

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ
ЛЕСНОЙ ДОРОЖНОЙ СЕТИ**

Сюнёв В. С., проф., д.т.н., Соколов А. П., проф., д.т.н.
Петрозаводский государственный университет
(Петрозаводск, Россия), a_sokolov@psu.karelia.ru

**DETERMINATION OF THE FOREST ROAD NETWORK
DEVELOPMENT PARAMETERS**

Syunev V. S., Prof., D.Sc., Sokolov A. P., Prof., D.Sc.
Petrozavodsk State University
(Petrozavodsk, Russia)

The topic of this paper is the use of new informational technologies and mathematical methods for optimal roads construction and planning of forest roads net. General set of the task, using models, methods and facilities are described in the paper.

Низкая обеспеченность транспортной инфраструктурой сдерживает развитие лесопромышленного комплекса, т. к. существенно ограничиваются возможности более полного освоения эксплуатационных лесов и снижается экономическая доступность лесных ресурсов. В этой связи особое значение получают мероприятия, позволяющие повысить эффективность строительства и эксплуатации лесных автомобильных дорог [1, 2].

Отсутствие дорог значительно повышает затраты предприятий на заготовку и в определенных случаях делает нерентабельным освоение лесных территорий. Исправить ситуацию возможно только путем постоянного целенаправленного развития дорожной сети. В этом смысле очень важным является обеспечение эффективного планирования дорожного строительства в тех объемах, которые позволят сохранить рентабельность предприятия, и одновременно сделают доступным необходимый объем лесных ресурсов.

Одним из направлений повышения эффективности строительства и эксплуатации дорог является всестороннее обоснование значений основных параметров планов строительства дорог, которое может быть организовано с применением новых информационных технологий и современных методов поддержки принятия решений, основанных на математическом программировании.

Главной целью при обосновании параметров сети лесных автомобильных дорог следует считать обеспечение транспортной доступности основных лесосырьевых баз при условии минимальных затрат на строительство дорог. При этом должны быть приняты во внимание пространственное расположение наиболее перспективных лесных массивов, природно-производственные факторы, такие как распределение различных типов грунтов по территории лесосырьевой базы, расположение русел рек, наличие озер, болот, других непреодолимых препятствий или особо охраняемых зон, где по каким-либо причинам запрещено дорожное строительство. Кроме того, должны быть учтены возможные источники материалов для дорожного строительства (песчано-гравийные карьеры и т. п.), а также существующая сеть дорог.

В качестве основной группы методов, которые были применены для обоснования параметров процессов развития сетей лесных дорог, выступили методы математического программирования. При этом был построен целый ряд моделей и осуществлено решение нескольких оптимизационных задач, для каждой из которых подобраны наиболее эффективные алгоритмы. Для обеспечения процессов планирования сети и проектирования дорог разработаны следующие модели:

- Объектные пространственные компьютерные ГИС-модели: лесосырьевой базы; местности; карьеров; дорожной сети.

- Математические модели, в том числе и оптимизационные: оптимизационная модель принятия решений о выборе конструкций земляного полотна и дорожных одежд лесных автомобильных дорог; модель оценки альтернативных участков лесных дорог; модель выбора ключевых точек лесосырьевой базы; оптимизационная модель принятия решений о размещении сети лесных дорог.

С учетом сказанного, схема методики обоснования параметров процессов развития сетей ЛАД, выглядит следующим образом (рисунок 1) [3, 4].

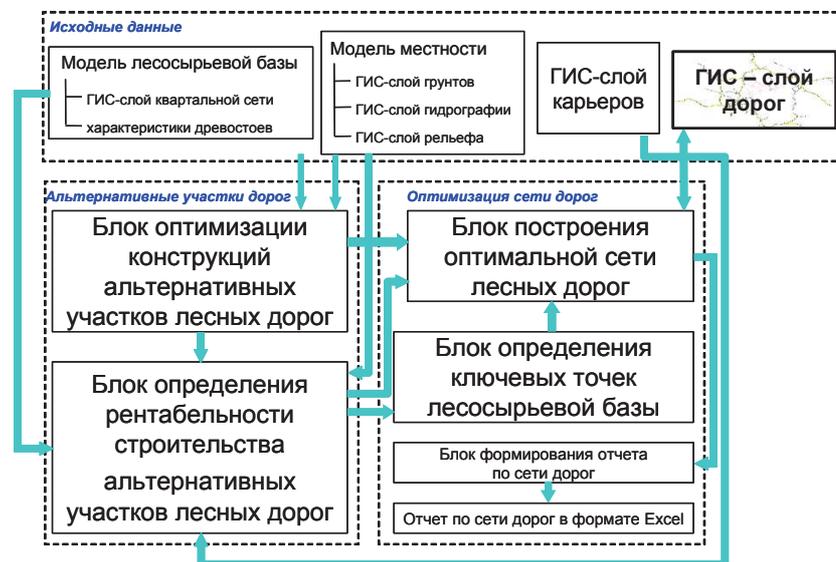


Рисунок 1 – Схема методики обоснования параметров процессов развития сетей лесных автомобильных дорог

Исходными данными служат четыре объектных пространственных модели в формате ГИС. Каждая модель представляет собой комбинацию слоев электронной карты и баз данных, содержащих информацию о соответствующих объектах.

Предлагаемая методика базируется на решении задачи Штейнера на графах. Этот подход достаточно хорошо зарекомендовал себя при решении подобных задач [5]. Такая постановка требует задания, во-первых, множества вершин и множества дуг, и, во-вторых, множества целевых вершин, являющегося подмножеством множества вершин. Каждой вершине из множества вершин должен быть присвоен вес, прямо пропорциональный выигрышу, получаемому от заготовки древесины в некоторой окрестности этой вершины. Каждой дуге также присваивается вес, прямо пропорциональный рентабельности строительства участка дороги, совпадающего с данной дугой.

При практической реализации сначала было предложено привязывать каждую вершину графа к одному из кварталов рассматриваемой лесосырьевой базы и помещать ее в геометрическом центре (центроиде) лесного квартала [3, 4]. При этом исходными данными для расчета веса вершины являлись бы характеристики древостоя в данном квартале. Множество дуг заполняется отрезками прямых, соединяющих каждую вершину с вершинами, находящимися в центроидах тех кварталов, которые имеют хотя бы одну пограничную точку с кварталом, в центроиде которого расположена рассматриваемая вершина. Другими словами, центроид каждого квартала соединяется с центроидами всех соседних кварталов, причем, соседними считаются кварталы, имеющие хотя бы одну пограничную (общую) точку.

Надо сказать, что достаточно большие размеры кварталов (в Республике Карелия это, как правило, участки 1x2 км, в Ленинградской области - 1x1 км) приводят к тому, что при использовании этого алгоритма проектируемая сеть лесных дорог получает довольно грубую пространственную привязку, которая не позволяет учитывать локальные особенности почвенно-грунтовых и гидрографических условий. Такой проект сети лесных дорог в дальней-

шем требует достаточно существенного уточнения, что может привести к отклонениям от запланированного уровня эффективности.

Для устранения влияния размеров и конфигурации лесной квартальной сети на результаты работы было предложено перейти к использованию регулярной сети одинаковых по размеру квадратных участков, размер которых может выбираться пользователем [6]. Эта сеть равномерно покрывает всю территорию рассматриваемой лесосырьевой базы. В дальнейшем эти квадратные участки используются так же, как раньше использовались кварталы. Это не требует кардинальных изменений в самой методике. Преимущества использования сети таких участков заключаются, во-первых, в ее регулярности, тогда как кварталы могли иметь самую непредсказуемую форму и размеры. Во-вторых, в этом случае пользователь может сам задавать шаг сети, т. е. размер этих элементарных регулярных участков, в зависимости от требуемой степени детализации. В-третьих, благодаря специальной методике пересчета характеристик древостоя, применение регулярной сети элементарных участков дает возможность использовать данные о лесосырьевой базе как поквартального, так и повыделного уровня детализации. Использование информации в разрезе выделов значительно повышает точность оценки перспективности заготовки на лесном участке лесосырьевой базы любого размера. В последней версии компьютерной программы, реализующей описываемую методику, пользователь может выбирать один из трех возможных вариантов шага регулярной сети элементарных участков: 500, 750 и 1000 м [6].

При этом запас древесины (по породам), доступной в каждом элементарном участке регулярной сети, определяется как сумма произведений объемов в каждом участке лесосырьевой базы (квартале или выделе), полностью или частично попавшем на территорию этого элементарного участка, на долю площади участка лесосырьевой базы, попавшей на территорию элементарного участка.

Учет рельефа местности базируется на утверждении, что при прочих равных условиях, строительство дороги в ситуации со сложным рельефом сопряжено с большей величиной затрат, чем такое же строительство в условиях равнинной местности. Степень увеличения затрат было предложено оценивать с помощью т. н. коэффициента удлинения дорожного участка, значение которого увеличивается с увеличением уклона местности [7]. Коэффициенты удлинения определяются для каждого альтернативного участка дорог (от центроида каждого элементарного участка до центроидов всех соседних элементарных участков). Для этого сначала определяется высотное положение начала и конца альтернативного участка дороги, затем вычисляется уклон и по значению этого уклона принимается коэффициент удлинения. Для определения проектных отметок начала и конца участков дорог используется цифровая модель рельефа – тематическое растровое изображение с шагом 200 м, значение каждого пикселя которого представляет собой высоту соответствующей точки рельефа. Для построения модели рельефа используется стандартный инструмент ГИС MapInfo. Инструмент задействуется автоматически при работе исполняемого модуля, написанного на языке MapBasic. Исходными данными для построения цифровой модели рельефа служат координаты и высоты задаваемых пользователем точек. Точки задаются на отдельном слое ГИС MapInfo. В базу данных этого слоя заносятся высоты этих точек. Чем больше таких точек будет использовано, тем точнее будет модель рельефа.

Для каждого из альтернативных участков проектируемых дорог должен быть определен вес. Для этого служит подсистема «Альтернативные участки дорог» (см. рисунок 1). Данная подсистема состоит из двух блоков, работающих последовательно. Это «Блок оптимизации конструкций альтернативных участков лесных дорог» и «Блок определения рентабельности строительства альтернативных участков лесных дорог».

В блоке оптимизации конструкций альтернативных участков лесных дорог в результате решения оптимизационной задачи выбирается конструкция дорожного полотна и определяются затраты на строительство данного альтернативного участка с учетом грунтовых условий по оси трассы, а также с учетом возможностей использования современных геома-

териалов, а также необходимости строительства мостов и устройства труб. В общем виде эта оптимизационная модель выглядит следующим образом [3, 4, 8]:

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

где $C_{Д}$ – общие затраты на строительство участка дороги, руб.;

c – ширина обочины, м;

B – ширина проезжей части, м;

$h_{Пср}$ – средняя толщина покрытия дорожной одежды (ПДО), м;

$h_{Оср}$ – средняя толщина основания дорожной одежды (ОДО), м;

$E_{ГР}$ – модуль упругости грунта земляного полотна;

C_{Σ} – общая стоимость строительных материалов дорожной одежды, руб.;

l_0 – расстояние транспортировки материала ОДО, км;

$l_{П}$ – расстояние транспортировки материала ПДО, км;

$l_{ЗП}$ – расстояние транспортировки материала ЗП, км;

C_{41} – стоимость устройства водопропускных сооружений – труб, руб.;

C_{42} – стоимость устройства мостов, руб.;

$C_{ГМ}$ – стоимость армирования геоматериалами, руб.;

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;

$K_{ПР}^{ТР}$ – требуемый коэффициент прочности дорожной одежды по критерию упругого прогиба;

$E_{ТР}$ – минимальный требуемый общий модуль упругости конструкции;

N – число приложений нагрузки от осей с нагрузкой 10 т в весенний период (апрель, май).

Методика определения величин $C_{Д}$, E_{Φ} , $E_{ТР}$ и др. содержится в работе [8]. Управляемыми переменными в данном случае являются $h_{Пср}$, $h_{Оср}$, C_{Σ} , l_0 , $l_{П}$, $l_{ЗП}$, $C_{ГМ}$, α . Таким образом, в результате решения поставленной задачи определяются оптимальные толщины слоев дорожной одежды, подбираются карьеры для строительства и, если необходимо, способ упрочнения дорожной одежды, соответствующие минимальным затратам на строительство участка с учетом начальных условий местности.

Если на протяжении альтернативного участка грунтовые условия изменяются, участок разбивается на более мелкие части, для которых расчет затрат выполняется по отдельности с последующим суммированием по всему участку. Если участок является непроходимым по каким-либо причинам (например, на пути встречается озеро), затраты на строительство принимаются условно бесконечными. Если участок дороги уже существует, тогда затраты приравниваются к нулю или величине, равной затратам на ремонт участка, если таковой потребуется.

Для обеспечения работы алгоритма построения оптимальной сети лесных дорог каждый альтернативный участок дороги оценивается в соответствии с перспективностью его строительства. Это осуществляется в блоке определения рентабельности строительства альтернативных участков лесных дорог (см. рисунок 1). В качестве соответствующей оценки применяется стоимостной критерий, равный разности между выигрышем, получаемым от возможности заготовки на соответствующей лесной территории, и затратами, связанными со строительством этого участка дороги.

На следующем этапе вступает в действие подсистема «Оптимизация сети дорог» (см. рисунок 1). Для решения задачи Штейнера на графе определяется множество целевых вершин, соответствующих ключевым точкам лесосырьевой базы. Для этого служит «Блок определения ключевых точек лесосырьевой базы». В этой стадии процесса участвует пользователь компьютерного инструмента для поддержки развития лесной дорожной сети. Сначала он задает число целевых точек. Программа предлагает ему соответствующее число лесных кварталов с наибольшими значениями стоимостного критерия. 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.

После определения целевых вершин запускается «Блок построения оптимальной сети лесных дорог». Оптимальное размещение сети ЛАД производится в процессе решения задачи Штейнера на сгенерированном графе [5]. 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 значения стоимостного критерия.

Поставленная задача решается методом динамического программирования. Полученный подграф и будет являться искомой оптимизированной сетью ЛАД в рассматриваемых условиях. По результатам работы блока построения оптимальной сети ЛАД в ГИС-слой дорог вносятся соответствующие изменения – он дополняется вновь спроектированными дорогами. Кроме того, в компьютерном инструменте для поддержки развития лесной дорожной сети предусмотрены алгоритмы для автоматизированной генерации отчетов по разработанным проектам, которые, в числе прочего, содержат информацию по протяженности новых дорог, предварительных затратах на строительство в целом и по их элементам, дополнительных объемах древесины, доступной для заготовки и т. д. Эту функцию выполняет «Блок формирования отчета по сети дорог».

ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие транспортной инфраструктуры лесной отрасли – опыт Финляндии / Ю. Ю. Герасимов, В. С. Сюнёв, А. П. Соколов, В. К. Катаров // Транспортное дело России. - 2009. - №7 (68). - С.99-102.
2. Шегельман, И. Р. Ресурсный подход к развитию региональной сети лесовозных дорог / И. Р. Шегельман, П. О. Щукин, Р. А. Петухов // Перспективы науки. - 2011. - № 26. - С. 188-191.
3. Герасимов, Ю. Ю. Разработка системы оптимального проектирования сети лесовозных автомобильных дорог / Ю. Ю. Герасимов, А. П. Соколов, В. К. Катаров // Информационные технологии. - 2011. - №1 (68). - С. 39-43.
4. Система оптимального проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом динамики лесосырьевой базы / Д. Г. Давыдков, Д. В. Рожин, А. П. Соколов, В. С. Сюнёв // Ученые записки ПетрГУ. - 2013. - №4 (133). - С.69-74.
5. Солтан, П. С. Задача Штейнера на графах / П. С. Солтан, К. Ф. Присакару // Доклады АН СССР. - 1971. - Т. 198. № 1. - С. 46-49.
6. Совершенствование системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог / Ю. Ю. Герасимов, А. П. Соколов, В. К. Катаров, В. С. Сюнёв, Д. В. Рожин, Н. В. Ковалева // Ученые записки ПетрГУ. - 2013. - №8 (137). - С.70-76.
7. Салминен, Э. О. Лесные дороги. Справочник / Э. О. Салминен. - СПб.: Издательство «Лань», 2012. - 496 с.
8. Расчет стоимости строительства альтернативных участков лесовозных дорог / В. К. Катаров, Д. В. Рожин, М. В. Туюнён, И. В. Редозубов // Транспортное дело России. - 2010. - №2. - С. 106-111.