

Оптимизация маршрутов транспортировки древесины с лесосеки с учетом сезонности грузоперевозок

А.П. Мохирев^a, М.О. Позднякова^b, Т.С. Гудень^c

Лесосибирский филиал Сибирского государственного университета науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,

ул. Победы 29, Лесосибирск, Россия

^aale-mokhirev@yandex.ru, ^bm_o_pozdnyakova@mail.ru, ^ctguden@mail.ru

^a<https://orcid.org/0000-0002-1692-3323>, ^b<https://orcid.org/0000-0003-2015-8246>,

^c<https://orcid.org/0000-0001-6442-4935>

Статья поступила 29.09.2018, принята 1.11.2018

В работе обосновывается проблема определения маршрутов доставки древесного сырья на перерабатывающее предприятие, обуславливающая актуальность разработки комплексной математической модели, а на ее основе — методики оптимизации маршрутов транспортировки древесины. Реализация математической модели призвана снизить затраты на транспортировку и хранение лесных ресурсов. Ставится задача нахождения маршрутов минимальной стоимости доставки определенного количества древесины с разных лесных участков в транспортной сети в заданное количество периодов времени. Математическое моделирование процесса вывозки древесины с лесного участка до пункта доставки представлено в виде транспортной сети с использованием теории графов. Предложен алгоритм определения маршрута доставки древесины с минимальной стоимостью. Обосновываются необходимость определения и учета пропускной способности определенного пути (маршрута), а также расчет стоимости вывозки и хранения древесины на маршруте с учетом факторов времени, природно-климатических условий, типа дороги и способа транспортировки сырья. Разработанная методика апробируется на одном из крупнейших лесозаготовительно-деревоперерабатывающих предприятий Красноярского края. Проводятся расчеты стоимости отдельных составляющих транспортировки древесины для разных периодов времени. В результате получен вариант оптимизации маршрутов доставки древесины на предприятие, который является наиболее эффективным и выгодным по технологическим и экономическим показателям.

Ключевые слова: оптимизация; транспортировка древесины; маршрут минимальной стоимости; динамические транспортные сети.

Optimization of timber transportation routes from the cutting area taking into account the seasonality of cargo transportation*

A.P. Mokhirev^a, M.O. Pozdnyakova^b, T.S. Guden^c

Lesosibirsk Branch of Siberian State University of Science and Technology under name of M.F. Reshetnev; 29, Pobedy St., Lesosibirsk, Russia

^aale-mokhirev@yandex.ru, ^bm_o_pozdnyakova@mail.ru, ^ctguden@mail.ru

^a<https://orcid.org/0000-0002-1692-3323>, ^b<https://orcid.org/0000-0003-2015-8246>,

^c<https://orcid.org/0000-0001-6442-4935>

Received 29.09.2018, accepted 1.11.2018

The paper substantiates the problem of determining the routes of delivery of wood raw materials to the processing enterprise, which determines the relevance of the development of a complex mathematical model, and on its basis - methods of optimization of wood transportation routes. The implementation of the mathematical model is designed to reduce the cost of transportation and storage of forest resources. The task is to find the routes of the minimum cost of delivery of a certain amount of wood from different forest areas in the transport network in a given number of time periods. Mathematical modeling of the process of timber removal from the forest area to the point of delivery is presented in the form of a transport network using graph theory. An algorithm for determining the route of wood delivery with a minimum cost is proposed. The necessity of determining and taking into account the capacity of a certain path (route) is substantiated. The calculation of the cost of transportation and wood storage on the route, taking into account the factors of time, climatic conditions, type of road and method of transportation of raw materials. The developed technique is tested at one of the largest logging and wood processing enterprises of the Krasnoyarsk territory. Calculations of cost of separate components of transportation of wood for different periods of time are carried out. As a result, the option of optimizing the routes of wood delivery to the enterprise, which is the most effective and profitable in terms of technological and economic indicators, was obtained.

Keywords: optimization; wood transport; the route of the minimum cost; dynamic network transport.

Введение

На сегодняшний день важнейшим фактором, сдерживающим возможности наращивания объемов заготовки и доставки потребителю древесины, является нерешенность задачи оптимизации маршрутов транспортировки [1; 2].

При организации лесозаготовительного процесса неизбежно встает вопрос выбора: на каком участке, в какой период времени наиболее выгодно заготавливать древесину, какой транспортный маршрут будет оптимален для доставки заготовленной древесины, какой технологией возможна разработка лесного участка, на каком участке наиболее эффективно расположить склад и т.д.

В настоящее время задача развития транспортной инфраструктуры на территории лесосырьевой базы, осваиваемой много лет, потеряла свою актуальность. За долгие годы эксплуатации построено достаточно дорог для вывозки древесины, однако в большинстве случаев для целей транспортировки создаются дороги временного типа. Получается, что существует множество различных маршрутов доставки древесины, но их использование носит сезонный характер. Природно-климатические, почвенно-грунтовые условия в различные периоды года значительно разделяют дороги по затратам на их восстановление, обслуживание, себестоимости транспортировки древесины, пропускной способности.

Это обуславливает актуальность разработки комплексной математической модели, а на ее основе — методики оптимизации маршрутов транспортировки древесины. Реализация подобной математической модели должна привести к снижению затрат на транспортировку и хранение лесных ресурсов.

Разработано большое количество алгоритмов решения задач нахождения оптимальных маршрутов [3–5]. Многие из них направлены на определение кратчайшего пути [6], многие — на преодоление маршрута за минимальное время [7; 8], однако на сегодняшний день наиболее актуально нахождение минимальной стоимости маршрута [9]. При этом главная задача состоит в нахождении маршрутов минимальной стоимости доставки определенного количества древесины с разных лесных участков в транспортной сети в заданное количество периодов времени.

В данной статье приведена методика, основанная на исследованиях А.В. Боженов [10], Е.М. Герасименко [11], К.П. Рукомойникова [12], Е.В. Платоновой [13] и других исследователей.

Предложенный алгоритм позволяет находить оптимальный маршрут перевозки древесины от начального пункта к конечному в течение нескольких временных периодов, находить минимальный по стоимости маршрут транспортировки, а также максимальный объем древесины, который можно транспортировать по участкам дороги, учитывая пропускную способность и временные периоды [14]. Таким образом, данная методика позволяет найти оптимальный маршрут транспортировки с учетом хранения древесины на складе и использованием необходимого вида транспорта (автомобильного и водного) с лесных участков до потребителя.

Постановка задачи исследования. Математическое моделирование процесса вывозки древесины с лесного участка до пункта доставки представлено в виде транспортной сети — связанного ориентированного графа $G=(V, E)$, где существует V —множество вершин x_i ($i=1, \dots, n$), E —множество дуг (x_i, x_j) . Одна из вершин соответствует лесному участку (источник s), другая — пункту доставки (сток t), остальные — промежуточным пунктам; дуги соответствуют участкам дорог, соединяющих указанные пункты.

Каждой дуге (x_i, x_j) графа поставлены в соответствие неотрицательное число u_{ij} , называемое пропускной способностью дуги, и поток f_{ij} —перевозимое по данному участку количество груза. Кроме того, каждой дуге сопоставлено неотрицательное число c_{ij} —стоимость перевозки единицы потока по дуге. Пропускная способность u_{ij} дуги (x_i, x_j) транспортной сети определяет наибольшее значение потока, которое может протекать по этой дуге [2; 8].

Критерием оптимальности маршрута является минимальная стоимость транспортировки древесины с лесного участка до потребителя за суммарное количество периодов времени. Определяется маршрут минимальной стоимости от s' к t' методом Басакера–Гуэна, в котором на этапе поиска кратчайшего пути используется алгоритм Форда–Беллмана [10; 11].

В связи с тем, что в реальных условиях пропускные способности дуг, стоимости перевозки единицы потока по дуге и поток q , который требуется перевезти по сети, не могут быть точно известны и меняются в зависимости от периода θ , в котором осуществляется перевозка, необходимо рассматривать нечеткие числа $\tilde{u}_{ij}(\theta)$, $\tilde{c}_{ij}(\theta)$, $\tilde{f}_{ij}(\theta)$, \tilde{q} .

Так как параметры дуг являются нечеткими числами, зависящими от периода прохождения потока по дуге, то задача сводится к нахождению минимальной стоимости транспортировки от источника заданного количества потока в нечеткой динамической транспортной сети $\tilde{G}=(V, \tilde{E})$ [15–17]. В рассматриваемом нами графе $\tilde{G}=(V, \tilde{E})$ \tilde{E} —нечеткое множество дуг, где в качестве степени принадлежности $\mu_{\tilde{E}}(x_i, x_j)$ дуги (x_i, x_j) множеству \tilde{E} применяется нечеткая пропускная способность дуги [3], а время прохождения потока по дуге (x_i, x_j) не задается явно, а учитывается при определении ее пропускной способности. Кроме того, задан временной горизонт $T=\{1, \dots, p\}$, определяющий, что все единицы потока, отправленные из источника, должны прибыть в сток не позднее, чем в период p .

Математическая модель задачи имеет вид [16; 17]:

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{(x_i, x_j) \in \tilde{E}} \tilde{c}_{ij}(\theta) \tilde{f}_{ij}(\theta) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{x_j \in \tilde{A}(x_i)} \tilde{f}_{ij}(\theta) - \sum_{x_k \in \tilde{A}^{-1}(x_i)} \tilde{f}_{ki}(\theta) \right) = \tilde{q}, x_i = s, \quad (2)$$

$$\sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{x_j \in \tilde{A}(x_i)} \tilde{f}_{ij}(\theta) - \sum_{x_k \in \tilde{A}^{-1}(x_i)} \tilde{f}_{ki}(\theta) \right) = \tilde{0}, x_i \neq s, t \quad (3)$$

$$\sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{x_j \in \tilde{A}(x_i)} \tilde{f}_{ij}(\theta) - \sum_{x_k \in \tilde{A}^{-1}(x_i)} \tilde{f}_{ki}(\theta) \right) = -\tilde{q}, x_i = t. \quad (4)$$

$$\tilde{0} \leq \tilde{f}_{ij}(\theta) \leq u_{ij}(\theta), \forall (x_i, x_j) \in \tilde{E}, \theta \in T, \quad (5)$$

где \tilde{q} — заданное нечеткое значение потока в транспортной сети, не превышающее максимальный поток; $\tilde{0}$ — нечеткое число формы $(0, 0, 0)$ отражает отсутствие потока; $\tilde{A}(x_i)$ — множество вершин, к которым идут дуги из вершины x_i ; $\tilde{A}^{-1}(x_i)$ — множество вершин, из которых идут дуги в вершину x_i .

Выражение (2) означает, что заданное количество потока \tilde{q} за p периодов времени равно суммарному потоку, выходящему из источника за p периодов времени. Выражение (4) показывает, что поток \tilde{q} за p периодов времени равен суммарному потоку, входящему в сток за p периодов времени. Суммарное количество потока, входящее в источник за p периодов времени, равно суммарному количеству потока, покидающему сток за p периодов времени. В уравнении (3) утверждается, что количество потока, втекающее в любую вершину x_i , кроме источника и стока, за p периодов времени, равно количеству потока, вытекающему из вершины x_i . Ограничение (5) указывает, что потоки для всех периодов времени должны не превышать пропускные способности соответствующих дуг [18].

Объемы транспорта древесины находятся в зависимости от многих факторов. Это грамотная организация производственного процесса, применение современного высокотехнологичного оборудования, состояние и структура грунтов, по которым происходит вывозка древесины из лесосеки, и многое другое. Однако в наибольшей степени объемы транспортировки зависят от природно-климатических условий, сложившихся в данном регионе [19; 20].

Согласно разрабатываемой методике, главным показателем, определяющим деление лесовозных дорог на категории, должна быть величина пропускной способности. Пропускная способность по дорогам общего назначения в настоящее время исследована достаточно подробно, в то же время вопросы, касающиеся пропускной способности автомобильных лесовозных дорог, изучены недостаточно, что создает необходимость проведения углубленных исследований [2; 13]. Пропускная способность — это максимальное количество перевозимого груза, которое может пропустить участок дороги в единицу времени в одном или двух направлениях в рассматриваемых дорожных и погодноклиматических условиях.

Алгоритм определения маршрута минимальной стоимости приведен на рис. 1.

Пропускная способность зависит от большого числа факторов, изменение которых приводит к существенным колебаниям пропускной способности в течение суток, месяца, сезона и года [14; 21]. Наиболее простым способом является использование нормативной пропускной способности, которая задается в официальных нормативных документах. Однако при этом не может быть учтен весь комплекс факторов и условий, характеризующих определенный участок дороги. Поэтому значения пропускной способности для одних конкретных условий являются заниженными, а для других — завышенными.

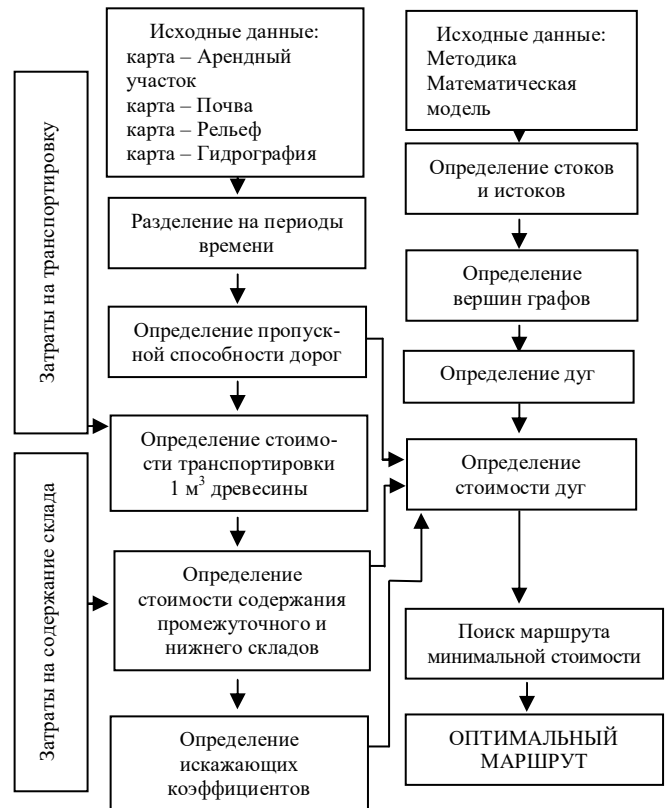


Рис. 1. Алгоритм определения маршрута доставки минимальной стоимости

Для расчета пропускной способности лесовозной дороги предлагается рассматривать дорогу как звено транспортной системы на вывозке леса. Звено транспортной системы представляет собой следующие ступени [13]: движение автопоезда с нижнего склада на погрузку (порожняковое направление); погрузка; движение автопоезда с грузом с места погрузки на нижний склад; разгрузка.

Грузопотоки должны быть сформированы так, чтобы обеспечить непрерывную работу всей транспортной сети, избежать узких мест и довести до минимума перегрузочные работы при перевозке древесины, чтобы достичь максимального значения пропускной способности.

Содержание лесных дорог заключается в систематическом уходе за дорогой с целью поддержания ее в надлежащем состоянии в течение всего периода эксплуатации для обеспечения непрерывного и безопасно-

го движения автотранспорта с установленными скоростями и нагрузками.

Работы по содержанию различаются по направленности:

- 1) весенние — по ликвидации последствий зимы и подготовке к летнему периоду;
- 2) летние — по обеспечению наилучших условий для движения;
- 3) осенние — по подготовке к зимнему периоду [22].

Транспортный фактор формирует значительную долю затрат, связанных с производством лесопродукции. Особенно он характерен для лесозаготовок, где, наряду с затратами на вывозку древесины, формируются затраты на строительство и содержание дорог.

Стоимость транспортных расходов формируется из следующих пунктов:

— стоимость строительства (восстановления) 1 км транспортных путей в зависимости от их типа z (ус, ветка, магистраль, временная, постоянная, водный транспортный путь), C_z^{cm} ;

— стоимость транспортировки 1 м³ древесины в зависимости от вида транспортных путей, C_z^g ;

— количество периодов времени k , в которые не происходят значимые изменения транспортных путей под воздействием природно-климатических или иных условий, а также их продолжительность (по датам) в течение года в зависимости от их типа z ;

— пропускная способность определенного вида транспортного пути, определяемая по формуле (6):

$$U_{ij} = U_z^{sym} \cdot T_{ij}. \quad (6)$$

Пропускная способность определенного вида транспортного пути зависит от количества дней работы участка дороги T_{ij} и суточной пропускной способности U_z^{sym} .

Также необходимо присваивать и учитывать коэффициенты:

— искажающий (уточняющий) пропускную способность транспортного пути k_{uh} ;

— искажающий (уточняющий) базовые затраты на строительство транспортного пути k_{ch}^{cm} ;

— искажающий (уточняющий) содержание в рабочем состоянии транспортного пути k_{ch}^{cod} и транспортировки древесины k_{ch}^g .

Для этого необходимо учитывать тип лесовозных транспортных путей; природно-климатические условия; законодательные условия; виды грунтов, рельеф (уклон) местности (0–5°; 6–10°; 11–15°; >15°).

Стоимость транспортировки древесины можно рассчитать по формуле (7):

$$C_{ij} = \frac{C_z^{cm} \cdot l_{ij} \cdot k_{ch}^{cm}}{U_{ij} \cdot k_{uh}} + C_z^{cod} \cdot l_{ij} \cdot k_{ch}^{cod} + C_z^g \cdot l_{ij} \cdot k_{ch}^g, \quad (7)$$

где $\frac{C_z^{cm} \cdot l_{ij} \cdot k_{ch}^{cm}}{U_{ij} \cdot k_{uh}}$ — стоимость строительства участка транспортного пути, проходящего от i -того к j -тому участку, приходящийся на один кубометр транспортируемого максимального потока в определенный период, руб/м³; $C_z^{cod} \cdot l_{ij} \cdot k_{ch}^{cod}$ — стоимость содержания в рабочем состоянии участка транспортного пути, проходящего от i -того к j -тому участку, приходящаяся на один кубометр

транспортируемого максимального потока в определенный период, руб/м³; $C_z^g \cdot l_{ij} \cdot k_{ch}^g$ — стоимость транспортировки одного кубометра древесины по участку транспортного пути, проходящего от i -того к j -тому участку в определенный период, руб/м³.

В составе себестоимости строительства и содержания дорог выделяют прямые затраты и накладные расходы. В прямые затраты входят: стоимость материалов, израсходованных на производство дорожных работ; основная заработная плата рабочих; расходы на эксплуатацию дорожно-строительных машин (ГСМ и обслуживание). Накладные расходы включают следующие группы затрат: административно-хозяйственные, расходы по обслуживанию рабочих, а также на организацию и производство работ.

Состав себестоимости строительства и содержания дорог можно представить следующим образом (8):

$$C_{дор} = C_m + C_{zn} + C_{zcm} + C_{об} + C_n, \quad (8)$$

где $C_{дор}$ — себестоимость строительства и содержания дорог; C_m — стоимость материалов, израсходованных на производство дорожных работ; C_{zn} — основная заработная плата рабочих; C_{zcm} — расходы на эксплуатацию дорожно-строительных машин (ГСМ); $C_{об}$ — расходы на эксплуатацию дорожно-строительных машин (обслуживание); C_n — прочие расходы.

Структура себестоимости при строительстве дорог претерпевает существенные колебания даже в рамках одной дорожной организации. Высокая материалоемкость работ определяет существенный удельный вес затрат по статье «материалы, полуфабрикаты, конструкции, детали» (50 % в общей сумме прямых затрат). Более высокий удельный вес (до 20%) в составе прямых затрат, чем среднем по строительству, имеют расходы на эксплуатацию машин, что объясняется высоким уровнем механизации дорожных работ. Из них расходы на ГСМ составляют 35%. Заработная плата рабочих составляет в среднем 24% от величины прямых затрат.

Апробация разработанной методики. В ходе апробации разработанной методики в качестве объекта исследования выступает лесозаготовительно-деревоперерабатывающее предприятие ЗАО «Новоенисейский ЛХК» (Лесосибирск). На сегодняшний день предприятие вынуждено нести большие затраты на транспортировку заготовленного леса, это составляет до 70 % от себестоимости древесины.

Предприятие ЗАО «Новоенисейский ЛХК» занимается всем циклом лесозаготовительных работ: отводом лесосечного фонда, заготовкой и раскряжковкой хлыстов на верхнем складе в зимний период, подготовкой подъездных путей, погрузкой материала для дальнейшей транспортировки. Карта дорог по Богучанской группе ЛЗУ (Гремучинский и Хребтовский) представлена на рис. 2.

Вывозка пиловочника осуществляется по двум направлениям: на лесном участке по договору аренды № 92-з по магистральной дороге протяженностью 140 км, в том числе 101 км круглогодого действия; на лесном участке по договору аренды № 169-з —

160 км, в том числе 125 км круглогодого действия. Большая часть лесовозных веток, примыкающих к магистральям, зимнего действия. Планирование, прорубка и строительство новых веток производится ежегодно, в соответствии с планом освоения лесосырьевой базы.



Рис. 2. Карта дорог по Богучанской группе ЛЗУ (Гремучинский и Хребтовский)

Транспорт леса включает в себя: в зимний и весенний периоды —вывозку и разгрузку, а также хранение сортиментов на промежуточном складе, который находится на 93-м км лесовозной дороги. В летний период сортименты транспортируются на нижний склад. Он расположен на берегу р.Ангара, около населенного пункта Гремучий. На складе производят разгрузку, хранение и подготовку сортиментов к лесосплавным работам. Затем организуют транспортировку леса по реке до предприятия (длина водного пути составляет 587 км).

Анализируя существующий порядок вывозки древесины, можно сделать вывод, что ЗАО «Новоенисейский ЛХК» вынуждено нести большие затраты на транспортировку. Для минимизации существующих расходов представлена методика оптимизации маршрутов транспортировки древесины с лесных участков на лесозаготовительное и деревоперерабатывающее предприятие ЗАО «Новоенисейский ЛХК».

Решение задачи поиска оптимального маршрута.

Задача состоит в необходимости поиска маршрутов с минимальной стоимостью доставки определенного количества древесины с разных лесных участков в транспортной сети за заданное количество периодов времени.

Ввиду различных природных условий различные лесовозные дороги эксплуатируются по-разному или не эксплуатируются вообще (простаивают). Для того, чтобы избежать дополнительных расходов на содержание малоэксплуатируемых или неэксплуатируемых лесовозных дорог в разные периоды времени, рассмотрим возможность осуществления маршрутов транспортировки древесины через территорию Хребтовского ЛЗУ.

Исходные данные для поиска маршрутов по доставке древесины с лесных участков до потребителя минимальной стоимости ЗАО «Новоенисейский ЛХК» включают в себя карты по Гремучинскому ЛЗУ: с арендными участками и сетью дорог (рис. 3), рельефа; гидрографии, почвы.

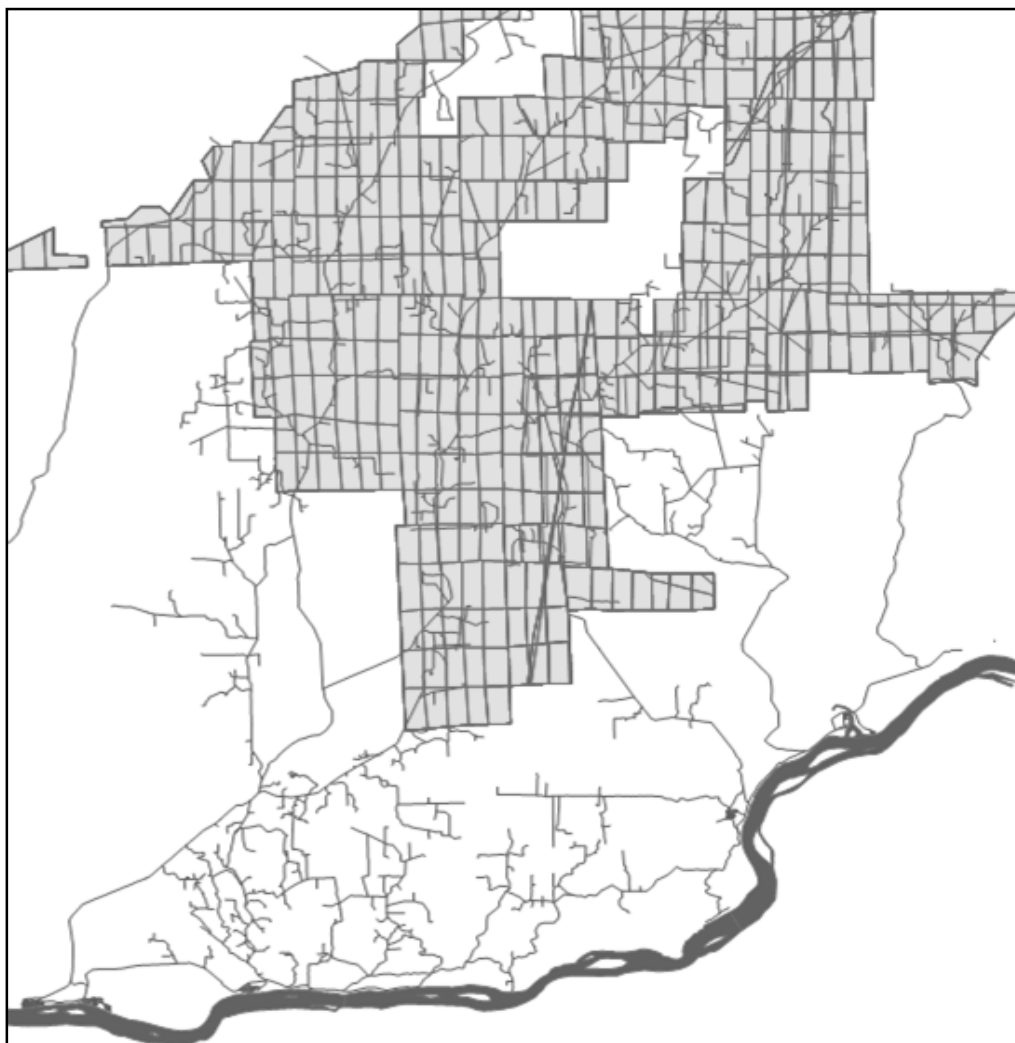


Рис. 3. Карта с арендными участками и сетью дорог по Гремучинскому ЛЗУ

Для разных периодов времени на основании разработанной методики проводятся расчеты стоимости отдельных составляющих транспортировки древесины:

- 1) 1 м^3 древесины по дороге круглогодичного действия ($\text{р./м}^3 \cdot \text{км}$);
- 2) 1 м^3 древесины по дорогам временного действия ($\text{р./м}^3 \cdot \text{км}$);
- 3) 1 м^3 древесины сплавом по реке ($\text{р./м}^3 \cdot \text{км}$);
- 4) стоимость содержания 1 км дороги круглогодичного действия;
- 5) стоимость содержания 1 км дороги временного действия;
- 6) стоимость содержания нижнего склада с учетом сплотки (р./м^3);
- 7) стоимость содержания промежуточного склада (р./м^3).

Расчеты стоимости в различные периоды года сведены в таблице 1.

При оптимизации маршрутов доставки древесины капитальные вложения будут состоять из покупки программного обеспечения (ГИАС), стоимость которой составляет 1,5 млн. р., и организации нового склада —

20 млн. р. Общая сумма капитальных вложений составит 21,5 млн. р.

Годовой экономический эффект от оптимизации маршрутов можно найти как разницу между стоимостями транспортировки древесины:

$$\text{ГЭЭ} = C_{\text{п}} - C_{\text{б}}, \quad (9)$$

где $C_{\text{п}}$ —стоимость транспортировки древесины по проектному варианту, р. ; $C_{\text{б}}$ —стоимость транспортировки древесины по базовому варианту.

Подставляя значения в (9), получим:

$$\text{ГЭЭ} = 15\,024\,680 \text{ р.}$$

Далее рассчитаем стоимость дороги круглогодичного и временного назначения в зависимости от рельефа и вида почв в разные периоды года по формулам (7),(8).

По представленным исходным данным выстраивается сетевая модель для поиска маршрута, представленная на рис.4. Пронумерованными окружностями на рисунке показаны вершины, лесосеки или отправочные пункты, пункты доставки. Участки дорог показаны линиями, соединяющими точки вершин.

Таблица 1

Расчеты стоимости отдельных составляющих транспортировки древесины для разных периодов времени

Стоимость	1-й период	2-й период	3-й период	4-й период	5-й период
	Зимний (с 10.11 по 20.03)	Зимне- весенний (с 20.03 по 20.04)	Весенний (с 20.04 по 30.06)	Летний (с 1.07 по 31.08)	Осенний (с 1.09 по 10.11)
Транспортировка 1 м ³ древесины по дороге круглогодичного действия (р./м ³ /км)	4	4,8	5,2	5,2	6
Транспортировка 1 м ³ древесины по дорогам временного действия (р./м ³ /км)	7,2	8,64	10,8	8,64	10,44
Транспортировка 1 м ³ древесины сплавом по реке (р./м ³ /км)	–	–	0,50	0,50	0,50
Содержание 1 км дороги круглогодичного действия	30000	30500	29000	27000	27500
Содержание 1 км дороги временного действия	54000	54900	52200	48600	49500
Содержание нижнего склада с учетом сплотки (р./м ³)	723	625	239	598	503
Содержание промежуточного склада (р./м ³)	46,11	43,5	34,5	32	–

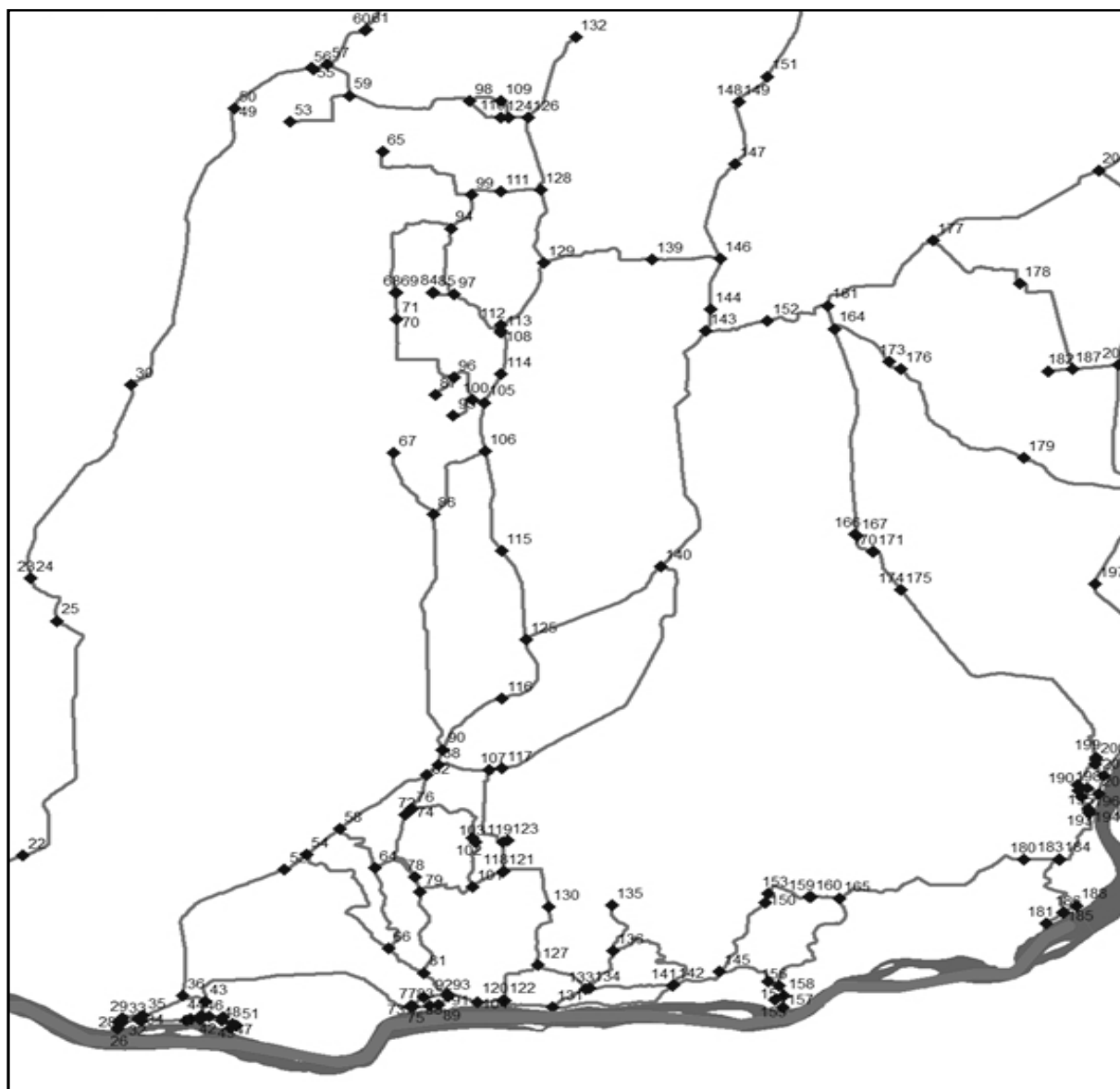


Рис. 4. Карта с сетью маршрутов и вершин по Гремучинскому ЛЗУ

В результате определения маршрутов минимальной стоимости транспортировки древесины с лесосек до потребителя получен оптимальный маршрут.

Маршрутом минимальной стоимости является следующий маршрут (по периодам): в первый период предлагается осуществлять вывозку 100 тыс.м³ по маршруту 190-159-137-132-127-129-139-146-143-152-161-164-166-170-175-200 сразу до нижнего склада (расположенного около пос.Хребтовый), расстояние составит 160 км, стоимость пути — 108 млн. р. Также в первый период предлагается вывозить 70 тыс.м³ по маршруту 198-172-151-148-147-146-144-143-152-161 и 50 тыс.м³ — по маршруту 173-172-151-148-147-146-144-143-152-161 до промежуточного склада, расстояние вывозки — 60 и 78 км соответственно, стоимость пути — 33,6 и 31,2 млн. р. В третий период предлагается вывезти сортименты из промежуточного склада, стоимость пути будет составлять 79,2 млн. р., и далее осуществить транспортировку 220 тыс. м³ древесины по реке от Хребтовского нижнего склада до предприятия, расстояние по реке — 594 км, стоимость транспортировки — 65,34 млн. р. В итоге стоимость всего маршрута составит 317,34 млн. р.

Выводы

Анализируя полученный маршрут, можно сделать следующие выводы:

- при организации нижнего склада в поселке Хребтовом общая стоимость транспортировки снижается;
- в течение 2-го периода года не рекомендуется производить транспортировку, поскольку он характеризуется повышенной стоимостью транспортировки и минимальными пропускными способностями дорог;
- изменилось местонахождение промежуточного склада: с вершины 172 в вершину 161, поскольку путь между данными вершинами имеет временный характер, и древесина между ними доставляется только в 1-й период времени;
- из вершины 200 (нижний склад) до предприятия вся древесина доставляется в 3-й период, так как данный маршрут предполагает сплав по реке, а в другие периоды его пропускная способность равна нулю;
- полученный маршрут логичен, а значит, разработанная методика по поиску маршрута минимальной стоимости работоспособна.

Можно сделать вывод, что выбранный вариант оптимизации маршрутов доставки древесины на ЗАО «Новоенисейский ЛХК» является наиболее эффективным и выгодным по технологическим и экономическим показателям. Предприятие имеет все предпосылки для реализации предложенной темы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-310-00311

Литература

1. Мохирев А. П., Болотов О.В. Проектирование сети лесных дорог на примере предприятий Красноярского края: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2010. 178 с.
2. Кондрашова Е.В., Волков А.М. Повышение эффективности транспортной работы автомобильных дорог в лесном комплексе. Воронеж: Изд-воВоронеж. гос. ун-та, 2010. 232 с.

3. Cormen H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. Introduction to Algorithms. Third edition: MIT Press, 2001. 1312 p.

4. Pallottino S., Scutellà M.G. Shortest Path Algorithms in Transportation Models: Classical and Innovative Aspects // Equilibrium and Advanced Transportation Modelling. Kluwer, 1998. P. 245-281.

5. Ahuja R.K., Magnanti T.L., Orlin J. B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1993. 846 p.

6. Floyd, R.W. Algorithm 97 – Shortest path. Comm. Of ACM. 1962. 5. 345 p.

7. Nasrabadi E., Hashemi S.M. Minimum cost time-varying network flow problems // Optim Meth Software. 2010. Vol. 25 (3). P. 429-447.

8. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Rozenberg I. The methods of maximum Flow and minimum cost flow finding in fuzzy network // Proceedings of the Concept Discovery in Unstructured Data Workshop (CDUD 2012) co-located with the 10th International Conference on Formal Concept Analysis (ICFCA 2012) May 2012, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium. 2012. P. 1-12.

9. Kovács P. Minimum-cost flow algorithms: An experimental evaluation // EGRES Technical Report. 2013. № 4. DOI: 10.1080/10556788.2014.895828.

10. Боженок А.В., Герасименко Е.М. Разработка алгоритма нахождения максимального потока минимальной стоимости в нечеткой динамической транспортной сети // Инженерный вестник Дона. 2013. Т. 24, № 1 (24). 104 с.

11. Герасименко Е. М. Нахождение потоков в транспортных сетях в условиях нечеткости и частичной неопределенности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Таганрог, 2014. 20 с.

12. Rukomoinikov K.P. Structuring of loading points and main skid road in conditions of existing road network in forest compartment // Journal of Applied Engineering Science. 2015. T. 13, № 3. С. 167-174.

13. Платонова Е.В. Обоснование пропускной способности лесовозных дорог при различных скоростных режимах и моделях транспортного потока: дис. ... канд. техн. Архангельск, 2006. 151 с.

14. Рукомойников К.П. Графоаналитическое моделирование технологии поквартального освоения лесосек в нечетких динамических природно-производственных условиях // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 220.

15. Мохирев А.П., Позднякова М.О., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Факторы доступности древесных ресурсов: анализ влияния на ключевые критерии // Системы Методы Технологии. 2018. № 1 (37). С. 110-115.

16. Рукомойников К.П. Графоалгоритмический подход к обоснованию рациональной технологии поквартального освоения участков лесного фонда // Вестн. Моск. гос. ун-та леса. Лесной вестник. 2014. № 2. С. 96-103.

17. Мохирев А.П., Герасимова М.М., Комаров К.А., Фомина В.Ю. Нахождение маршрутов доставки древесины с минимальными транспортными затратами с учетом сезонности грузоперевозок // Forest Engineering: материалы науч.-практической конф. с междунар. участием. Якутск, 2018. С. 162-165.

18. Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mammadov V.O. Assessment of availability of wood resources using geographic information and analytical systems (the Krasnoyarsk territory as a case study) // Journal of Applied Engineering Science. 2018. № 3 (16). P. 313-319. DOI: 10.5937/jaes16-16908.

19. Васильев А.П. Проектирование дорог с учетом влияния климата на условия движения. М.: Транспорт, 1986. 248 с.

20. Мохирев А.П., Мохирев П.Ф. Исследование специфики лесозаготовок в Красноярском крае // Resources and Technology. 2015. Т. 12, № 2. С. 98-108. DOI: 10.15393/j2.art.2015.3061.

21. Rozenberg I., Gittis C., Svyatov D. Geoinformation system Object Land // Proceedings of IPI RAN Systems and Means of Informatics. Science, Moscow, 2000.

22. Мохирев А.П., Егармин П.А. Географическая информационная система планирования оптимального освоения лесного фонда // Системы Методы Технологии. 2011. № 4 (12). С. 172-177.

References

1. Mohirev A. P., Bolotov O.V. Design of forest roads network on the example of Krasnoyarsk region enterprises: monogr. Krasnoyarsk: SibGTU, 2010. 178 p.

2. Kondrashova E.V., Volkov A.M. Improving the efficiency of transport roads in the forest complex. Voronezh: Izd-vo Voronezh. gos. un-ta, 2010. 232 p.

3. Cormen H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. Introduction to Algorithms. Third edition: MIT Press, 2001. 1312 p.

4. Pallottino S., Scutellà M.G. Shortest Path Algorithms in Transportation Models: Classical and Innovative Aspects // Equilibrium and Advanced Transportation Modelling. Kluwer, 1998. P. 245-281.

5. Ahuja R.K., Magnanti T.L., Orlin J. B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1993. 846 p.

6. Floyd, R.W. Algorithm 97- Shortest path. Comm. Of ACM. 1962. 5. 345 p.

7. Nasrabadi E., Hashemi S.M. Minimum cost time-varying network flow problems // Optim Meth Software. 2010. Vol. 25 (3). P. 429-447.

8. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Rozenberg I. The methods of maximum Flow and minimum cost flow finding in fuzzy network // Proceedings of the Concept Discovery in Unstructured Data Workshop (CDUD 2012) co-located with the 10th International Conference on Formal Concept Analysis (ICFCA 2012) May 2012, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium. 2012. P. 1-12.

9. Kovács P. Minimum-cost flow algorithms: An experimental evaluation // EGRES Technical Report. 2013. № 4. DOI: 10.1080/10556788.2014.895828.

10. Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M. Development of algo-rhythm for finding maximum flow of minimum cost in fuzzy dynamic transportation network // Engineering journal of Don. E-journal. 2013. T. 24, № 1 (24). 104 p.

11. Gerasimenko E.M. Finding flow in transportation networks in conditions of uncertainty and partial uncertainty: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Taganrog, 2014. 20 p.

12. Rukomoinikov K.P. Structuring of loading points and main skid road in conditions of existing road network in forest compartment // Journal of Applied Engineering Science. 2015. T. 13, № 3. P. 167-174.

13. Platonova E.V. Substantiation of capacity of logging roads at different speed regimes and models of traffic flow: dis. ... kand. tekhn. Arhangel'sk, 2006. 151 p.

14. Rukomoinikov K.P. Graphic modeling technology quarterly development of clear-cuts in fuzzy dynamic natural production conditions // Modern problems of science and education. 2014. № 6. 220 p.

15. Mohirev A.P., Pozdnyakova M.O., Kunickaya O.A., Grigor'ev I.V. Factors influencing the accessibility of wood resources: impact analysis of key criteria in //Systems Methods Technologies. 2018. № 1 (37). P. 110-115.

16. Rukomoinikov K.P. Graphoalgorithmic approach to justification of rational technologies quarterly development of sites of forest fund // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2014. № 2. P. 96-103.

17. Mohirev A.P., Gerasimova M.M., Komarov K.A., Fomina V.YU. Finding routes for the delivery of wood with a minimum transport cost with the seasonality of transportation // Forest Engineering: materialy nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem. Yakutsk, 2018. P. 162-165.

18. Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mammadov V.O. Assessment of availability of wood resources using geographic information and analytical systems (the Krasnoyarsk territory as a case study) // Journal of Applied Engineering Science. 2018. № 3 (16). P. 313-319. DOI: 10.5937/jaes16-16908.

19. Vasil'ev A.P. Road Design taking into account the influence of climate on traffic conditions. M.: Transport, 1986. 248 p.

20. Mohirev A.P., Mohirev P.F. Study of special graphs are logging in Krasnoyarsk region // Resources and Technology. 2015. T. 12, № 2. P. 98-108. DOI: 10.15393/j2.art.2015.3061

21. Rozenberg I., Gittis C., Svyatov D. Geoinformation system Object Land // Proceedings of IPI RAN Systems and Means of Informatics. Science, Moscow, 2000.

22. Mohirev A.P., Egarmin P.A. Geographic information system planning for the optimum development of the forest Fund //Systems Methods Technologies. 2011. № 4 (12). P. 172-177.