаимном влиянии решений на разных уровнях [Deliktaş et al., 2023]. Задачи маршрутизации транспортных средств (VRP), являющиеся NP-трудными, решаются преимущественно эвристическими методами [Shehab et al., 2024], при этом транспортная сеть, как правило, аппроксимируется полным графом или матрицей расстояний, что становится критическим ограничением для пространственно распределённых комплексов.

В последние годы возрастает интерес к моделированию транспортных процессов непосредственно на графах инфраструктуры, где вершины соответствуют реальным объектам, а рёбра – допустимым направлениям движения [Sun et al., 2024; Nunes, 2025]. Тем не менее транзитные вершины (развязки, станции, промежуточные узлы) в оптимизационных постановках обычно не учитываются явно, а используются лишь для предварительного расчёта кратчайших путей [Albalawi et al., 2023]. Для лесопромышленного комплекса, характеризующегося разреженной и неоднородной транспортной сетью, высокой долей логистических издержек в себестоимости и зависимостью маршрутов от конкретных элементов инфраструктуры, такое упрощение существенно ограничивает практическую ценность решений

[Helo, Rouzafzoon, 2023]. При этом двухэшелонная структура доставки в лесной логистике, как правило, рассматривается неявно или упрощается до одной укрупнённой транспортной схемы [Nunes, 2025]. Экономические аспекты формирования цепочек поставок сырья и управления ценовой политикой лесопромышленного предприятия, в том числе в условиях неопределённости, рассматривались автором ранее [Рогулин, 2024].

Таким образом, в существующих работах двухэшелонная структура доставки рассматривается в агрегированном виде, транзитные вершины не включаются в оптимизационную модель явно, а согласованная оптимизация решений разных уровней либо отсутствует, либо осуществляется эвристически. Это обуславливает необходимость разработки моделей, одновременно учитывающих реальную топологию транспортной сети, различную логистическую природу эшелонов и строгие ограничения по ресурсам. Смежные постановки, учитывающие факторы неопределённости в задачах лесопромышленного комплекса, рассматривались автором ранее [Рогулин, 2023].

Методика исследования.

1. Множества и индексы.

$G = (V, E)$ – исходный транспортный граф. $V = I_0 \cup I_1 \cup I_2 \cup I_T$, $I_0 = \{0\}$ – депо (одно), I_1 – множество хабов, I_2 – множество потребителей, I_T – множество транзитных вершин. $H := I_1$ – хабы, индекс h . $C := I_2$ – потребители, индекс c . $N_1 := I_0 \cup H$ – узлы 1-го эшелона (депо+хабы), индексы $ij \in N_1$. $N_2 := H \cup C$ – узлы 2-го эшелона (хабы+потребители), индексы $ij \in N_2$. $K := \{1, \dots, m\}$ – доступные транспортные средства (ТС) второго эшелона, индекс k .

2. Параметры.

$d_c \geq 0$ – спрос потребителя $c \in C$. $Q > 0$ – вместимость состава/перевозки первого эшелона (общее количество, которое можно развести по хабам). $q > 0$ – вместимость одного ТС второго эшелона. $m \in \mathbb{N}$ – максимальное число ТС второго эшелона. $d_{ij} \geq 0$ – стоимость/длина кратчайшего пути между вершинами i и j в исходном графе G . Практически: $D = \text{distances}(G)$, где G построен по E , а веса рёбер – по стоимости/длине.

3. Переменные.

1.1. Переменные 1-го эшелона (маршрут по хабам):

• $x_{ij}^{(1)} \in \{0, 1\}$ для $i \neq j$, $i, j \in N_1$: $x_{ij}^{(1)} = 1$, если дуга $i \rightarrow j$ входит в тур 1-го эшелона;

• $u_i \in [0, |H|]$ для $i \in N_1$: порядковая переменная для устранения подтуров (MTZ);

- $s_h \geq 0$ для $h \in H$: объем, доставленный на хаб h первым эшелonom.

1.2. Переменные 2-го эшелона (маршруты ТС от хабов):

- $a_{kh} \in \{0,1\}$ для $k \in K, h \in H$: $a_{kh} = 1$, если ТС k назначено (стартует и возвращается) на хаб h ;

- $x_{kij}^{(2)} \in \{0,1\}$ для $k \in K, i \neq j, i, j \in N_2$: $x_{kij}^{(2)} = 1$, если ТС k проходит дугу $i \rightarrow j$;

- $y_{kc} \in \{0,1\}$ для $k \in K, c \in C$: $y_{kc} = 1$, если потребитель c обслуживается ТС k ;

- $f_{kij} \geq 0$ для $k \in K, i \neq j, i, j \in N_2$: поток груза на дуге $i \rightarrow j$ в маршруте ТС k (используется для вместимости и устранения подтуров).

2. Целевая функция (минимизация суммарной стоимости).

$$\min Z = \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} D_{ij} x_{ij}^{(1)} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_2} D_{ij} x_{kij}^{(2)}. \quad (1)$$

3. Ограничения.

3.1. Первый эшелон: один тур по всем хамам с возвратом в депо.

- (1) Ровно один выход и один вход для каждого узла $i \in N_1$:

$$\sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} x_{ij}^{(1)} = 1, \forall i \in N_1, \sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} x_{ji}^{(1)} = 1, \forall i \in N_1$$

- (2) Устранение подтуров:

Зафиксируем $u_0 = 0$ для депо $0 \in I_0$, а для хабов $h \in H$:

$$1 \leq u_h \leq |H|, \forall h \in H,$$

$$u_i - u_j + |H| x_{ij}^{(1)} \leq |H| - 1, \forall i \in H, \forall j \in H, i \neq j.$$

Это обеспечивает связность тура и исключает циклы, не содержащие депо.

- (3) Баланс объемов первого эшелона:

$$\sum_{h \in H} s_h \leq Q, s_h \geq 0, \forall h \in H.$$

3.2. Второй эшелон: маршруты ТС от хабов к потребителям (CVRP-тип).

3.2.1. Назначение ТС по хамам.

- (4) Каждое ТС либо не используется, либо назначается ровно одному хабу:

$$\sum_{h \in H} a_{kh} \leq 1, \forall k \in K$$

3.2.2. Обслуживание потребителей.

(5) Каждый потребитель обслуживается ровно одним ТС (полное обслуживание):

$$\sum_{k \in K} y_{kc} = 1, \quad \forall c \in C$$

3.2.3. Связь y_{kc} и дуг маршрута.

Для каждого ТС k и потребителя c требуем ровно один вход и один выход, если он обслуживается.

(6) Степенные ограничения на потребителях:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq c}} x_{kcj}^{(2)} = y_{kc}, \quad \forall k \in K, \quad \forall c \in C. \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq c}} x_{kic}^{(2)} = y_{kc}, \quad \forall k \in K, \quad \forall c \in C. \quad (3)$$

3.2.4. Маршрут начинается и заканчивается в выбранном хабе.

(7) Для каждого ТС k : число выходов из хабов равно числу входов в хабы и равно факту использования ТС:

$$\sum_{h \in H} \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} x_{khj}^{(2)} = \sum_{h \in H} a_{kh}, \quad \forall k \in K, \quad (4)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} x_{kih}^{(2)} = \sum_{h \in H} a_{kh}, \quad \forall k \in K. \quad (5)$$

(8) Запрещаем посещение хабов без назначения:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} x_{khj}^{(2)} \leq a_{kh}, \quad \forall k \in K, \quad \forall h \in H,$$

$$\sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} x_{kih}^{(2)} \leq a_{kh}, \quad \forall k \in K, \quad \forall h \in H.$$

Эти ограничения делают так, что ТС k может выходить/входить только в «свой» хаб.

3.2.5. Ограничения по вместимости и устранение подтуров через поток f .

Идея: поток f_{kij} — это количество груза, перевозимого ТС k по дуге $i \rightarrow j$. Он обеспечивает вместимость (на дугах нельзя везти больше q), связность маршрута (нельзя получить отдельный цикл потребителей без хаба), доставку спросов.

(9) Вместимость на дугах:

$$0 \leq f_{kij} \leq qx_{kij}^{(2)}, \forall k \in K, \forall i \neq j, i, j \in N_2.$$

(10) Баланс потока на потребителях (если потребитель обслуживается ТС k , то из потока «вычитается» d_c):

$$\sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq c}} f_{kic} - \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq c}} f_{kcj} = d_c y_{kc}, \forall k \in K, \forall c \in C. \quad (6)$$

(11) Стартовый поток на хабе:

Пусть хаб h выбран для ТС k . Тогда суммарный «выходящий» поток из h равен сумме спросов клиентов, обслуженных ТС k :

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} f_{khj} - \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} f_{kih} = \sum_{c \in C} d_c y_{kc} \cdot a_{kh}, \forall k \in K, \forall h \in H. \quad (7)$$

Чтобы это осталось линейным, заменяем правую часть линейной связкой через вспомогательные переменные $w_{kch} \in \{0, 1\}$, означающие «потребитель c обслужен ТС k и хаб h выбран»: $w_{kch} \leq y_{kc}$, $w_{kch} \leq a_{kh}$, $w_{kch} \geq y_{kc} + a_{kh} - 1$, и тогда:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} f_{khj} - \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} f_{kih} = \sum_{c \in C} d_c w_{kch}, \forall k \in K, \forall h \in H. \quad (8)$$

3.3. Связь эшелонов: сколько завезли в хабы и сколько из них развезли.

Суммарный спрос клиентов, закрепленных за хабом h (через все ТС, стартующие в h), не должен превышать завезенный объем s_h , а при полной доставке равен ему.

(12) Баланс в хабе (полная доставка спроса):

$$s_h = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} d_c w_{kch}, \forall h \in H. \quad (9)$$

Тогда автоматически:

$$\sum_{h \in H} s_h = \sum_{c \in C} d_c. \quad (10)$$

И совместно с $\sum_h s_h \leq Q$ получаем условие выполнимости: $\sum_c d_c \leq Q$.

4. Домены переменных.

$$x_{ij}^{(1)} \in \{0, 1\}, a_{kh} \in \{0, 1\}, x_{kij}^{(2)} \in \{0, 1\}, y_{kc} \in \{0, 1\}, w_{kch} \in \{0, 1\},$$

$$s_h \geq 0, f_{kij} \geq 0, u_0 = 0, 1 \leq u_h \leq |H|.$$

Результаты исследования. Экспериментальные исследования были направлены на проверку корректности предложенной двухэшелонной модели транспортировки, а также на анализ структуры оптимальных решений, формируемых в условиях сложной транспортной сети с транзитными вершинами.

В качестве тестового примера использован транспортный граф, построенный на основе реальной инфраструктуры Приморского края – региона с развитой лесной промышленностью. Вершины графа соответствуют реальным объектам: депо, хабам, потребителям и транзитным узлам; рёбра – существующим автомобильным и железнодорожным маршрутам (рис. 1). Веса рёбер определены как длины кратчайших путей, что позволяет точно учитывать топологию сети.

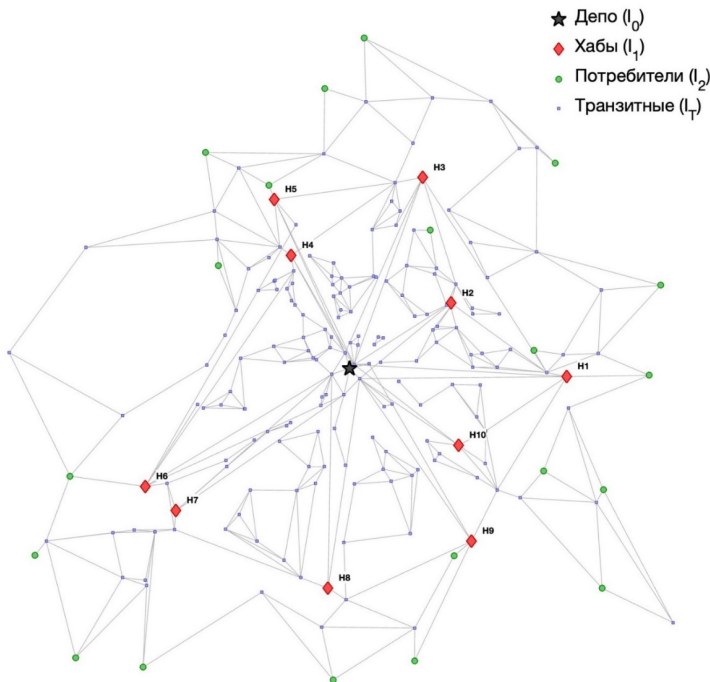


Рис. 1. Визуализация распределения депо, хабов, потребителей, транзитных пунктов и их смежность

Fig. 1. Visualization of the distribution of depots, hubs, consumers, transit points and their adjacency

Параметры тестового примера, используемого для апробации модели, приведены в табл. 1. Транспортный граф построен на основе реальной инфраструктуры Приморского края и содержит около 150 вершин, включая 1 депо, 10 хабов (Н1–Н10), 20 потребителей и около 120 транзитных вершин. Вместимость транспортного средства второго эшелона составляет $q = 80$ единиц, что обеспечивает необходимость использования нескольких ТС для полного удовлетворения суммарного спроса (730,0 единиц).

Таблица 1

Параметры экспериментальной постановки
Parameters of the experimental setup

Параметр	Значение
Число вершин графа $G = (V, E)$	≈ 150
Депо (I_0)	1
Хабы (I_1)	10 (Н1–Н10)
Потребители (I_2)	20
Транзитные вершины (I_T)	≈ 120
Вместимость 1-го эшелона (Q)	≥ 730
Вместимость ТС 2-го эшелона (q)	80
Число доступных ТС (m)	10
Суммарный спрос потребителей	730,0

Результаты решения задачи суммированы в табл. 2. Оптимальное значение целевой функции составило $Z^* = 1619,0$, при этом стоимость маршрута первого эшелона равна 247,4 (15,3% от общей стоимости), а суммарная стоимость маршрутов второго эшелона – 1371,6 (84,7%). Такое соотношение характерно для двухэшелонных систем: магистральный маршрут формирует единый замкнутый цикл по хамам, тогда как распределительные маршруты суммарно покрывают значительно большее число дуг графа, обслуживая 20 потребителей с различным пространственным размещением.

Полное удовлетворение спроса (730,0 из 730,0 единиц, 100%) и отсутствие необслуженных потребителей подтверждают корректность балансовых ограничений модели: объём, доставленный в каждый хаб на первом эшелоне (s_h), в точности соответствует суммарному спросу прикрепленных к нему потребителей, а суммарный объём доставки не превышает вместимости первого эшелона Q .

Детализация маршрутов второго эшелона представлена в табл. 3. Каждое транспортное средство стартует из назначенного хаба, обслуживает прикрепленных потребителей и возвращается обратно. Стоимость каждого

маршрута рассчитана на основе кратчайших путей в исходном транспортном графе G , что обеспечивает точный учёт реальной инфраструктуры, включая транзитные вершины.

Таблица 2

Сводные результаты оптимизации**Summary optimization results**

Показатель	Значение
Общая стоимость (Z^*)	1619,0
Стоимость 1-го эшелона	247,4 (15,3%)
Стоимость 2-го эшелона	1371,6 (84,7%)
Использовано ТС 2-го эшелона	10 из 10
Обслужено потребителей	20 из 20 (100%)
Доставлено единиц продукции	730,0 из 730,0 (100%)
Необслуженные потребители	0

Таблица 3

Характеристики маршрутов ТС второго эшелона**Route characteristics of second echelon vehicles**

Номер ТС	Число потребителей	Объём доставки	Стоимость маршрута
ТС 1	2	79,0	98,4
ТС 2	2	70,0	162,6
ТС 3	2	72,0	129,6
ТС 4	2	80,0	143,8
ТС 5	2	80,0	192,7
ТС 6	2	75,0	54,5
ТС 7	3	77,0	317,6
ТС 8	2	71,0	61,6
ТС 9	1	54,0	57,4
ТС 10	2	72,0	153,5
Итого	20	730,0	1371,6

Анализ данных табл. 3 позволяет выявить ряд закономерностей. Объём доставки каждого ТС не превышает вместимости $q = 80$, что подтверждает выполнение ограничений по вместимости (ограничение 9). При этом наблюдается существенная дифференциация стоимости маршрутов – от 54,5 (ТС 6) до 317,6 (ТС 7). Наиболее затратный маршрут ТС 7 обслуживает 3 потребителей, что указывает на их значительную пространственную разнесённость в графе и необходимость прохождения через множество транзитных

вершин. Напротив, ТС 6 и ТС 8 демонстрируют наименьшую стоимость (54,5 и 61,6 соответственно), что свидетельствует о компактном расположении обслуживаемых потребителей относительно хабов.

Средняя стоимость на единицу доставленной продукции для второго эшелона составляет $1371,6 / 730,0 \approx 1,88$, что характеризует удельную транспортную нагрузку распределительного этапа. Данный показатель может быть использован при сравнении эффективности различных конфигураций хабов.

Визуализация решения представлена на рис. 2, где синим цветом отображён маршрут первого эшелона (замкнутый цикл через все хабы), а оранжевым – маршруты второго эшелона. Маршрут первого эшелона проходит через транзитные вершины транспортного графа, что подтверждает корректную интеграцию сетевой топологии в процедуру оптимизации: стоимость дуг определяется длинами кратчайших путей в графе G , а не евклидовыми расстояниями.

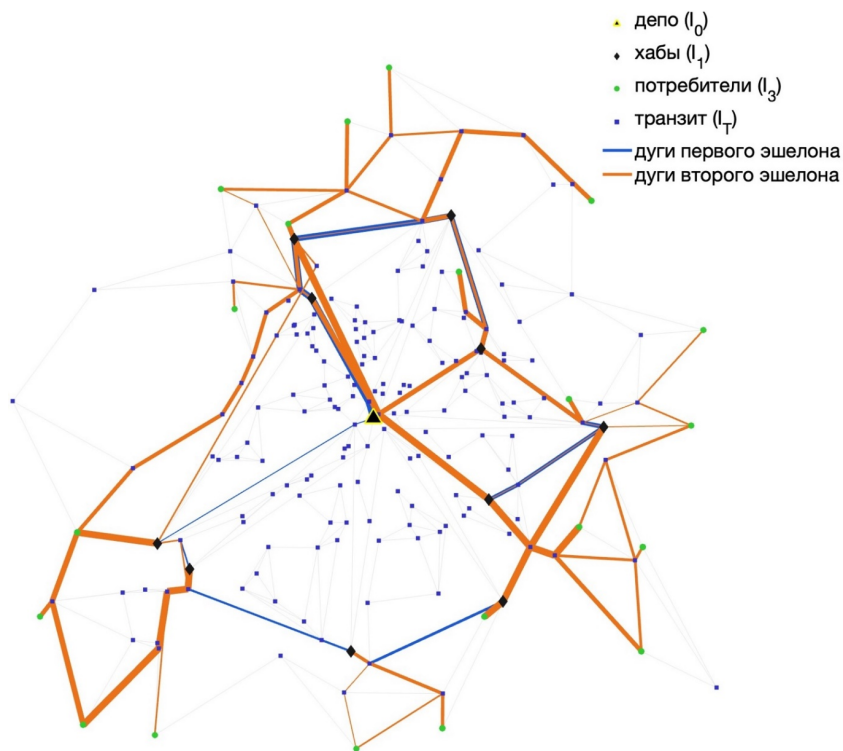


Рис. 2. Визуализация графа решения поставленной задачи
 Fig. 2. Visualization of the solution graph for the given problem

Заключение. Разработана и исследована двухэшелонная модель транспортной логистики лесопромышленного комплекса, ориентированная на согласованную оптимизацию магистральных и распределительных перевозок с учётом реальной топологии транспортной инфраструктуры. В отличие от традиционных подходов, использующих укрупнённые схемы расстояний и агрегированные представления транспортной сети, предложенная модель основывается на графовом описании инфраструктуры с явным включением транзитных вершин, что позволяет более адекватно отражать реальные условия функционирования логистических систем лесопромышленного комплекса.

Ключевой научный результат исследования заключается в формализации двухэшелонной транспортной задачи, в которой различная логистическая природа эшелонов сохранена и учтена в рамках единой оптимизационной постановки. Первый эшелон моделируется как задача маршрутизации с обязательным охватом заданного множества распределительных пунктов, тогда как второй эшелон описывает распределение потоков от хабов к конечным потребителям с ограничениями по вместимости транспортных средств и полному удовлетворению спроса.

Результаты вычислительных экспериментов на транспортном графе Приморского края (≈ 150 вершин, 10 хабов, 20 потребителей) подтверждают корректность предложенной модели. Оптимальное значение целевой функции составило $Z^* = 1619,0$, из которых 247,4 (15,3%) приходится на магистральный маршрут первого эшелона и 1371,6 (84,7%) – на распределительные маршруты второго эшелона. Достигнуто полное удовлетворение спроса всех 20 потребителей (730,0 единиц, 100%), при этом стоимость каждого маршрута рассчитана на основе кратчайших путей в исходном транспортном графе. Показано, что оптимальные маршруты формируются с учётом инфраструктурных узлов, не являющихся логистическими объектами, но существенно влияющих на структуру перевозок. Выявлена значительная дифференциация стоимости маршрутов второго эшелона (от 54,5 до 317,6), обусловленная различиями в пространственном размещении потребителей относительно хабов и структурой транспортного графа.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Рогулин Р.С. Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17, №4. С. 41–56. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.56.

Рогоулин Р.С. Модель формирования цепочки поставок и управления ценовой политикой лесопромышленного предприятия // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18, №4. С. 98–111. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.4.98.111.

Albalawi H., Zaid S.A., El-Shimy M.E., Kassem A.M. Ant Colony Optimized Controller for Fast Direct Torque Control of Induction Motor // Sustainability. 2023. Vol. 15. Art. no. 3740. DOI: 10.3390/su15043740.

Aryza S., Efendi S., Sihombing P., Sawaluddin. A robust optimization to dynamic supplier decisions and supply allocation problems in the multi-retail industry // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 3, no. 3. P. 67–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.305111.

Chen G., Gao J., Chen D. Research on Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Improved Genetic Algorithm and Ant Colony Algorithm // Electronics. 2025. Vol. 14. Art. no. 647. DOI: 10.3390/electronics14040647.

Deliktaş D., Karagoz S., Simić V., Aydin N. A stochastic Fermatean fuzzy-based multi-choice conic goal programming approach for sustainable supply chain management in end-of-life buildings // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 382. Art. no. 135305. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135305.

He S.H. Coordination of production planning in multi-echelon supply chains: a simulation approach // International Journal of Simulation Modelling. 2024. Vol. 23, iss. 4. P. 728–739. DOI: 10.2507/IJSIMM23-4-CO20.

Helo P., Rouzafzoon J. An agent-based simulation and logistics optimization model for managing uncertain demand in forest supply chains // Supply Chain Analytics. 2023. Vol. 2. Art. no. 100042. DOI: 10.1016/j.sca.2023.100042.

Nunes L.J.R. The Role of Artificial Intelligence (AI) in the Future of Forestry Sector Logistics // Future Transportation. 2025. Vol. 5. Art. no. 63. DOI: 10.3390/future-transp5020063.

Shehab W.A.-A., Muhsan H., Alrikabi B., Abdul-Razaq A.-A., Nasser H.K., Hameed A.S. Comparative Analysis of New Solutions for the Capacitated Vehicle Routing Problem Against CVRPLIB Benchmark // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering. 2024. Vol. 10, no. 4. P. 1450–1457. DOI: 10.22399/ijcesen.626.

Sun Y., Zhang C., Sun G. An Interval Fuzzy Programming Approach to Solve a Green Intermodal Routing Problem for Timber Transportation Under Uncertain Information // Forests. 2024. Vol. 15. Art. no. 2003. DOI: 10.3390/f15112003.

Zoran I., Drašković D. Classification of vehicle routing problem // Journal of traffic and transport theory and practice. 2024. Vol. 12, iss. 1. P. 36–41.

References

Albalawi H., Zaid S.A., El-Shimy M.E., Kassem A.M. Ant Colony Optimized Controller for Fast Direct Torque Control of Induction Motor. *Sustainability*, 2023, vol. 15, art. no. 3740. DOI: 10.3390/su15043740.

Aryza S., Efendi S., Sihombing P., Sawaluddin. A robust optimization to dynamic supplier decisions and supply allocation problems in the multi-retail industry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024, vol. 3, no. 3, pp. 67–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.305111.

Chen G., Gao J., Chen D. Research on Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Improved Genetic Algorithm and Ant Colony Algorithm. *Electronics*, 2025, vol. 14, art. no. 647. DOI: 10.3390/electronics14040647.

Deliktaş D., Karagoz S., Simić V., Aydin N. A stochastic Fermatean fuzzy-based multi-choice conic goal programming approach for sustainable supply chain management in end-of-life buildings. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 382, art. no. 135305. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135305.

He S.H. Coordination of production planning in multi- echelon supply chains: a simulation approach. *International Journal of Simulation Modelling*, 2024, vol. 23, iss. 4, pp. 728–739. DOI: 10.2507/IJSIMM23-4-CO20.

Helo P., Rouzafzoon J. An agent-based simulation and logistics optimization model for managing uncertain demand in forest supply chains. *Supply Chain Analytics*, 2023, vol. 2, art. no. 100042. DOI: 10.1016/j.sca.2023.100042.

Nunes L.J.R. The Role of Artificial Intelligence (AI) in the Future of Forestry Sector Logistics. *Future Transportation*, 2025, vol. 5, art. no. 63. DOI: 10.3390/futuretransp5020063.

Rogulin R.S. Mathematical model for the formation of supply chains of raw materials from the commodity exchange under risk based on the profit trajectory for previous periods redundancy. *Business Informatics*, 2023, vol. 17, no. 4, pp. 41–56. (In Russ.)

Rogulin R.S. Management of pricing policy of a timber enterprise considering the problems of formation of raw material supply chains and determining production volumes. *Business Informatics*, 2024, vol. 18, no. 4, pp. 98–111. (In Russ.)

Shehab W.A.-A., Muhsan H., Alrikabi B., Abdul-Razaq A.-A., Nasser H.K., Hameed A.S. Comparative Analysis of New Solutions for the Capacitated Vehicle Routing Problem Against CVRPLIB Benchmark. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 2024, vol. 10, no. 4, pp. 1450–1457. DOI: 10.22399/ijcesen.626.

Sun Y., Zhang C., Sun G. An Interval Fuzzy Programming Approach to Solve a Green Intermodal Routing Problem for Timber Transportation Under Uncertain Information. *Forests*, 2024, vol. 15, art. no. 2003. DOI: 10.3390/f15112003.

Zoran I., Drašković D. Classification of vehicle routing problem. *Journal of traffic and transport theory and practice*, 2024, vol. 12, iss. 1, pp. 36–41.

Материал поступил в редакцию 16.12.2025

Рогулин Р.С. Линейная модель двухэшелонной транспортировки в лесопромышленном комплексе на транспортном графе с транзитными вершинами // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 260–275. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.260-275

В статье разработана математическая модель для оптимизации двухэшелонной транспортной логистики в лесопромышленном комплексе, где процесс доставки разделён на магистральные перевозки от предприятия к хабам и последующую дистрибуцию к потребителям. Ключевая особенность модели – представление транспортной инфраструктуры в виде взвешенного ориентированного графа, включающего не только пункты отправления, перевалки и назначения, но и транзитные вершины, соответствующие узлам дорожной сети (развязки, станции, промежуточные пункты). Такое представление позволяет рассчитывать стоимость маршрутов на основе кратчайших путей в графе, учитывая реальную топологию сети, в отличие от упрощённых подходов с агрегированными расстояниями. Модель формализуется как задача смешанного целочисленного линейного программирования (MILP) с балансовыми ограничениями, связывающими объёмы грузов между эшелонами, ограничениями по вместимости транспортных средств и полному удовлетворению спроса потребителей. Апробация модели проведена на транспортном графе Приморского края, включающем около 150 вершин, 10 хабов и 20 потребителей. Оптимальное значение целевой функции составило 1619,0 условных единиц, из которых 15,3% приходится на магистральный эшелон и 84,7% – на распределительный. Достигнуто полное удовлетворение спроса всех потребителей (730,0 единиц). Стоимость маршрутов второго эшелона варьируется от 54,5 до 317,6, отражая пространственную неоднородность размещения потребителей. Результаты подтверждают корректность модели и демонстрируют формирование согласованных маршрутов, явно учитывающих транзитные узлы инфраструктуры. Предложенный подход применим для планирования перевозок в лесной и других отраслях с пространственно распределённой инфраструктурой.

Ключевые слова: двухэшелонная транспортная задача, муравьиный алгоритм, транспортный граф, лесопромышленный комплекс, логистика.

Rogulin R.S. Linear Model of Two-Echelon Transportation in the Forest Industry on a Transport Graph with Transit Nodes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 260–275 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.260-275

This paper develops a mathematical model for optimizing two-echelon transport logistics in the forest industry, where the delivery process is divided into mainline transportation from an enterprise to hubs and subsequent distribution to consumers. The key feature of the model is the representation of the transport infrastructure as a weighted graph that includes not only departure, transshipment, and destination points, but also transit vertices representing road network nodes. This enables route cost calculation based on shortest paths in the graph, accounting for the real network topology, unlike simplified approaches using aggregated distances. The model is

formalized as a mixed-integer linear programming problem (MILP) with balance constraints linking cargo volumes between echelons and vehicle capacity constraints. The model was tested on a transport graph of Primorsky Krai comprising approximately 150 vertices, 10 hubs, and 20 consumers. The optimal objective function value was 1619.0 cost units, with 15.3% attributed to the mainline echelon and 84.7% to the distribution echelon. Full demand satisfaction was achieved for all consumers (730.0 units). Second-echelon route costs ranged from 54.5 to 317.6, reflecting spatial heterogeneity in consumer distribution relative to hubs and the graph structure. The results confirm the model's correctness and demonstrate coordinated route formation that explicitly accounts for transit infrastructure nodes. The proposed approach is applicable to transportation planning in forestry and other industries with spatially distributed infrastructure.

Keywords: two-echelon transport problem, ant colony algorithm, transport graph, forestry complex, logistics.

РОГУЛИН Родион Сергеевич – старший научный сотрудник кафедры технологий управления Института экономики Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого, кандидат экономических наук. SPIN-код: 4125-0948. ORCID: 0000-0002-3235-6429.

173003, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41, г. Великий Новгород, Новгородская область, Россия. E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ROGULIN Rodion S. – PhD (Economics), Senior Researcher, Department of Management Technologies, Institute of Economics, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University. SPIN-code: 4125-0948. ORCID: 0000-0002-3235-6429.

173003. Bolshaya Sankt-Peterburgskaya str. 41. Veliky Novgorod. Novgorod Region. Russia. E-mail: rafassiaofusa@mail.ru