



ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 625.711.84

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.108

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИИ ЛЕСНЫХ ДОРОГ**

Л.Я. Громская, канд. техн. наук, доц.

М.В. Симоненков, асп.

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова, пер. Институтский, д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021;
e-mail: gromskaya.stl@gmail.com

Проведен обзор достижений и возможностей использования современных методов моделирования и оптимизации при автоматизированном проектировании дорожных сетей и лесных дорог. Выбор методов оптимизации позволит повысить эффективность в принятии решений по планированию и организации дорожного строительства. В обзор включены как отечественные, так и зарубежные разработки, в которых отмечены общие тенденции развития и отличительные особенности. Рассмотрены существующие подходы и стадии проектирования, а также уровни планирования лесных дорог. Приведены модели пространственных данных – векторная и растровая, которые лежат в основе моделирования транспортных сетей. В зависимости от стадии проектирования выделены основные задачи оптимизации автомобильных дорог, для решения которых перечислены две используемые категории методов: точные и эвристические. По методам оптимизации приведены примеры решаемых задач. Показано, что самыми распространенными методами оптимизации транспортных сетей являются метод кратчайшего пути и алгоритм минимального покрывающего дерева. Они лежат в основе поиска оптимальной транспортной сети на графах, успешно реализованных при решении транспортных задач на среднесрочную и краткосрочную перспективу и для небольших территорий. На основе выполненного анализа выделена классификация моделей лесных дорог. Сделаны выводы, что при стратегическом планировании актуальным является использование методов многокритериальной оптимизации и пространственного анализа на базе геоинформационной системы. Предложена система управления лесными дорогами, которая будет включать следующие основные блоки: информационный, модельный, оптимизационный и визуализационный. Эффективность системы будет зависеть от выработки долгосрочной стратегии и оптимизации основных лесных дорог, а также обеспечения взаимосвязи подбора лесосечного фонда и перспективных календарных планов ввода запроектированных генеральной

Для цитирования: Громская Л.Я., Симоненков М.В. Современное состояние моделирования и оптимизации лесных дорог // Лесн. журн. 2016. № 5. С. 108–122. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.108

схемой участков автомобильных дорог. В зависимости от уровня планирования возможно использование нескольких методов оптимизации.

Ключевые слова: лесные дороги, дорожная сеть, лесозаготовки, планирование лесной транспортной инфраструктуры, проектирование лесных дорог, методы моделирования и оптимизации.

Принцип многоцелевого и неистощительного использования лесов требует создания постоянной дорожной сети. Проблема проектирования лесных дорог многоцелевого назначения заключается в сложности учета природных, социально-экономических, экологических и специфических факторов, а также противопожарных, рекреационных и экотуристических функций дорог. Рациональное планирование и проектирование автомобильных лесных дорог позволяет снизить затраты на дорожное строительство, уменьшить общую плотность дорог и минимизировать отрицательное воздействие на окружающую среду.

Цель данного исследования – представление достижений и возможностей использования методов моделирования и оптимизации при проектировании лесных дорог.

В ходе обзора открытых источников были выявлены основные закономерности создания дорожных сетей, выделены этапы и стадии проектирования и основные решаемые оптимизационные задачи. Обзор проведен по материалам как зарубежных, так и отечественных источников. При этом отмечены не только общие тенденции развития, но и отличительные особенности.

Результатом этого исследования является оценка возможностей существующих методов и моделей проектирования дорог. На основе проведенного анализа предложена единая концепция создания лесных дорог для многоцелевого использования лесных ресурсов.

Проектирование лесных дорог различной иерархии является сложным процессом, который традиционно выполнялся в несколько стадий и поэтапно. Согласно ВСН 05–87 «Инструкция по производству изысканий лесохозяйственных автомобильных дорог» (Всесоюзный государственный проектно-изыскательский институт «Союзгипролесхоз» Гослесхоза СССР), на предпроектной стадии разрабатывалась генеральная схема развития сети лесных автомобильных дорог (схема транспортного освоения) на перспективный срок (10 лет и более), или полное транспортное освоение, где намечались главные лесные дороги – магистрали и ветки. Она являлась основой для разработки технико-экономических обоснований (ТЭО) или технико-экономических расчетов (ТЭР) на предпроектной стадии, устанавливающих целесообразность развития дорожных сетей, зон тяготения или строительства отдельных дорог. Далее следовали проектная и рабочая стадии.

С 2008 г. в России перешли на долго-, средне- и краткосрочное лесное планирование, в рамках которого предусматривается планирование лесных дорог. При долгосрочном планировании приводится характеристика транспортной доступности освоения лесов, включая данные о существующих транспортных

путях в лесах, их протяженности и состоянии по лесничествам и лесопаркам, а также обеспеченность транспортными путями в сравнении с потребностью в них и планируемое развитие лесной и лесоперерабатывающей инфраструктуры с учетом их наличия и перспектив освоения лесов для различных видов использования. Проекты освоения лесов, по сравнению с прежними проектами рубок, не содержат крупномасштабных картографических материалов с размещением (нарезкой) лесосек. Предполагается, что лесопользователи самостоятельно выбирают необходимые участки в пределах допустимых объемов в соответствии с действующими нормами и правилами. В Проекте освоения лесов раздел «Состояние лесной инфраструктуры» содержит характеристику и состояние существующих объектов лесной и лесоперерабатывающей инфраструктуры, их размещение на территории. Приводится обоснование и проектирование новых объектов с расчетом заготавливаемой при этом древесины. Средне- и краткосрочное планирование включает подбор и отвод лесосек и предполагает разработку схемы транспортного освоения первичной транспортной сети арендуемых участков.

Таким образом, планирование лесных дорог напрямую связано с этапом планирования рубок и других лесохозяйственных мероприятий. Лесное планирование осложняется множеством факторов, изменяющихся во времени и пространстве, связано с различными рисками и неопределенностью.

За рубежом планирование лесных дорог включает в себя стратегический, тактический и оперативный уровни. На стратегическом уровне выполняются планирование лесозаготовок и других лесохозяйственных мероприятий сроком на 5 лет и более, планирование доступа к участкам заготовки на основе существующей и потенциально необходимой проектируемой сети лесных дорог. На тактическом уровне определяются: схема размещения лесозаготовительного оборудования, на каких участках какие методы заготовки использовать, последовательность проведения лесохозяйственных мероприятий на участках заготовки, какие конкретные участки дорог модернизировать, поддерживать и/или построить и др. На оперативном уровне решаются вопросы строительства, обслуживания и вывода из эксплуатации указанных участков дорог, проведение полевых работ. Таким образом, стратегическое планирование дает ответ на вопрос, что и когда делать, где делать – рассматривается на тактическом уровне, а как делать – на оперативном.

Лесная отрасль имеет социальные, экологические и экономические аспекты развития, предоставляет широкий спектр продукции и услуг. Социально-экономические условия сильно различаются по всему миру, при этом разные методы были разработаны и адаптированы для решения проблем лесопользования, связанных с локальными задачами управления лесным хозяйством.

Необходимо особо отметить, что у лесов России есть некоторые различия по сравнению с лесами других стран. Практически все российские леса имеют разновозрастную смешанную структуру, поэтому модели стратегического пла-

нирования, разработанные для североамериканских и североевропейских лесонасаждений, могут применяться при условии глубокой адаптации.

В литературе можно найти примеры систем планирования лесозаготовок с учетом пространственных ограничений. Эти модели являются основой для планирования управления лесами, но не так много систем, которые решают задачи проектирования сети лесных дорог. Чаще встречаются отдельные компьютерные модели и программы, предназначенные для проектирования лесных дорог. Это вызвано, прежде всего, сложностью и учетом множества факторов при создании системы лесных дорог.

Несмотря на важность и масштабность задачи, планирование лесозаготовок и лесных дорог в России в настоящее время – это ручной либо полуавтоматизированный процесс. Проблемы управления дорожными системами стали слишком сложны для решения с помощью традиционных методов, которые в основном состоят из полевых изысканий. Выбор кратчайшего маршрута по одному из критериев проектирования, например по стоимости, не всегда обеспечивает приемлемые показатели других критериев. Компьютерный анализ местоположения дороги необходим, так как позволяет сократить время, затрачиваемое на проектирование с оценкой альтернатив и учетом экономических, экологических и других ограничений.

В основе моделирования дорожных сетей лежат различные модели данных, имеющих пространственную привязку. Моделирование транспортных сетей базируется на Географической информационной системе (ГИС). Все множество моделей пространственных данных делится на две большие группы: векторные и ячеистые модели.

Векторные модели предназначены для описания совокупностей отдельных объектов, например дорог. В них каждый объект задается некоторым набором координат на плоскости или в пространстве, а также совокупностью атрибутов. В векторных нетопологических моделях все объекты полностью независимы друг от друга и могут произвольно размещаться в пространстве. Они состоят из собственно описания отдельных объектов, а также из описаний топологии – отношений отдельных объектов между собой. Наиболее распространенными топологическими моделями являются линейно-узловая модель (покрытие) и транспортная сеть.

Ячеистые модели описывают непрерывные поля данных, такие как космоснимки местности, поля загрязнений окружающей среды, высотных отметок (рельеф). В ячеистых моделях некоторый участок территории неразрывно разбивается на одинаковые (прямоугольники в растровой или треугольники в регулярной модели) или различные (треугольники в нерегулярной триангуляционной модели) фрагменты, каждый из которых описывается своим набором атрибутов.

Модель транспортной (геометрической) сети предназначена, в первую очередь, для описания в виде связанного графа схемы транспортных путей (автомобильных и железных дорог, авиалиний и водных маршрутов) для последующего

сетевого анализа. Транспортная сеть содержит два основных типа объектов (узлы и дуги) и один дополнительный – маршруты.

Кроме векторной модели, при моделировании дорожных сетей используют растровые модели. В растровой (ячейистой) модели данных вся плоскость разбивается системой равноотстоящих вертикальных и горизонтальных прямых на одинаковые ячейки – пиксели, каждому из которых сопоставлен какой-то код. В каждом пикселе может храниться какая-то числовая характеристика пространства (например, высота рельефа, цвет на фотоснимке, уровень загрязнения окружающей среды) или код объекта, которому принадлежит соответствующий пиксель.

В зависимости от уровня планирования и стадии проектирования лесных дорог решаются следующие основные задачи:

1. Оптимизация сети лесных дорог.
2. Оптимизация общей стоимости дороги. Основные факторы стоимости, связанные с управлением дорожной сетью, включают в себя строительство, ремонт и содержание дорог, а также транспортные расходы. Чаще всего при оптимизации в компьютерных системах проектирования дорог используется «подход себестоимости», т. е. устанавливаются затраты на единицу продукции, приходящиеся на количество проектных параметров (например, м³, м², м и др.).
3. Оптимизация местоположения трассы дороги.
4. Оптимизация продольного профиля дороги.
5. Одновременная оптимизация плана трассы и продольного профиля дороги при минимальной общей стоимости и условии указания ограничений проектирования дорог.
6. Оптимизация распределения земляных работ. Земляные работы состоят из основных мероприятий, включая разработку, перемещение, погрузку, транспортировку и разгрузку, а также уплотнение грунта. Как правило, проектировщик оценивает количество материала, необходимое для каждого участка дороги, характерные грунты вдоль дороги, местоположение и запасы материалов для строительства, а также удельные затраты на земляные работы.

Для решения оптимизационных задач выделяют две основные категории методов:

точные методы (exact techniques), которые находят поистине глобальное оптимальное решение, если это решение существует;

эвристические методы (heuristic), которые находят «лучшее решение» или диапазон почти оптимальных решений задач.

К *точным* относятся:

линейное программирование (ЛП) (linear programming) – метод нахождения максимального или минимального значения линейной целевой функции при наличии линейных ограничений и неотрицательности переменных;

целочисленное программирование (ЦП) (integer programming) – метод оптимизации линейной функции при линейных ограничениях, в которой на значения всех или части переменных наложено требование целочисленности;

многоцелевая оптимизация (multi-objective optimization) – это многокритериальная оптимизация, процесс поиска оптимального решения задачи с учетом нескольких критериев одновременно;

нелинейные методы математического программирования – используются там, где отношения между переменными в целевой функции и ограничениях не являются линейными. К ним относятся динамическое (dynamic), квадратичное (quadratic) и геометрическое программирование (geometric programming).

Эвристические методы – это методы для поиска повторяющейся процедуры, где улучшенное решение относительно текущей определяется на основе опыта и эмпирических правил. При оптимизации лесных дорог используются следующие эвристические методы:

метод моделируемого (имитируемого) отжига (simulated annealing);

метод Монте-Карло;

табу поиск, или поиск с запретом (tabu search);

генетический алгоритм (genetic algorithm).

Описание и математические формулировки методов оптимизации можно найти в специальной литературе.

При размещении лесных дорог целочисленное линейное программирование использовали Najafi, Sobhani, Abdi [11, 28, 29].

Динамическое программирование применял для определения оптимального местоположения лесной дороги (оптимального маршрута) Tan [39], для проектирования сети лесных дорог – Герасимов, Соколов, Рожин [2, 3, 8–10], для определения оптимального класса дороги – Anderson и др. [13], для нахождения последовательности транспортного освоения лесосек и лесных дорог – Антонова [1], для размещения лесовозной дороги – Saito [32].

В последнее время при проектировании дорог и дорожных сетей используются такие современные эвристические методы, как Simulated Annealing, Genetic Algorithm, Tabu Search. Метод Simulated Annealing был использован Akaу [12] для поиска лучшего варианта продольного профиля при минимуме общих затрат на строительство, транспорт, техническое обслуживание одного вида лесной дороги. Genetic Algorithm (GA) применяли Liatsis и Tawfik [25] для создания дороги в двух измерениях, Jong и Schonfield [24] разработали подход GA для оптимизации профиля дороги и исследовали эффективность алгоритма на пересеченной местности. Tan [38] использовал эвристический метод, чтобы выбрать кратчайший путь развития из набора сетевых связей с помощью метода Дейкстры. Clark и др. [21] также воспользовались этим методом для проектирования подъездных дорог. Weintraub и др. [22, 40, 41] описали две модели: OPTIMED, которая использует эвристический метод на основе ЛП, осуществляя выбор среди дорожно-строительных вариантов, которые заявлены заранее; PLANEX, которая использует базы данных растровой ГИС и другую информацию наряду с эвристической, чтобы найти подъездные пути при планировании лесозаготовок. Метод Tabu Search (ТА) применял Aruga [15] при выборе альтернативных вариантов продольного профиля при минимуме строительных и эксплуатационных затрат. Можно перечислить и другие примеры использования эвристических методов: проектирование сети лесных

дорог и определение месторасположения лесной дороги – Chung, Sessions [18–20], последовательность освоения лесосек – Chung, Bower, O'Brien, Sessions [16, 17], оптимизация сети лесных дорог – Schwartz, Stückelberger [33], планирование подъездных лесных дорог при оперативном планировании – Frayret, Meignan, Pesant [23].

Основным недостатком эвристических методов является приближенное вычисление результата.

Метод кратчайшего пути (Shortest Path Algorithms) – самый распространенный при решении транспортных задач. В общем задача кратчайшего пути сводится к поиску серии автомобильных дуг двух узлов таким образом, чтобы сумма весов на этих краях была сведена к минимуму. Существует несколько подходов к определению оптимальных маршрутов на графе. Одним из самых простых и точных является алгоритм Дейкстры. Этот метод использовали Sessions [34], Anderson, Nelson [13] и реализовали его на ЭВМ для стратегического планирования дорог, Герасимов, Сюнёв, Соколов [3, 10] – для определения оптимальных маршрутов на графах при решении задач транспортировки древесины. Метод кратчайшего пути применял Stückelberger [35–37] при определении стоимости и содержания дорог, а также при нахождении стоимости дороги за срок службы, Meng [27] – при размещении дороги. Интерактивное проектирование лесных дорог проводили Frayret, Meignan, Pesant [23].

Проект сети дорог на примере модели STEIN [4] представляется моделью в виде некоей плоской реализации ориентированного графа – корневого дерева, дугами которого являются участки дорог, вершинами – центры запасов древесины в лесных кварталах (фиксированные вершины) и свободно размещаемые развилки (точки Штейнера).

Аналогично в модели «Лес-оптима» [5–7] участок лесного фонда представляется в виде связного взвешенного графа, в котором вершины – участки лесного фонда, ребра – возможные транспортные пути между ними, характеризующиеся соответствующими стоимостями строительства дорог.

В моделях Герасимова, Соколова и др. [2, 3, 10] задаются множество вершин и множество дуг. Каждой вершине присваивается вес прямо пропорциональный выигрышу, получаемому от заготовки в некоторой окрестности от этой вершины. Каждой дуге также присваивается вес, прямо пропорциональный рентабельности строительства участка дорог, совпадающего с данной дугой. В основу графоаналитической модели положен алгоритм построения минимального покрывающего дерева.

Большим преимуществом алгоритмов на графах является то, что в результате его работы всегда будет найдено оптимальное решение. Он хорошо работает только при небольшом количестве узлов в графе. При росте числа узлов резко увеличивается время поиска решения, так как для каждой новой точки маршрута всегда проверяются все варианты (все узлы графа), в том числе и заведомо бесперспективные. Поэтому время работы алгоритма оказывается пропорциональным величине N^2 (где N – число узлов графа).

При определении маршрутов на сложных графах, соответствующих дорожной сети, покрывающей лесосырьевую базу крупных лесопромышленных предприятий, затрачиваемое время измеряется десятками минут на один маршрут. Такие затраты времени слишком велики с точки зрения удобства практического применения системы. Поэтому в целях сокращения времени поиска используют эвристические алгоритмы, позволяющие не проводить проверку всех узлов на каждом шаге.

В последнее время актуальным является моделирование дорожных сетей с использованием методов многокритериальной оптимизации и пространственного анализа на базе растровых моделей: оптимизация и моделирование горных дорог [33, 35], оптимизация стоимости перевозки и планирование сети лесных дорог [18, 20], оценка доступности территории с учетом способов заготовки, определение уклонов дорог [26, 31], размещение дороги с учетом влажности и уклонов местности, местоположения и размеров водопропускных сооружений [27], моделирование сети лесных дорог [30]. При стратегическом планировании эти методы являются наиболее эффективными.

Общие принципы поиска оптимальной транспортной сети на графах, которые успешно реализованы при решении транспортных задач на средне- и краткосрочную перспективу и для небольших территорий, сводятся к следующим положениям:

- установление потенциально возможных маршрутов к участкам леса;
- проведение анализа каждого альтернативного маршрута по критерию экономической эффективности;
- выбор оптимальных маршрутов по критерию минимальных затрат на строительство дорожной сети;
- проведение корректировки маршрутов с учетом различных факторов.

На основе выполненного нами анализа можно составить классификацию моделей лесных дорог:

- уровень планирования (стратегический, тактический, оперативный);
- математический метод (моделирование, оптимизация – точные или эвристические методы);
- векторная и/или растровая модели пространственных данных дорожных сетей.

Таким образом, к настоящему времени в мире разработано большое количество моделей для оптимизации лесных дорог, но в условиях России они не нашли широкого применения из-за отсутствия коммерческих программных продуктов, которые можно было бы использовать на практике. Прежде всего это обусловлено отсутствием государственной поддержки и заказов со стороны лесопользователей, недостатком финансовых средств не только на создание лесотранспортной инфраструктуры, но и в лесной отрасли в целом.

Управление системой лесных дорог рассматривает многоцелевые аспекты. Так, кроме доступности проведения лесохозяйственных мероприятий, заготовки древесины, необходимо учитывать экологические и социальные аспекты.

Лесная дорога – это многофункциональная дорога, при строительстве которой необходимо учитывать интересы других отраслей и населения, что требует выработки долгосрочной стратегии и плана развития лесных дорог регионов, в которых обозначены требования к лесным дорогам как со стороны государства, так и со стороны лесопользователей. Эти стратегические документы должны быть увязаны с территориальным развитием на уровне субъекта Российской Федерации и со стратегией развития в регионе лесной отрасли и лесопромышленных кластеров. Задача транспортного освоения арендуемых лесных участков лесопромышленного предприятия состоит в том, чтобы подобрать лесосечный фонд в рубку на срок до 10 лет на основе проекта освоения лесов и стратегического плана лесных дорог. При подборе лесосек необходимо обеспечить взаимосвязь подбора лесосечного фонда и перспективных календарных планов ввода запроектированных генеральной схемой участков автомобильных дорог.

Для этого предлагается создать систему управления лесными дорогами, которая будет включать следующие блоки:

актуализация лесных дорог с использованием средств дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) на базе ГИС лесоустройства;

моделирование и оптимизация трасс лесных дорог для долгосрочного планирования лесопользования;

моделирование и оптимизация набора лесосек в рубку в соответствии с действующими нормативами;

моделирование и оптимизация последовательности транспортного освоения на средне- и краткосрочную перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонова Т.С. Обоснование методики размещения лесосек и транспортного освоения лесов лесозаготовительного предприятия на базе геоинформационных систем: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2012. 170 с.

2. Герасимов Ю.Ю., Соколов А.П., Катаров В.К. Разработка системы оптимального проектирования сети лесовозных дорог // Инф. технологии. 2011. № 1. С. 39–44.

3. Герасимов Ю.Ю., Сютёв В.С., Соколов А.П. Алгоритмы определения оптимальных маршрутов на графах для решения задач управления системами транспортировки древесины для лесопромышленного комплекса и биоэнергетики // Тр. лесотехн. ф-та ПетрГУ. 2010. Вып. 8. С. 30–33. (с 2013 г. Resources and Technology).

4. Кукин В.Д., Кузина В.И. Реализация концепции очередности освоения лесосырьевой базы в системе STEIN // Методы математического моделирования и информационные технологии: тр. ИПМИ Карел. НЦ РАН. Вып. 1. Петрозаводск, 1999. С. 169–174.

5. Мохирев А.П. Обоснование проектирования сети лесных дорог на примере предприятий Нижнего Приангарья: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2007. 176 с.

6. Мохирев А.П., Дрягин В.В. Географическая информационная система для управления лесопользованием «Лес-оптима»: а.с. № 2012612350 РФ. № 2012610059; заявл. 10.01.12; зарег. 05.03.2012. 1 с.

7. Мохирев А.П., Егармин П.А. Географическая информационная система планирования оптимального освоения лесного фонда // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4 (12). С. 172–177.
8. Рожин Д.В. Обоснование комплекса ремонтно-строительных мероприятий сети лесовозных дорог лесозаготовительного района: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2012. 21 с.
9. Соколов А.П., Герасимов Ю.Ю. Система поддержки технологий по производству и логистике древесного топлива: алгоритмы и оптимизация // Хвойные борельной зоны. 2013. Т. 31, № 1. С. 208–214.
10. Соколов А.П., Сютёв В.С., Герасимов Ю.Ю., Каръялайнен Т. Оптимизация логистики лесозаготовок // Resources and Technology. 2012. № 9(2). С. 117–128.
11. Abdi E., Majnounian B., Darvishsefat A., Mashayekhi Z., Sessions J. A GIS-MCE based model for forest road planning // J. of Forest Science. Vol. 55 (4). P. 171–176.
12. Akay A. A new methodology in designing forest roads // Turkish J. Agricul. Forest. 2004. Vol. 28. P. 273–279.
13. Anderson A., Nelson J., D'Eon R. Determining optimal road class and road deactivation strategies using dynamic programming // Canadian J. of Forest Research. 2006. Vol. 36. P.1509–1518.
14. Anderson A., Nelson J. Projecting vector-based road networks with a shortest path algorithm // Canadian J. of Forest Research. 2004. Vol. 34. P. 1444–1457.
15. Aruga K. Tabu search optimization of horizontal and vertical alignments of forest roads // J. of Forest Research. 2005. Vol. 10. P. 275–284.
16. Chung W. SNAP for ArcGIS // A Scheduling and Network Analysis Program for Tactical Harvest Planning. 2010.
17. Chung W., Dykstra D.P., Bower F., O'Brien S.A., Abt R.M., Sessions J. User's Guide to SNAP for ArcGIS®: ArcGIS Interface for Scheduling and Network Analysis Program. USDA Forest Service PNW-GTR-847. 2012. 34 p.
18. Chung W., Sessions J. NETWORK 2000: a program for optimizing fixed and variable cost transportation systems // Proceedings of Eight Symposium on Systems Analysis in Forest Resources. Kluwer Press, 2000.
19. Chung W., Sessions J. Designing a forest road network using heuristic optimization techniques // Proc. of the 24th Meeting of the Council of Forest Engineering, July 15–19. Snowshoe, West Virginia, 2001.
20. Chung W., Sessions J. NETWORK 2001 – Transportation planning under multiple objectives / P. Schiess and F. Krogstad (eds.) // Proceedings of the International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium, December 10–12. Seattle, WA, 2001.
21. Clark M.M., Meller Russell D., McDonald T.P. A three-stage heuristic for harvest scheduling with access road network development // Forest Science. 2000. Vol. 46(2). P. 204–218.
22. Epstein R., Weintraub A., Sapunar P., Nieto E., Sessions J., Sessions F., Bustamante F., Musante H. A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning // Annals of Operations Research. 2006. Vol. 54(6). P. 1017–1027.
23. Frayret J.-M., Meignan D., Pesant G. Interactive Planning System for Forest Road Construction // International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS 2012), August 26–29. Quebec, Canada, 2012.

24. *Jong J.C., Schonfeld P.* An Evolutionary Model for Simultaneously Optimizing Three-Dimensional Highway Alignments. *Transportation Research. Part B.* 2003. Vol. 37. P. 107–128.
25. *Liatsis P., Tawfik H.M.* Two-Dimensional Road Shape Optimisation Using Genetic Algorithms // *Mathematics and Computers in Simulation.* 1999. Vol. 51. P. 19–31.
26. *Lubello D.* A rule-based SDSS for integrated forest harvesting planning // *Università degli Studi di Padova.* 2008.
27. *Meng X.* Design of GIS Based Forest Road Layout and Environmental Assessment Tool: MS thesis. University of New Brunswick, 2001.
28. *Najafi A., Evelyn W. Richards.* Designing a Forest Road Network Using Mixed Integer Programming // *Croatian J. of Forest Engineering.* 2013. Vol. 34(1). P. 13.
29. *Najafi A., Sobhani H, Saeed A., Makhdom M., Mohajer M.* Planning and assessment of alternative forest road and skidding networks // *Croatian J. of Forest Engineering.* 2008. Vol. 29(1). P. 63–73.
30. *Newnham R.M.* ROADPLAN: a tool for designing forest road networks // *J. of Forest Engineering.* 1995. Vol. 6(2). P. 17–26.
31. *Pellegrini M.* Support tools for planning and management of a forest road network // *Università degli Studi di Padova.* 2012.
32. *Saito M., Goshima M., Aruga K., Matsue K., Shuin Y., Tasaka T.* Study of Automatic Forest Road Design Model Considering Shallow Landslides with LiDAR Data of Funyu Experimental Forest // *Croatian J. of Forest Engineering.* 2013. Vol. 34(1). P. 1–15.
33. *Schwartz J., Stückelberger J.* Computing Lower Bounds for Steiner Trees in Road Network Design // *The 7th International Symposium on Operations Research and Its Applications (ISORA'08),* October 31–November 3. Lijiang, China, 2008.
34. *Sessions J., Sessions J.B.* Scheduling and Network Analysis Program (SNAP II): User's Guide / Department of Forest Engineering, Oregon State University. USA, Corvallis, OR, 1991.
35. *Stückelberger J.A.* A weighted-graph optimization approach for automatic location of forest road networks: Diss Nr 17366 / Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich. Zürich, 2007. 127 p.
36. *Stückelberger J.A., Heinimann H.R., Burlet E.C.* Modelling spatial variability in the life-cycle costs of low-volume forest roads // *European J. of Forest Research.* 2006. Vol. 125. P. 377–390.
37. *Stückelberger J.A., Heinimann H.R., Chung W., Ulber M.* Automatic road-network planning for multiple objectives // *Council on Forest Engineering: Annual Conference, Coeur d'Alene, MT, USA / eds. W. Chung and H.S. Han.* USA: University of Montana, 2006. P. 233–248.
38. *Tan J.* Locating Forest Roads by a Spatial and Heuristic Procedure Using Microcomputers // *J. of Forest Engineering.* 1999. Vol. 10(2). P. 91–100.
39. *Tan J.* Application of Dynamic Programming to Optimum Location of Forest Road // *J. of Forest Engineering.* 2000. P. 85–89.
40. *Weintraub A., Church R.L., Murray A.T., Guignard M.* Forest Management Models and Combinatorial Algorithms: Analysis of State of the Art // *Annals of Operations Research.* 2000. Vol. 96. P. 271–285.
41. *Weintraub A.P., Epstein R., Murphy G., Manley B.* The Impact of Environmental Constraints on Short Term Harvesting: Use of Planning Tools and Mathematical Models // *Annals of Operations Research.* 2000. Vol. 5. P. 41–66.

Поступила 18.04.16

UDC 625.711.84

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.108

Current Status of Modeling and Optimization of Forest Roads

L.Ya. Gromskaya, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

M.V. Simonenkov, Postgraduate Student

Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov,

Institutskiy pereulok, 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation;

e-mail: gromskaya.stl@gmail.com

The paper presents the achievements and opportunities of using modern modeling and optimization methods in the automated design of road networks and forest roads. The selection of optimization techniques will improve the efficiency of decision-making for the planning and organization of road construction. The survey includes both domestic and foreign developments with the general trends and distinctive features. The paper considers the existing approaches, design stages and the levels of forest road planning. Vector and raster spatial data models, which are the base of road networks modeling, are introduced. The main highways design optimization problems are highlighted depending on the process phase. Solution methods are listed in two categories – the exact and heuristic along with problems-solving examples. The most common methods of transport networks optimization are the shortest path method and the minimum spanning tree algorithm. They form the base of the search process of optimal transport network on graphs, successfully implemented in solving transport problems in the medium and short terms, and for small areas. On the basis of the analysis the classification of forest roads models are highlighted. It is concluded that the use of multi-criteria optimization methods and spatial analysis based on the geographic information system is actual for strategic planning problems. The paper proposes the creation of forest roads management system with four main units: informational, modeling, optimization and visualization. The effectiveness of the system will depend on the development of long-term strategy and optimization of the main forest roads, as well as the supporting of the selection relationship of cutting fund and prospective schedule of putting into operation of road sections projected by the general scheme. Several optimization techniques depending on the level of planning can be used.

Keywords: forest roads, road network, logging, forest transport infrastructure planning, forest road design, modeling and optimization method.

REFERENCES

1. Antonova T.S. *Obosnovanie metodiki razmeshcheniya lesosek i transportnogo osvoeniya lesov lesozagotovitel'nogo predpriyatiya na baze geoinformatsionnykh system: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Justification of a Technique of Cutting Areas Allocation and Transport Forest Exploitation of a Logging Enterprise Based on the GIS: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Saint Petersburg, 2012. 170 p.

For citation: Gromskaya L.Ya., Simonenkov M.V. Current Status of Modeling and Optimization of Forest Roads. *Lesnoy zhurnal*, 2016, no. 5, pp. 108–122. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.108.

2. Gerasimov Yu.Yu., Sokolov A.P., Katarov V.K. Razrabotka sistemy optimal'nogo proektirovaniya seti lesovoznykh dorog [Development of the Optimal Design System of the Forest Roads Network]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2011, no. 1, pp. 118–124.
3. Gerasimov Yu.Yu., Syunev V.S., Sokolov A.P. Algoritmy opredeleniya optimal'nykh marshrutov na grafakh dlya resheniya zadach upravleniya sistemami transportirovki drevesiny dlya lesopromyshlennogo kompleksa i bioenergetiki [Algorithms for Optimal Routes Determination on Graphs for the Control Solution of Timber Transport Systems for the Timber Industry and Bioenergy]. *Trudy lesoinzhenerenogo Fakul'teta PetrGU*, 2010, no. 8, pp. 30–33.
4. Kukin V.D., Kuzina V.I. Realizatsiya kontseptsii ocherednosti osvoeniya lesosyr'evoy bazy v sisteme STEIN [Implementation of the Concept of Development Priority of Forest Resources in the STEIN]. *Metody matematicheskogo modelirovaniya i informatsionnye tekhnologii: trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Methods of Mathematical Modeling and Information Technologies: Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences], 1999, no. 1, pp. 169–174.
5. Mokhirev A.P. *Obosnovanie proektirovaniya seti lesnykh dorog na primere predpriyatiy Nizhnego Priangar'ya*: dis. ... kand. tekhn. nauk [Justification of the Forest Road Network Design on the Example of the Enterprises of the Lower Angara Region: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Krasnoyarsk, 2007. 176 p.
6. Mokhirev A.P., Dryagin V.V. *Geograficheskaya informatsionnaya sistema dlya upravleniya lesopol'zovaniem "Les-optima"* [Geographic Information System "Les-Optima" for Forest Management]. Certificate of authorship RF, no. 2012612350, 2012.
7. Mokhirev A.P., Egarmin P.A. Geograficheskaya informatsionnaya sistema planirovaniya optimal'nogo osvoeniya lesnogo fonda [Geographic Information System of the Forest Optimal Development Planning]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2011, no. 4(12), pp. 172–177.
8. Rozhin D.V. *Obosnovanie kompleksa remontno-stroitel'nykh meropriyatiy seti lesovoznykh dorog lesozagotovitel'nogo rayona*: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Justification of the Complex of Repair and Construction Projects of the Forest Roads Network in a Cutting Area: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Petrozavodsk, 2012. 21 p.
9. Sokolov A.P., Gerasimov Yu.Yu. Sistema podderzhki tekhnologiy po proizvodstvu i logistike drevesnogo topliva: algoritmy i optimizatsiya [The Support System of Wood Fuel Production and Logistics Technologies: Algorithms and Optimization]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2013, vol. 31, no. 1, pp. 208–214.
10. Sokolov A.P., Syunev V.S., Gerasimov Yu.Yu., Kar'yalaynen T. Optimizatsiya logistiki lesozagotovok [Optimization of Harvesting Logistics]. *Resources and Technology*, 2012, no. 9(2), pp. 117–128.
11. Abdi E., Majnounian B., Darvishsefat A., Mashayekhi Z., Sessions J. A GIS-MCE Based Model for Forest Road Planning. *J. of Forest Science*, 2009, vol. 55(4), pp. 171–176.
12. Akay A. A New Methodology in Designing Forest Roads. *Turkish J. Agricul. Forest.*, 2004, vol. 28, pp. 273–279.
13. Anderson A., Nelson J., D'Eon R. Determining Optimal Road Class and Road Deactivation Strategies Using Dynamic Programming. *Canadian J. of Forest Research*, 2006, vol. 36, pp. 1509–1518.
14. Anderson A., Nelson J. Projecting Vector-Based Road Networks with a Shortest Path Algorithm. *Canadian J. of Forest Research*, 2004, vol. 34, pp. 1444–1457.

15. Aruga K. Tabu Search Optimization of Horizontal and Vertical Alignments of Forest Roads. *J. of Forest Research*, 2005, vol. 10, pp. 275–284.
16. Chung W. SNAP for ArcGIS. *A Scheduling and Network Analysis Program for Tactical Harvest Planning*, 2010.
17. Chung W., Dykstra D.P., Bower F., O'Brien S.A., Abt R.M., Sessions J. User's Guide to SNAP for ArcGIS®: ArcGIS Interface for Scheduling and Network Analysis Program. *USDA Forest Service PNW-GTR-847*, 2012. 34 p.
18. Chung W., Sessions J. NETWORK 2000: a Program for Optimizing Fixed and Variable Cost Transportation Systems. *Proc. of the 8th Symposium on Systems Analysis in Forest Resources*. USA, Boston, 2003.
19. Chung W., Sessions J. Designing a Forest Road Network Using Heuristic Optimization Techniques. *Proc. of the 24th Meeting of the Council of Forest Engineering, July 15–19*. USA, Snowshoe, West Virginia, 2001.
20. Chung W., Sessions J. NETWORK 2001 – Transportation Planning Under Multiple Objectives. Ed. by P. Schiess and F. Krogstad. *Proc. of the International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium, December 10–12*. USA, Seattle, WA, 2001.
21. Clark M.M., Meller Russell D., McDonald T.P. A Three-Stage Heuristic for Harvest Scheduling with Access Road Network Development. *Forest Science*, 2000, vol. 46(2), pp. 204–218.
22. Epstein R., Weintraub A., Sapunar P., Nieto E., Sessions J., Sessions F., Bustamante F., Musante H. A Combinatorial Heuristic Approach for Solving Real-Size Machinery Location and Road Design Problems in Forestry Planning. *Annals of Operations Research*, 2006, vol. 54(6), pp. 1017–1027.
23. Frayret J.-M., Meignan D., Pesant G. Interactive Planning System for Forest Road Construction. *International Conf. on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS 2012), August 26–29*. Canada, Quebec, 2012.
24. Jong J.C., Schonfeld P. An Evolutionary Model for Simultaneously Optimizing Three-Dimensional Highway Alignments. *Transportation Research*, 2003, part B, vol. 37, pp. 107–128.
25. Liatsis P., Tawfik H.M. Two-Dimensional Road Shape Optimization Using Genetic Algorithms. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1999, vol. 51, pp. 19–31.
26. Lubello D. A Rule-Based SDSS for Integrated Forest Harvesting Planning. *Università degli Studi di Padova*, 2008.
27. Meng X. *Design of GIS Based Forest Road Layout and Environmental Assessment Tool: MS thesis*. Canada, New Brunswick, 2001.
28. Najafi A., Evelyn W. Richards. Designing a Forest Road Network Using Mixed Integer Programming. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2013, vol. 34(1), p. 13.
29. Najafi A., Sobhani H., Saeed A., Makhdom M., Mohajer M. Planning and Assessment of Alternative Forest Road and Skidding Networks. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2008, vol. 29(1), pp. 63–73.
30. Newnham R.M. ROADPLAN: a Tool for Designing Forest Road Networks. *J. of Forest Engineering*, 1995, vol. 6(2), pp. 17–26.
31. Pellegrini M. Support Tools for Planning and Management of a Forest Road Network. *Università degli Studi di Padova*, 2012.
32. Saito M., Goshima M., Aruga K., Matsue K., Shuin Y., Tasaka T. Study of Automatic Forest Road Design Model Considering Shallow Landslides with LiDAR Data of Funyu Experimental Forest. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2013, vol. 34(1), pp. 1–15.

33. Schwartz J., Stückelberger J. Computing Lower Bounds for Steiner Trees in Road Network Design. *The 7th International Symposium on Operations Research and Its Applications (ISORA '08), October 31–November 3*. China, Lijiang, 2008.
34. Sessions J., Sessions J.B. *Scheduling and Network Analysis Program (SNAP II): User's Guide*. USA, Corvallis, OR, 1991.
35. Stückelberger J.A. *A Weighted-Graph Optimization Approach for Automatic Location of Forest Road Network*: Diss. no. 17366. Switzerland, Zürich, 2007. 127 p.
36. Stückelberger J.A., Heinimann H.R., Burlet E.C. Modelling Spatial Variability in the Life-Cycle Costs of Low-Volume Forest Roads. *European J. of Forest Research*, 2006, vol. 125, pp. 377–390.
37. Stückelberger J.A., Heinimann H.R., Chung W., Ulber M. Automatic Road-Networkplanning for Multiple Objectives. Ed. by W. Chung, H.S. Han. *Council on Forest Engineering: Annual Conference, Coeur d'Alene, MT, USA*. USA, University of Montana, 2006, pp. 233–248.
38. Tan J. Locating Forest Roads by a Spatial and Heuristic Procedure Using Micro-computers. *J. of Forest Engineering*, 1999, vol. 10(2), pp. 91–100.
39. Tan J. Application of Dynamic Programming to Optimum Location of Forest Road. *J. of Forest Engineering*, 2000, pp. 85–89.
40. Weintraub A., Church R.L., Murray A.T., Guignard M. Forest Management Models and Combinatorial Algorithms: Analysis of State of the Art. *Annals of Operations Research*, 2000, vol. 96, pp. 271–285.
41. Weintraub A.P., Epstein R., Murphy G., Manley B. The Impact of Environmental Constraints on Short Term Harvesting: Use of Planning Tools and Mathematical Models. *Annals of Operations Research*, 2000, vol. 5, pp. 41–66.

Received on April 18, 2016
