

DOI: 10.15393/j2.art.20232.7183

УДК 625.711.84

Статья

Оптимальное проектирование сети лесных дорог: от методов к решениям

Катаров Василий Кузьмич

*кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет
(Российская Федерация), vkatarov@petrstu.ru*

Рожин Данила Владимирович

кандидат технических наук, Упрдор «Кола» (Российская Федерация), hor@sampo.ru

Сюнёв Владимир Сергеевич

*доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет
(Российская Федерация), siounev@petrstu.ru*

Получена: 22 июня 2023 / Принята: 5 сентября 2023 / Опубликовано: 13 сентября 2023

Аннотация: В статье приведены методы оптимального проектирования сетей лесных дорог, позволяющие провести автоматизацию процессов планирования дорожно-транспортной инфраструктуры лесозаготовительных предприятий с учётом особенностей строительства лесных дорог в современных условиях. Описана методика и приведены результаты нахождения оптимальной плотности лесных дорог для природно-производственных условий Северо-Западного федерального округа. В исследовании предложены модели принятия решений о выборе конструкций земляного полотна и дорожных одежд лесных дорог, модель оценки альтернативных участков лесных дорог, модель выбора ключевых точек лесосырьевой базы и итоговая оптимизационная модель принятия решений о размещении сети лесовозных дорог. Разработанная компьютерная система позволяет в удобном для пользователя виде послойно выводить информацию о необходимых объёмах дорожного строительства и получать широкий перечень показателей, характеризующих как отдельные участки, так и все дороги в целом. Применение данной системы показало достаточно высокую степень соответствия реальным условиям и возможность адаптации под задачи пользователя. Предлагаемые решения позволяют добиться значимого положительного экономического эффекта при горизонте планирования от 5—10 лет и больше.

Ключевые слова: лесная дорога; оптимальное проектирование; геоинформационные системы

DOI: 10.15393/j2.art.20232.7183

Article

Optimal planning of a forest road network: from methods to solutions

Vasily Katarov

Ph. D. in engineering, associate professor, Petrosavodsk State University (Russian Federation)

vkatarov@petrsu.ru

Danila Rozhin

Ph. D. in engineering, associate professor, «KOLA» Highway Administration (Russian Federation)

hop@sampo.ru

Vladimir Siounev

D. Sc. in engineering, professor, Petrosavodsk State University (Russian Federation)

siounev@petrsu.ru

Received: 22 June 2023 / Accepted: 5 September 2023 / Published: 13 September 2023

Abstract: The article presents the methods of optimal planning of forest road networks, which allow automating the planning processes of road transport infrastructure development for logging enterprises by taking into account the characteristics of forest road construction under present day conditions. The methodology is described and the optimal density of forest roads has been found for the natural and industrial conditions of the North-Western Federal District. The authors propose decision-making models for choosing the forest roadbed and road topping designs. They also propose a model for evaluating alternative sections of forest roads, a model for selecting key points of the forest resource base and a final optimization model for making decisions on logging roads network design. The developed computer system allows the user to display information in a user-friendly and layer-by-layer form on the required road construction volumes and to obtain a wide list of indicators characterizing both individual sections and all roads as a whole. This system application demonstrated a reasonably good compliance with actual conditions and the ability to adapt to the user's tasks. The proposed solutions make it possible to achieve a significant economic effect for a planning horizon of 5—10 years or more.

Keywords: forest roads; optimal planning; geoinformation systems

1. Введение

В стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. [1] подчёркивается, что проблемы сохранения и использования лесов становятся всё более многообразными и сложными, изменяются стандарты управления лесами, которые должны отвечать возросшим технико-технологическим, социальным, экологическим и экономическим требованиям. В современных условиях особое значение для интенсификации использования и воспроизводства лесов приобретает лесная инфраструктура, прежде всего плотность сети лесных дорог. Для обеспечения повышенного прогнозируемого спроса на древесину в сфере заготовки целесообразным является внедрение современных технологий при проектировании, строительстве и последующем содержании и ремонте лесных дорог.

Трансформирующееся лесное законодательство [2] в настоящий момент определяет, что для обеспечения использования лесного участка на весь срок аренды (до 49 лет) должна быть разработана транспортная схема освоения лесного участка, включающая дороги постоянного круглогодочного действия и дороги сезонного действия (зимние, летние). Это становится предпосылкой для создания развитой надёжной транспортной сети. Вместе с тем важнейшим остаётся вопрос ресурсного обеспечения принимаемых транспортно-технологических решений. В настоящий момент на лесозаготовительных предприятиях всё шире применяются компьютерные технологии с элементами искусственного интеллекта по проектированию и строительству лесных дорог. В этой связи актуальными представляются системы и методы проектирования сети лесных дорог, привязанные к рациональным технологиям строительства, учитывающие особенности районов проектирования [3—6]. При этом данные решения на стадии реализации должны иметь возможность корректировки в привязке к условиям предприятия [7], [8]. Оптимальным вариантом является возможность максимального использования местных дорожно-строительных материалов при строительстве, содержании и ремонте элементов дорожно-транспортной инфраструктуры и применение современных геосинтетических материалов [9—11].

Ввиду многокомпонентности задачи планирования лесотранспортного освоения лесосырьевых баз в качестве перспективного направления автоматизации управления в лесозаготовительной промышленности выступают системы, в которых в качестве одного из основных компонентов используются геоинформационные системы (ГИС), которые объединяют все возможности цифрового картографирования с системами обработки цифровой и текстовой информации, что позволяет совместить в одной системе графическую (картографическую) информацию об объекте с другими данными о нём [3], [5], [7], [12]. ГИС должны учитывать характеристики и работы по модернизации существующей сети дорог и возможность дополнения её новыми участками. Ряд исследователей также указывают на необходимость учёта многоцелевого использования лесных участков и воздействие дорожной сети на окружающую лесную среду [5], [13], [14].

2. Материалы и методы

Рентабельность планирования лесной дорожной инфраструктуры оценивают с помощью расчёта оптимальной плотности сети лесных дорог, достигаемой путём минимизации перспективных затрат на строительство и эксплуатацию дороги, а также расходов на вывозку лесоматериалов путём сокращения расстояний перевозки [9].

В лесной практике за единицу измерения плотности лесных дорог принимают протяжённость дорог в километрах или метрах на 1000, или 1 га лесной площади. Плотность лесных дорог постоянного действия на лесном участке зависит от расстояния между ветками и их направления относительно грузосборочной дороги (под прямым углом или под углом 45°). Обобщённые данные по рекомендуемой плотности лесных дорог [2] приведены в таблице.

Таблица. Рекомендуемая плотность лесных дорог

Table. Recommended density of forest roads

Расстояние трелёвки, м	Расстояние между лесовозными ветками, км			
	4	5	6	7
Направление примыкания под углом 45°				
300	23,1 (18,9 + 4,2)	23,4 (20,0 + 3,4)	22,9 (20,1 + 2,8)	23,2 (20,8 + 2,4)
500	19,2 (15,0 + 4,2)	19,0 (15,6 + 3,4)	18,3 (15,5 + 2,8)	17,8 (15,4 + 2,4)
Направление примыкания под углом 90°				
300	23,4 (20,4 + 3,0)	23,5 (21,1 + 2,4)	23,6 (21,6 + 2,0)	23,6 (21,9 + 1,7)
500	21,0 (18,0 + 3,0)	21,6 (19,2 + 2,4)	22,0 (20,0 + 2,0)	22,3 (20,6 + 1,7)

Примечание. В скобках первое число обозначает протяжённость временных лесных дорог, второе число — лесных дорог постоянного действия.

Для расчёта оптимальной плотности лесных дорог у нас, и за рубежом разработано достаточно большое количество методик, нашедших отражение в ряде работ [5], [6], [15]. Вместе с тем для использования на лесозаготовительных предприятиях Северо-Западного федерального округа считаем целесообразным применение методики, апробированной в схожих природно-производственных условиях [9], [15].

По данной методике оптимальная плотность сети лесных дорог достигается путём минимизации затрат на строительство и эксплуатацию дорог, а также расходов на перевозку (трелёвку) лесоматериалов за счёт сокращения расстояний перевозки. Оптимизацию

плотности сети дорог сводят к задаче сравнения затрат на перевозку лесоматериалов с затратами на строительство, для чего используют следующие формулы:

$$L = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{C \cdot M \cdot T}{Q \cdot A}}, \quad (1)$$

$$V = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot A \cdot M \cdot T}{C}}, \quad (2)$$

где L — оптимальное расстояние трелёвки; V — оптимальная плотность лесных дорог; A — удельные затраты на трелёвку форвардером; C — удельные затраты на строительство дороги; Q — объём древесины, получаемый из зоны действия дороги за расчётный период; M — поправка на трелёвку по условиям местности; T — коэффициент сети дорог.

Поправка на трелёвку M корректирует разницу между прямолинейным и реальным расстоянием трелёвки, вызванную криволинейностью движения форвардера на местности (необходимость огибать препятствия, расположение лесопогрузочной площадки). Поправка варьируется в интервале от 1,2 до 1,6 в различных условиях. Рекомендуется использовать значение 1,4, которое характеризует средние условия трелёвки на Северо-Западе РФ. Коэффициент сети дорог T характеризует степень перекрытия зон влияния дорог. Например, использование значения коэффициента, равного 1,2, означает, что 83 % (1/1,2 ~ 83) лесосеки внутри сети дорог находится в зоне досягаемости только одной дороги, а остальная часть (17 %) — в зоне досягаемости нескольких дорог. Соответственно, при значении коэффициента 2,0 эффективность использования дорог ухудшается настолько, что уже половина лесосеки одновременно находится в зоне влияния нескольких дорог. В расчётах коэффициент сети дорог T варьируется от 1,2 до 2,0 так, что для условий разряженной дорожной сети с лёгкими условиями местности используются небольшие значения коэффициентов, и наоборот.

Взаимосвязь между оптимальным расстоянием перевозки (трелёвки) и оптимальной плотностью лесных дорог применительно к условиям Республики Карелия представлена на рисунке 1. Для достижения приведённых параметров оптимальной плотности лесных дорог при их проектировании можно воспользоваться рядом методов, в частности, методами Монте-Карло, динамического программирования, Штейнера, принципами оптимальности Беллмана. Исследования [16] показали, что для определения рационального начертания сети с помощью компьютера может быть использован метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), позволяющий организовать целенаправленный пересмотр вариантов дорожной сети и тем самым выявить наиболее выгодный вариант сети без перебора всех возможных решений. Из всех возможных вариантов развития сети следует выбирать вариант, имеющий наиболее рациональное соотношение капитальных и транспортно-эксплуатационных затрат при высоких качественных показателях.

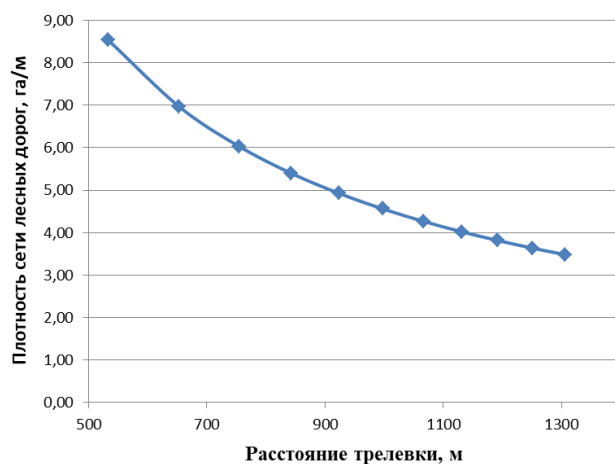


Рисунок 1. Зависимость оптимальной плотности лесных дорог от оптимального расстояния трелёвки

Figure 1. Dependence of the optimal density of forest roads on the optimal distance of skidding

Задача определения рационального начертания дорожной сети формулируется при этом следующим образом. Для выполнения объёма перевозок требуется построить (или реконструировать) сеть дорог определённых категорий, обеспечивающую минимальное значение критерия оптимизации при соблюдении всех строительных норм и правил. За критерий оптимизации дорожной сети обычно принимают сумму приведённых затрат. Для сетей лесных дорог сумма приведённых затрат может быть определена по формуле

$$K = \sum_{t=1}^{T_C} \frac{C_t}{(1 + E_{НП})^t} + \sum_{t=1}^{T_Э} \frac{\mathcal{E}_t + M_t}{(1 + E_{НП})^t}, \quad (3)$$

где C_t — годовые капиталовложения в строительство и реконструкцию дорог; \mathcal{E}_t — годовые дорожно-эксплуатационные расходы (расходы на ремонт и содержание дорог); M_t — годовые транспортно-эксплуатационные расходы; T_C — срок завершения работ по приведению сети дорог в соответствии с требованиями; $T_Э$ — срок службы дороги до наступления износа по постоянным элементам; $E_{НП}$ — норматив для приведения разновременных затрат.

В математической формулировке задача выбора оптимального варианта начертания дорожной сети может быть представлена следующим образом: найти такой вектор-решение сети $X_{ОПТ}$, который отвечал бы всем строительным нормам и правилам и максимально минимизировал критерий оптимизации K , т. е.

$$\begin{aligned} K(X_{ОПТ}) &= \min K(X), \\ X_{ОПТ} &\in X, \end{aligned} \quad (4)$$

где X — множество векторов-решений дорожной сети.

Следует отметить, что оптимальное решение сети может быть найдено лишь при условии, что имеющаяся исходная информация (объёмы перевозок между корреспондирующими пунктами, состояние существующих дорог, показатели строительной стоимости, транспортно-эксплуатационные показатели и т. д.) достоверна и достаточна для отыскания оптимума.

Выявление оптимального решения сети методом Монте-Карло заключается в следующем. Вначале разрабатываются статистические (случайные) варианты дорожной сети. Количество таких вариантов определяется по формуле

$$N_c = \frac{\lg(1-P)}{\lg(1-\Delta)}, \quad (5)$$

где P — вероятность нахождения оптимального варианта сети; Δ — точность поиска наиболее выгодного решения.

Для каждого статистического варианта сети дорог определяется критерий оптимизации — сумма приведённых затрат. Тот вариант, который имеет самое минимальное значение суммы приведённых затрат, и будет оптимальным.

Основные исследования на сеточных моделях могут быть проведены с использованием методов динамического программирования и принципа оптимальности Беллмана, суть которого состоит в том, что оптимальная стратегия (поведение) обладает тем свойством, что каковы бы ни были начальные состояния и начальное решение, последующие решения должны составлять оптимальную стратегию (поведение) относительно первоначального состояния. Одним из наиболее эффективных численных алгоритмов, позволяющих реализовать данный принцип, являются алгоритм Ли и его модификации [17], [18].

$$\int_{X_0}^{X_N} 3(X, Y) \sqrt{1+Y'^2} * dX \Rightarrow \min \quad (6)$$

где $3(X, Y)$ — обобщённо характеризует район располагаемого строительства линейного сооружения с точки зрения удельных приведённых затрат на трассирование. Значения удельных затрат представляют собой расчётные затраты (на строительство и эксплуатацию) конечного элемента линейного сооружения единичной длины и отнесены к некоторой точке (X, Y) плана местности.

Алгоритм прогноза и коррекции состоит из двух основных процедур. Первоначально на крупной сетке, учитывающей основные неоднородности рельефа с точки зрения затрат на прокладку трассы, находят перспективные трассы линейного сооружения. На втором этапе перспективные трассы корректируются, причём коррекция выполняется на мелкой сетке, учитывающей все особенности рельефа.

Процедура прогноза реализуется на основе алгоритма Ли и состоит в следующем. На каждом шаге алгоритма реализуются все ветки, построенные от начальной точки трассы, и определяется путь с наименьшей стоимостью. Этот путь на данном шаге является наиболее

перспективным. Надстраивая его на одну дугу во всех допустимых сеткой направлениях, получаем несколько дополнительных путей. Затем среди всех путей, построенных к очередному шагу алгоритма, ищем новый, наиболее перспективный, и надстраиваем его на одну новую дугу во всех допустимых сеткой направлениях. Этот процесс продолжается до тех пор, пока среди сформированных последовательной надстройкой путей не окажется путь, оканчивающийся последней точкой трассы и имеющий минимальную стоимость по сравнению со стоимостями всех сформированных к этому моменту путей.

Опыт реализации крупных международных проектов в Петрозаводском государственном университете, работы с лесозаготовительными холдингами, внедрения продуктов по автоматизации производств показал достаточно эффективный результат при применении в разработке систем оптимального планирования сети лесных дорог методом Штейнера.

Метод Штейнера предполагает соединение заданных на плоскости точек оптимальным образом. На плоскости, по своим свойствам являющейся неоднородным пространством, заданы фиксированные координаты точек, в которых сосредоточены запасы груза с заданными объёмами. Запасы требуется вывезти в фиксированную точку. Для этого должна быть построена сеть дорог в виде дерева, состоящего из прямолинейных отрезков, соединяющих фиксированные и дополнительные точки таким образом, чтобы достигало минимума значение целевой точки. Дополнительные точки — это свободно размещаемые развилки в любом необходимом количестве.

Кратчайшей связывающей сетью для фиксированных точек на плоскости называется дерево с вершинами в этих точках, имеющее минимальное значение суммы длин дуг среди всех связывающих сетей. Точками Штейнера называются развилки, которые добавляются к дереву для уменьшения значения. Топология дерева однозначно описывает связность вершин. Топологию, учитывающую направленность, назовём ориентированной.

Относительно минимальным деревом называется дерево, на котором сумма длин дуг принимает наименьшее значение среди деревьев той же топологии. Такая локальная минимизация достигается оптимальным положением точек Штейнера.

Деревом Штейнера называется дерево, значение функционала которого нельзя уменьшить путём введения дополнительной точки Штейнера (операцией расщепления вершины). Дерево Штейнера является относительно минимальным для своей топологии. Минимальным деревом Штейнера будет дерево, связывающее точки с использованием любого количества точек Штейнера и имеющее минимальное значение функционала среди всех деревьев Штейнера для данного набора. Задача сводится к поиску минимального дерева Штейнера. Её решение имеет три уровня [18].

Первый уровень — нахождение оптимально минимального дерева для заданной топологии. При этом количество точек Штейнера и связность всех вершин заданы. Фактически это задача многопараметрической оптимизации непрерывной целевой функции.

Второй уровень — построение деревьев Штейнера. Это реализация процедуры Штейнера (расщепления вершин) с последующим решением задачи первого уровня: оптимизации положения полученных точек Штейнера.

Третий уровень — поиски минимального дерева Штейнера. На этом уровне ищется приближенное решение задачи в том смысле, что количество возможных вариантов построения дерева (число топологий) стремительно растёт с увеличением количества точек и очень быстро становится необозримо большим, и, таким образом, фактически невозможно просмотреть все топологии. Поскольку, помимо полного перебора, другого точного решения задачи Штейнера пока не имеется, речь идёт о выборе варианта, лучшего из рассмотренных. На этом уровне решающим фактором становится машинное время решения. Соответственно содержательной интерпретацией задачи может служить следующая: в заданный промежуток машинного времени построить максимально возможное число деревьев Штейнера и выбрать одно или несколько лучших по критерию минимальности целевой функции.

Так, согласно исследованию [19], в качестве входных данных авторы рекомендуют использовать матричный подход: составляются матрица затрат на прокладку дороги до каждого лесоучастка, т. е. матрица весов рёбер графа; матрица затрат на восстановительные работы; массив, задающий годы, в которые понадобится путь к каждой вершине графа; массив, определяющий величину товарной продукции, которая может быть получена при разработке каждого лесоучастка.

Важнейшим элементом при проектировании сети лесных дорог являются предлагаемые нами оптимизационная модель принятия решений о выборе конструкций земляного полотна и дорожных одежд лесных дорог и модель оценки альтернативных участков лесных дорог. Оптимизационная модель принятия решений о выборе конструкций земляного полотна и дорожных одежд лесных дорог в общем виде выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} C_D = f(c, B, h_{Пср}, h_{Осс}, E_{ГР}, C_{\Sigma}, l_0, l_{П}, l_{ЗП}, C_{41}, C_{42}, C_{ГМ}) \rightarrow \min \\ E_{\Phi}(h_{Пср}, h_{Осс}, E_{ГР}, E_0, E_{П}, \alpha) \geq K_{ПР}^{TP} \cdot E_{ТР}(N) \\ h_{Пср}, h_{Осс} \geq 0,05 \text{ м} \\ C_{\Sigma}, l_0, l_{П}, l_{ЗП}, C_{ГМ}, \alpha \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

где C_D — общие затраты на строительство участка дороги; c — ширина обочины; B — ширина проезжей части; $h_{Пср}$ — средняя толщина покрытия дорожной одежды (ПДО); $h_{Осс}$ — средняя толщина основания дорожной одежды (ОДО); $E_{ГР}$ — модуль упругости грунта земляного полотна; C_{Σ} — общая стоимость строительных материалов дорожной одежды; l_0 — расстояние транспортировки материала ОДО; $l_{П}$ — расстояние транспортировки материала ПДО; $l_{ЗП}$ — расстояние транспортировки материала ЗП; C_{41} — стоимость устройства водопропускных сооружений — труб; C_{42} — стоимость устройства водопропускных сооружений — мостов; $C_{ГМ}$ — стоимость армирования геоматериалами; E_{Φ} — фактический модуль упругости дорожной одежды; E_0 — модуль

упругости материала ОДО; $E_{П}$ — модуль упругости материала ПДО; α — коэффициент упрочнения дорожной одежды при армировании геоматериалами; $K^{TP}_{ПР}$ — требуемый коэффициент прочности дорожной одежды по критерию упругого прогиба; $E_{ТР}$ — минимальный требуемый общий модуль упругости конструкции; N — количество приложений нагрузки от осей с нагрузкой 10 т в межсезонье [20].

Управляемыми переменными в данном случае являются $h_{Пср}$, $h_{Оср}$, C_{Σ} , l_0 , $l_{П}$, $l_{3П}$, $C_{ГМ}$, α . Таким образом, в результате решения поставленной задачи определяются оптимальные толщины слоёв дорожной одежды, подбираются карьеры для строительства и, если необходимо, способ упрочнения дорожной одежды, соответствующие минимальным затратам на строительство участка с учётом начальных условий местности.

Для обеспечения работы алгоритма построения оптимальной сети лесных дорог каждый альтернативный участок дорог должен быть оценён в соответствии с перспективностью его строительства. В качестве соответствующей оценки предлагается применить стоимостной критерий, равный разности между выигрышем, получаемым от возможности заготовки в соответствующем сегменте, и затратами, связанными со строительством этого участка дороги:

$$K_{АД} = C_K - C_D, \quad (8)$$

где C_K — выигрыш, получаемый от возможности заготовки в соответствующем сегменте:

$$C_K = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_i \cdot (h_{ij} \cdot C_{ij} - L_{Tij} \cdot C_{Tij}), \quad (9)$$

где n — число пород деревьев, заготавливаемых в рассматриваемом участке; m — число видов продукции, получаемой на делянках; V_i — объём разрешённой к заготовке в расчётном периоде спелой и перестойной древесины i -й породы в квартале; h_{ij} — средняя доля j -го вида продукции, получаемой из i -й породы; C_{ij} — прогнозируемая на расчётный период средняя цена j -го вида продукции, получаемой из i -й породы; C_{Tij} — средние затраты на транспортировку 1 м³ j -го вида продукции, получаемой из i -й породы, на расстояние 1 км; L_{Tij} — среднее расстояние перевозки j -го вида продукции, получаемой из i -й породы для данного сегмента.

Для более точного учёта местонахождения наиболее привлекательных с точки зрения заготовки участков леса предлагается произвести корректировку величины C_K каждого сегмента с учётом величин C_K соседних сегментов внутри круга заданного радиуса R . Скорректированное значение определяется по следующей формуле:

$$C'_K = C_K \cdot (1 - g) + \frac{g \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_{Ki}}{d_i^N}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^N}}, \quad (10)$$

где C_K — исходное значение выигрыша, получаемого от возможности заготовки в сегменте; g — степень влияния соседних кварталов ($g = 0,1-0,5$); n — число соседних сегментов, попавших внутрь круга заданного радиуса R ; C_{Ki} — исходные значения выигрыша, получаемого от возможности заготовки в соседних сегментах, попавших в внутрь круга радиусом R ; d_i — расстояние от центроида рассматриваемого сегмента до центроида i -го соседнего сегмента; N — параметр интерполяции ($N = 1-3$).

Вычисленные таким образом величины $K_{Ад}$, C_K и C'_K заносятся в соответствующие поля баз данных сегментов и альтернативных участков лесных дорог. Далее строится модель выбора ключевых точек лесосырьевой базы, которая применяется для определения множества целевых вершин, т. е. тех сегментов, к которым целесообразнее всего вести дорогу. В этой стадии процесса участвует пользователь системы. Сначала он задаёт число целевых точек. Система предлагает ему соответствующее число сегментов с наибольшими значениями C'_K . Далее пользователь может скорректировать число и расположение целевых точек. Для его удобства с помощью метода IDW-интерполяции строится тематическая карта (поверхность), где цветом выделяются зоны, более благоприятные и менее благоприятные с точки зрения заготовки:

$$C'_{Kpic} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C'_{Ki}}{d_i^N}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^N}}, \quad (11)$$

где C'_{Kpic} — значение C'_K для рассматриваемого пикселя строящейся растровой тематической карты; n — число сегментов, попавших внутрь круга заданного радиуса R ; C'_{Ki} — значение C'_K для i -го квартала, попавшего внутрь круга радиусом R ; d_i — расстояние от рассматриваемого пикселя до центроида i -го сегмента, попавшего внутрь круга радиусом R .

Для получения итогового плана дорожной сети предлагается оптимизационная модель принятия решений о размещении сети лесовозных дорог. Размещение оптимальной сети лесовозных дорог производится в процессе решения задачи Штейнера на сгенерированном графе [21], [22], дугами которого являются альтернативные участки дорог, связывающие соседние лесные сегменты. Данная задача заключается в определении частичного подграфа, содержащего пути в каждую из целевых вершин при условии максимума суммы весов всех задействованных при этом дуг. В качестве весов при этом выступают величины $K_{Ад}$.

Поставленная задача решается методом динамического программирования [23], [24] со следующим основным рекуррентным соотношением:

$$v(s, j) = \max\left(\max(v(s', j) + v(s \setminus s', j) \mid s' \subset s), \max(c_u + v(s, j_{e(u)}) \mid j_{b(u)} = j)\right), \quad (12)$$

где s — подмножество множества целевых вершин; j — вершина, из множества целевых вершин; u — управление, заключающееся в выборе дуги, соединяющей вершину j

с вершинами вне подмножества s ; c_u — вес дуги, соответствующей управлению u ; $j_{e(u)}$ — конечная вершина дуги, соответствующей управлению u ; $j_{b(u)}$ — начальная вершина дуги, соответствующей управлению u .

Задача на финальном этапе решается в среде ГИС.

3. Результаты

На основе описанных выше методов в Петрозаводском государственном университете разработана и апробирована в ряде лесопромышленных предприятий Северо-Западного федерального округа компьютерная информационно-вычислительная система для решения задачи оптимального проектирования сети лесных дорог. Данная система включает значительное разумное количество входных данных и имеет высокую степень адаптации под реальные условия (рисунок 2).

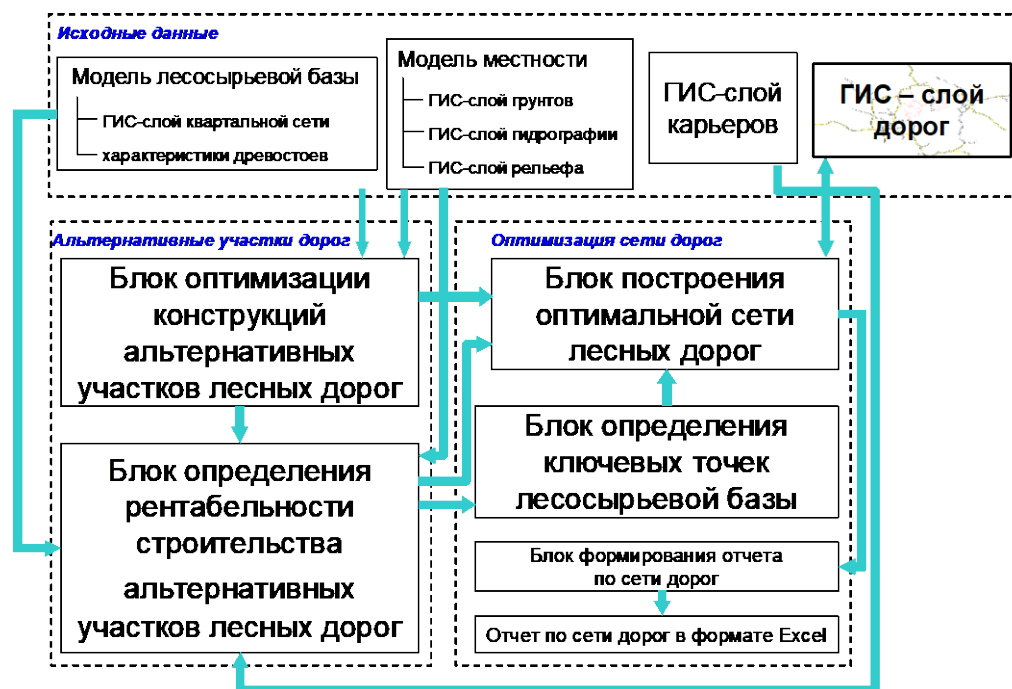


Рисунок 2. Структура компьютерной информационно-вычислительной системы для решения задачи проектирования сети лесных дорог (для уровня детализации — лесной квартал)

Figure 2. design of an information computer system for solving the problem of planning a forest road network (detail level — a forest compartment)

Система позволяет формировать отчёты о структуре планируемых лесных дорог и наносит местоположение новых участков дорог, а также выводит окно с общими результатами расчёта такими, как общая длина планируемых участков, общие затраты на строительство, средняя стоимость строительства одного километра лесной дороги и т. д. (рисунок 3).

Кроме того, можно получить подробные сведения о конструкции каждого отдельного участка проектируемой сети дорог, включая толщины слоёв земляного полотна и дорожной одежды, подобранную технологию строительства, необходимость армирования, объёмы материалов, затраты и т. д.

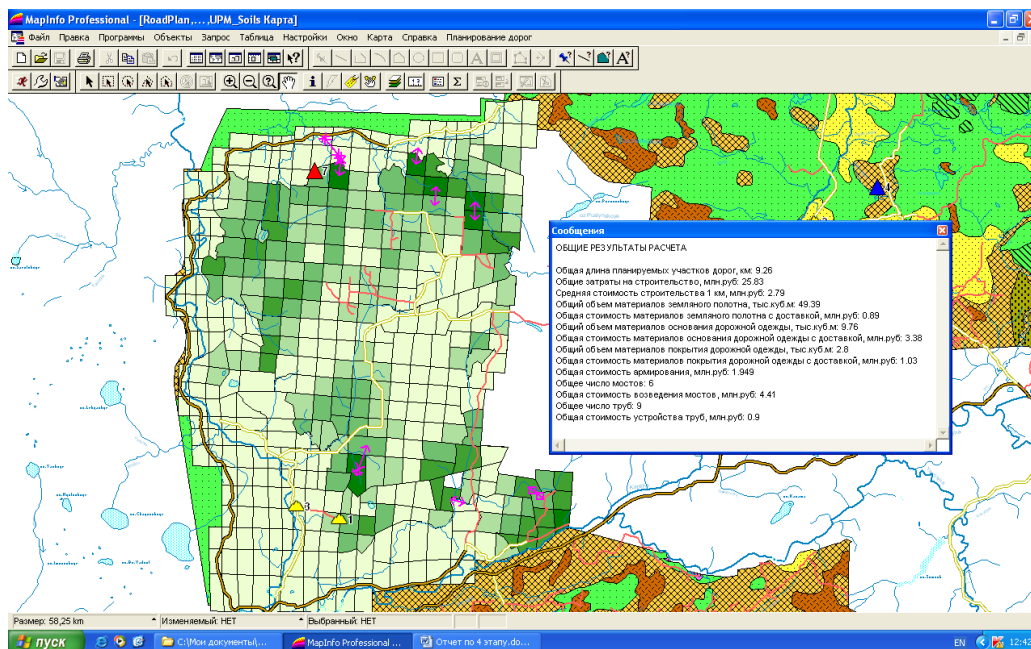


Рисунок 3. Результат моделирования размещения сети лесных дорог

Figure 3. The model of a forest road network design

Кроме основной задачи — построения оптимальной сети лесовозных автомобильных дорог, разработанная система позволяет решать задачу оптимизации конструкций участков дорог, местоположение и трассы которых задаются пользователем. Система оптимизирует конструкции с учётом грунтовых условий и затрат на закупку и доставку материалов из близлежащих карьеров, а также с учётом возможностей применения современных упрочняющих геоматериалов.

4. Обсуждение и заключение

Предлагаемая система оптимального проектирования дорожной сети позволяет создать эффективный план развития дорожно-транспортной инфраструктуры лесозаготовительного предприятия, учитывающий значительное количество природно-производственных факторов и базирующийся на применении современных технологий обработки и отображения данных, ресурсосберегающих методов дорожного строительства и использовании высокопрочных геосинтетических материалов. Полученные автоматизированным способом трассы лесных дорог могут быть уточнены с точки зрения учёта различных дополнительных факторов местности и запросов пользователя.

Список литературы

1. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.09.2018 № 1989-р.
2. СП 288.1325800.2016 Дороги лесные. Правила проектирования и строительства. Утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16.12.2016 № 952/пр.
3. Совершенствование системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог / Ю. Ю. Герасимов, А. П. Соколов, В. К. Катаров [и др.] // Учёные записки ПетрГУ. 2013. № 8 (137). С. 70—76.
4. Громская Л. Я., Симоненков М. В. Современное состояние моделирования и оптимизации лесных дорог // Лесной журнал. 2016. № 5. С. 108—122. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.108.
5. Информационно-интеллектуальные системы проектирования сетей лесовозных автомобильных дорог / Д. Г. Козлов, В. В. Никитин, А. В. Скрышников [и др.]. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. аграрного ун-та, 2021. 206 с.
6. Heinimann H. R. Forest Road Network and Transportation Engineering — State and Perspectives // Croatian Journal of Forest Engineering. 2017. Vol. 38 (2). P. 155—173.
7. Соколов А. П., Катаров В. К., Сюнёв В. С. Логистическая поддержка лесозаготовок. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2015. 160 с.
8. Бурмистрова О. Н., Пластинина Е. В., Воронина М. А. Математическая модель проектирования лесовозных автомобильных дорог с учётом климатических условий Северо-Западного региона // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2011. Вып. 4 (8). С. 79—84.
9. Проектирование, строительство, содержание и ремонт лесных дорог: Учеб. пособие / В. К. Катаров, Н. В. Ковалёва, А. Н. Кочанов [и др.]. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 92 с.
10. Киискинен П., Савонен Х., Томпери Т. Строительство лесной дороги. Йёэнсуу: НИИ Леса Финляндии, 2014. 52 с.
11. Рожин Д. В. Применение геосинтетических материалов при строительстве лесовозных дорог // Труды лесоинженерного факультета. 2010. № 8. С. 126—127.
12. Seo J., Kang S. Geographic information system based roadway construction planning // Canadian Journal of Civil Engineering. 2006. Vol. 33. P. 508—520.
13. Еналеева-Бандура И. М., Ковалев Р. Н., Баранов А. Н. Принципы и методы оценки эффективности лесотранспортной сети в условиях многоцелевого лесопользования: [монография]. Красноярск: Изд-во СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. 178 с.
14. Gumus S., Acar H. H., Toksoy D. Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting // Environ Monit Assess. 2008. Vol. 142. P. 109—116.
15. Uotila E., Viitala E.-J. Optimaalinen tietiheys yksityismetsätalouden kannalta // Metsätieteen aikakauskirja. 1999. No. 2. P. 167—179.
16. Рекомендации по проектированию автомобильных дорог областного и местного значения. М.: Министерство транспортного строительства СССР, 1970. 37 с.
17. Борисов Г. А. Проблемы автоматизации проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов // Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов. Петрозаводск, 1978. С. 4—9.
18. Борисов Г. А. Методы автоматизированного проектирования лесотранспорта. Петрозаводск: Карелия, 1978. 19 с.

19. Мохирев А. П., Болотов О. В. Автоматизированное проектирование и оптимизация транспортной схемы освоения лесосырьевой базы. URL: http://science-bsea.bgita.ru/2003/leskomp_2003/mohirev.htm (дата обращения: 15.04.2023). Текст: электронный.
20. Расчёт стоимости строительства альтернативных участков лесовозных дорог / В. К. Катаров, Д. В. Рожин, М. В. Туюнен, И. В. Редозубов // Транспортное дело России. 2010. № 2 (75). С. 106—111.
21. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
22. Лотарев Д. Т. Задача Штейнера для транспортной сети на поверхности, заданной цифровой моделью // Автоматика и телемеханика. 1980. Т. 10. С. 104—115.
23. Андреев В. Н., Герасимов Ю. Ю. Принятие оптимальных решений в лесном комплексе. Йоэнсуу: Изд-во Университета Йоэнсуу, 1999. 200 с.
24. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Иностранная литература, 1960. 400 с.

References

1. Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated 20.09.2018 No. 1989-r. (In Russ.)
2. CN 288.1325800.2016 Forest roads. Planning and construction standards. Approved by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 16.12.2016 No. 952/pr. (In Russ.)
3. Gerasimov Yu. Yu., Sokolov A. P., Katarov V. K., Syunev V. S., Rozhin D. V., Kovaleva N. V. Improvement of the system of optimal planning of the forest roads network. *Scientific notes of PetrSU*, 2013, no. 8 (137), pp. 70—76. (In Russ.)
4. Gromskaya L. Ya., Simonenkov M. V. The current state of modeling and optimization of forest roads. *Lesnoy zhurnal*, 2016, no. 5, pp. 108—122. doi: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.108. (In Russ.)
5. Kozlov D. G., Nikitin V. V., Skrypnikov A. V., Bryukhovetsky A. N., Sapelkin R. S., Tikhomirov P. V., Tveritnev O. N., Denisenko V. V. *Information and intelligent systems for the planning of logging road networks*. Voronezh, Publishing House of the Voronezh State Agrarian University, 2021. 206 p. (In Russ.)
6. Heinimann H. R. Forest Road Network and Transportation Engineering — State and Perspectives. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, vol. 38 (2), pp. 155—173.
7. Sokolov A. P., Katarov V. K., Syunev V. S. *Logistical support of logging*. Petrozavodsk, Publishing House of PetrSU, 2015. 160 p. (In Russ.)
8. Burmistrova O. N., Plastinina E. V., Voronina M. A. Mathematical model of logging roads design taking into account climatic conditions of the North-Western region. *Proceedings of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 4 (8), pp. 79—84. (In Russ.)
9. Katarov V. K., Kovaleva N. V., Kochanov A. N., Markov V. I., Petrov A. N., Ratkova E. I., Rozhin D. V., Stepanov A. V., Sokolov A. P., Syunev V. S. *Planning, construction, maintenance and repair of forest roads: textbook*. Petrozavodsk, Publishing House of PetrSU, 2014. 92 p. (In Russ.)
10. Kiiskinen P., Savonen H., Tampere T. *Construction of a forest road*. Joensuu, Finnish Forest Research Institute, 2014. 52 p. (In Russ.)
11. Rozhin D. V. The use of geosynthetic materials in the construction of logging roads. *Proceedings of the Faculty of Forestry Engineering*, 2010, no. 8, pp. 126—127. (In Russ.)

12. Seo J., Kang S. Geographic information system based roadway construction planning. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 508—520.
13. Enaleeva-Bandura I. M., Kovalev R. N., Baranov A. N. *Principles and methods of assessing the effectiveness of the forest transport network in conditions of multi-purpose forest management: [monograph]*. Krasnoyarsk, Publishing house of SibGU named after M. F. Reshetnev, 2022. 178 p. (In Russ.)
14. Gumus S., Acar H. H., Toksoy D. Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting. *Environ Monit Assess*, 2008, vol. 142, pp. 109—116.
15. Uotila E., Viitala E.-J. Optimaalinen tietiheys yksityismetsätalouden kannalta. *Metsätieteen aikakauskirja*, 1999, no. 2, pp. 167—179.
16. Recommendations for the planning of highways of regional and local significance. Moscow, Ministry of Transport Construction of the USSR, 1970. 37 p. (In Russ.)
17. Borisov G. A. Problems of automation of planning of transport and meliorative development of woodlands. *Automation of planning of transport and meliorative development of woodlands*. Petrozavodsk, 1978, pp. 4—9. (In Russ.)
18. Borisov G. A. *Methods of automated design of forest transport*. Petrozavodsk, Karelia, 1978. 19 p. (In Russ.)
19. Mohirev A. P., Bolotov O. V. *Computer-aided planning and optimization of the transport scheme for the development of the forest resource base*. URL: http://science-bsea.bgita.ru/2003/leskomp_2003/mohirev.htm (accessed: 15.04.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
20. Katarov V. K., Rozhin D. V., Tuyunen M. V., Redozubov I. V. Calculation of the cost of construction of alternative sections of logging roads. *Transport business of Russia*, 2010, no. 2 (75), pp. 106—111. (In Russ.)
21. Kristofides N. *Graph theory. Algorithmic approach*. Moscow, Mir, 1978. 432 p. (In Russ.)
22. Lotarev D. T. Steiner's problem for a transport network on a surface defined by a digital model. *Automation and telemechanics*, 1980, vol. 10, pp. 104—115. (In Russ.)
23. Andreev V. N., Gerasimov Yu. Yu. *Making optimal decisions in the forest complex*. Joensuu, Publishing House of the University of Joensuu, 1999. 200 p. (In Russ.)
24. Bellman R. *Dynamic programming*. Moscow, Foreign literature, 1960. 400 p. (In Russ.)