

## ПОСТРОЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧ

Road locating and alignment model will assist road planning managers to determine the optimum location for road network. Once the definition has been made, evaluation such as checking certain critical points on the route is necessary. This task can be done in the office using inexpensive materials, which is quicker, or by doing field survey, which is more costly. The task should answer two important questions. First which are the factors and constrains that should be considered. Second, what information and at what accuracy should it be surveyed. It is clear that the primary issue concerning the locating of forest roads is to make a forecast of the optimum road network in the forest area. Knowledge of forest environment and their relationships to each other are important in locating, designing, constructing, and maintaining forest roads that will sustain use and stay in good condition and to avoid sensitive areas.

**Введение.** При разработке вариантов формирования и развития лесотранспортной системы в лесном фонде возникают четыре группы вопросов, которые требуют системного, комплексного их рассмотрения:

- насколько сложно проложить лесотранспортные пути, и с каким затратами это связано;
- так ли велики богатства региона, чтобы идти на соответствующие затраты;
- как разместить и развивать объекты транспортного комплекса, чтобы наилучшим образом обеспечивать развитие экономики, обслуживать хозяйственную деятельность лесозаготовительного предприятия;
- как обеспечить безопасное и эффективное строительство и содержание объектов лесотранспортной системы.

Для решения этих вопросов необходимо:

- 1) дать транспортно-географическую оценку природных условий территории;
- 2) оценить природно-ресурсный потенциал района освоения;
- 3) выполнить оценку территориальной организации расселения и лесозаготовительного хозяйства;
- 4) сформировать целесообразные принципы проектирования, строительства и использования объектов лесотранспортной системы.

Транспортно-географическая оценка природных условий необходима, прежде всего, для выбора трассы нового пути. При этом поверхность земли рассматривается как несущее основание для будущих инженерных сооружений. Оно не однообразно, а осложняется многими естественными препятствиями разных категорий сложности. Основным критерием оценочной классификации препятствий можно считать трудоемкость их преодоления, а количественным измерителем – вероятные затраты труда и средств при строительстве лесотранспортной сети.

Развитая лесотранспортная сеть (ЛТС) любого региона позволяет успешно решать как производственные, так и социальные задачи. Лесхозы расположены в основном в границах административных районов, и их деятельность тесно свя-

зана со смежными производствами промышленного и сельскохозяйственного назначения. Темпы развития этих производств всецело зависят от эффективности работы дорожной сети, которую проектируют и строят с учетом большего количества факторов как природного, так и производственного происхождения [1].

Для нахождения рациональной схемы сети лесных дорог наиболее эффективным способом представляется использование инструментария теории графов (Абдряшитов Р. И., Салминен Э. О., Борисов Г. А., Ковалев Р. Н., Гуров С. В., Болотов О. В., Ельдештейн Ю. М.), поскольку одной из основных задач этой теории как раз и является нахождение оптимальных путей. Лесотранспортная сеть также может проектироваться на основе методов визуально-имитационного моделирования [2]. Однако для качественного расположения ЛТС в сложных природно-производственных условиях необходимо использовать большее число параметров, сложных соотношений и уравнений. При невозможности проведения наблюдений и экспериментов над ЛТС необходимо ее изучать с учетом всего многообразия влияющих факторов в течение срока освоения лесных массивов.

Исходной позицией для построения многоуровневой системы математических моделей является выделение структурных элементов ЛТС в соответствии с выполняемыми ими функциями. Эффективным методом преодоления начальной сложности задачи описания структуры ЛТС при достаточно высокой неопределенности информации является использование многоуровневого итерационного метода изучения свойств и поведения сложных Т-систем [3]. Метод отражает опыт решения широкого класса производственных и технологических задач, когда на низших уровнях проектные решения отличаются большой детальностью, а на высшем уровне они имеют более обобщенный характер. Это позволяет выполнить предпроектный синтез ЛТС снизу вверх, т. е. от детальных решений перейти к установлению структуры и параметров сети в целом.

Применение вышеуказанного метода требует многоуровневой декомпозиции ЛТС и оформления двух групп отношений. Первая группа должна включать различной сложности модели и алгоритмы, отражающие принципиальные особенности характеристик ЛТС, ее подсистем и элементов на различных уровнях расчленения. Вторая группа отношений должна отражать взаимосвязь системных характеристик, формирующих предпроектное решение на каждом уровне.

В зависимости от характера отображаемых свойств проектируемых объектов и моделей оптимизации используются различные виды моделирования (таблица).

В работе выполнено ситуационное моделирование формирования транспортных потоков. Структурные модели выражают взаимное расположение частей ЛТС в пространстве, наличие непосредственных связей между их транспортными путями и узлами. Большинство задач составлено на основе нескольких видов моделирования.

Ситуационные модели составлены с использованием математических уравнений и логических описаний, а структурные модели ЛТС – с использованием теории матриц и графов [4].

Таблица 1  
Задачи и модели оптимизации ЛТС

№	Задача	Модель	Вид моделирования
1	Выделение однородных лесоэксплуатационных районов в лесном массиве	$M_{ЛР}$	Классификация, ситуационное
2	Формирование транспортных потоков	$M_{ТП}$	Ситуационное
3	Оптимизация параметров ЛТС для размещения в лесном массиве	$M_{ЛТС}$	Структурное на графах

**Модель выделения однородных лесоэксплуатационных районов в лесном массиве  $M_{ЛР}$ .** Границы зон тяготения лесных дорог необходимо устанавливать в зависимости от административно-хозяйственных границ предприятий, природных условий, конфигурации лесных массивов, объемов работ и их размещения на территории, наличия существующих дорог на основе технико-экономического анализа перспективного направления грузопотоков.

Поэтому модель  $M_{ЛР}$  предназначена для выделения на площади конкретного лесного массива однородных природных комплексов – лесоэксплуатационных районов (ЛР).

В основе выделения ЛР лежат принципы комплексной и лесоинженерной оценки всей

совокупности природных условий исследуемых лесных массивов. Основным методом выделения ЛР является идея территориальной дифференциации [5] лесных и нелесных земель по единому комплексному признаку – **типам местности.**

Модель  $M_{ЛР}$  связана с классификацией природных условий лесных массивов и отображением однородных ситуаций в лесосырьевой базе.

В лесосырьевой базе выделяют:

1) лесоэксплуатационные районы ЛР, соответствующие определенным типам местности;

2) точечные и линейные препятствия, контурные «недоступные» области, затрудняющие или исключающие размещение по ним лесотранспортных путей (например, особо защитные участки леса, болота, реки и т. д.).

Решение моделей  $M_{ЛР}$  выполняется в последовательности:

1. Изучение и лесоинженерная оценка природных и лесорастительных условий лесного фонда. Составление списка типов леса, выделенных при лесоустройстве и распределение их по сериям групп типов леса и типам местности.

2. Установление эксплуатационных показателей будущих лесосек в зависимости от типов леса (несущая способность грунтов, уровень грунтовых вод, уклон местности и т. д.).

3. Выделение в лесосырьевой базе границ природных территориальных комплексов и объектов следующих категорий:

а) лесоэксплуатационных районов с однородными природными условиями (рис. 1);

б) зон расположения населенных пунктов и нижних лесоскладов;

в) неэксплуатационных участков и нелесных земель (сельхозугодий и др.);

г) точечных и линейных препятствий, контурных «недоступных» областей.

В дальнейшем считается обязательным выполнение условий: секции (а) являются объектами для размещения лесосек и лесотранспортных сетей, площади (б и в) служат только для прокладки лесотранспортных и внутрихозяйственных дорог; точечные и линейные препятствия (г) требуют строительства мостов и т. д., а прокладка путей по контурным «недоступным» областям исключается.

4. Определение по каждому району исходных данных в следующем объеме:

- распределения запасов древесины на 1 га и среднего объема хлыста;

- диапазона изменения эксплуатационных показателей лесосек;

- способов очистки лесосек и лесовосстановления;

- рациональных конструкций лесных дорог;

- стоимостных показателей на строительстве лесных дорог и лесопогрузочных пунктов.

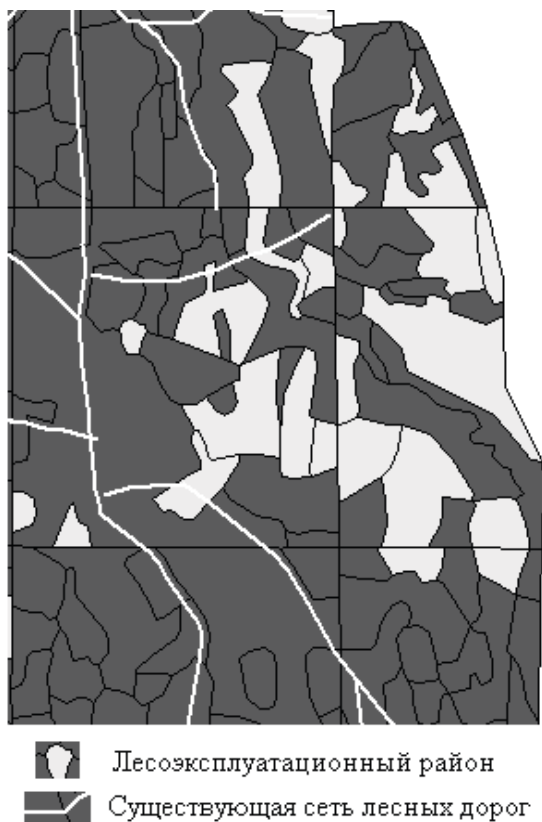


Рис. 1. Выделение лесозексплуатационных районов

**Модели формирования транспортных потоков  $M_{ТП}$ .** Рассмотрим принципы формирования транспортных потоков в контексте формирования ЛТС и их фрагментов разного уровня иерархии. На нижнем ( $k = 3$ ) иерархическом уровне в формировании элементов ЛТС участвуют неделимые системообразующие факторы в виде единичных предметов труда  $P^{пт}$ , потоков грузов  $P^г$  и пассажиропотоков  $P^п$ . Ввиду многочисленности назовем их условно потоками.

Определим свойства, позволяющие отличить данные потока друг от друга. Пусть ЛТС определена в некотором конечномерном пространстве, например на площади лесного массива. Разделим это пространство на более мелкие участки и пронумеруем их; тогда принадлежность потоков к тому или другому участку является их первым отличительным свойством. Назовем это свойство пространственным распределением потоков.

Такой подход позволил на третьем иерархическом уровне выделить распределенные по площади лесных массивов элементарные потоки:

- 1) единичные предметы труда (ПТ) – деревья (хлысты) объемом  $q_x$ ;
- 2) элементарные грузопотоки объемом  $q_г$ ;
- 3) элементарные пассажиропотоки объемом  $q_п$ .

Эти потоки обладают различным признаком пространственного распределения. Деревья в целом в лесном массиве расположены неравномерно, но всегда можно выделить участки

(выделы, лесосеки), внутри которых их распределение можно считать относительно равномерным. Грузо- и пассажиропотоки имеют значительно большую плотность распределения, поэтому их условно можно считать сосредоточенными в населенных пунктах (НП) и пунктах примыкания (НС).

Элементарные потоки  $q_x$ ,  $q_г$  и  $q_п$  в таких узлах ЛТС, как лесопогрузочные пункты, населенные пункты и другие, накапливаются в виде транспортных потоков древесного сырья  $Q_d$ , нелесных грузов  $Q_г$  и пассажиров  $Q_п$ .

**Потребители** – пункты, где транспортные потоки подвергаются конечной обработке (переработке), перегрузке или формированию для отправления. Потребителями являются базисные выходные элементы ЛТС: для потоков древесного сырья  $Q_d$  – НС, а для грузопотоков  $Q_г$  – НП и пассажиропотоков  $Q_п$  – НП.

**Узлы сбора**, в которых производится накопление элементарных потоков для дальнейшего перемещения или обработки. Для потоков древесины  $Q_d$  такими узлами являются лесопогрузочные пункты (ЛПП). Для транспортных потоков  $Q_г$  и  $Q_п$  – НП.

**Транспортные связи**, обеспечивающие перемещение потоков из узлов сбора к потребителям (пунктам выхода из ЛТС) потоков. Ими являются базисные промежуточные элементы ЛТС, такие, как трелевочные волоки, лесные и внутрихозяйственные дороги.

Приняв за основу иерархическую модель ЛТС, рассмотрим процесс формирования транспортных потоков. С точки зрения наблюдателя на низшем ( $k = 3$ ) уровне представлены пространственно распределенные единичные транспортные потоки  $q_x$ ,  $q_г$  и  $q_п$ . На лесопогрузочных пунктах фрагментов ЛТС  $P_{лп}$  (подсистем второго ранга) происходит сосредоточение элементарных транспортных потоков древесного сырья  $Q_d$ . Источниками формирования потоков народнохозяйственных грузов  $Q_г$  и пассажиров  $Q_п$  являются такие подсистемы первого ранга, как НС и НП. На высшем уровне центры кварталов лесных массивов можно считать узлами сбора транспортных потоков  $Q_d$ .

*Ситуационная модель формирования элементарных транспортных потоков* позволяет определить величину объема древесины, сосредоточенного в  $i$ -м лесопогрузочном пункте, по математическому выражению

$$q_i = \gamma X_{л} Y_{л} I_p / 10^4, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – ликвидный запас древесины на 1 га,  $m^3$ ;  $X_{л}$ ,  $Y_{л}$  – длина и ширина лесосеки, м;  $I_p$  – интенсивность рубки по запасу, %, или  $m^3/га$ ,

*Ситуационная модель формирования транспортных потоков  $M_{ТП}$*  реализует гравитационные методы расчета и моделирования транспортных потоков [6, 7]. Данные методы

просты в употреблении и без сложных наблюдений позволяют определить транспортный поток, формируемый в  $k$ -м НП (или НС) и по назначению состоящий из потоков трех категорий:

$$q_k = q_k^{\text{рп}} + q_k^{\text{н}} + q_k^{\text{п}}, \quad (2)$$

где  $q_k^{\text{рп}}$  – поток грузов, являющийся сырьем, материалами и оборудованием для ЛПП;  $q_k^{\text{н}}$  – грузы, необходимые для удовлетворения потребностей населения;  $q_k^{\text{п}}$  – величина пассажиропотока.

Величину потока грузов  $q_k^{\text{рп}}$  представляется возможным определить по формуле [8]

$$, j = 1, 2, \dots, p, \quad (3)$$

где  $P_k, P_j$  – экономический потенциал НП или объем производимой продукции, перевозимой между корреспондирующими пунктами  $k$  и  $j$ , млн. руб;  $\eta^{\text{рп}}$  – показатель уровня экономического развития района;  $\eta^{\text{п}}$  – коэффициент, позволяющий выразить величину потока в тоннах, млн. руб/т;  $l_{kj}$  – расстояние между пунктами  $k$  и  $j$ ;  $p$  – число НП, экономически связанных с  $k$ -м пунктом.

В работе величина грузопотока  $q_k$  определена в долях  $K_r$  от величины  $q_k^{\text{рп}}$  по формуле

$$q_k^{\text{н}} = K_r q_k^{\text{рп}}. \quad (4)$$

Вопросы количественного определения пассажиропотоков, изучения их структуры и сезонной неравномерности освещены в исследованиях [8, 9]. В данных работах доказано, что на величину пассажиропотока между НП  $k$  и  $j$  влияет число жителей в них и расстояние между пунктами, а также степень заселенности территории лесных массивов:

$$, j = 1, 2, \dots, p. \quad (5)$$

Здесь  $H_k, H_j$  – соответственно число жителей в НП  $k$  и  $j$ , тыс. чел.;  $f^{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий транспортную подвижность населения.

Коэффициенты  $\eta^{\text{рп}}, f^{\text{п}}$  и  $K_r$  разработаны ИКТП и другими НИИ дифференцированно по экономическим регионам, отраслям народного хозяйства и приведены в работах [9, 10, 11].

**Модель поиска оптимальных параметров лесотранспортных сетей для размещения в лесном массиве  $M_{\text{ЛТС}}$ .** Лесные дороги в предприятиях лесного хозяйства должны иметь разветвленную сеть постоянно действующих дорог различного назначения, обеспечивающих нормальную работу современных транспортных средств [12].

При этом лесотранспортная сеть в лесах

республики должна проектироваться с учетом комплексного ее использования для нужд лесного хозяйства и лесозаготовки, а протяженность и стоимость ее строительства должны быть оптимальными.

Транспортное освоение территории лесного фонда производится по схемам, разработанным в соответствии с развитием лесохозяйственного производства, которые подтверждают экономическую целесообразность их проектирования и строительства [12].

Работы, выполненные по проектированию схем транспортного освоения лесосырьевых баз, показывают, что большое количество исследований ученых в этом направлении не привело к созданию единой и приемлемой теории транспортного освоения лесных массивов. Объяснение этому, очевидно, следует искать в большой сложности рассматриваемой проблемы.

Поэтому проектирование таких сетей должно быть решением комплексной проблемы с одновременным определением не только оптимальной конфигурации  $K_{\text{ЛТС}}$ , но ее структуры:

- определение оптимальной конфигурации  $K_{\text{ЛТС}}$  лесотранспортной сети без учета ее оптимальной структуры  $S_{\text{ЛТС}}$ , и наоборот, нельзя признать приемлемым решением;

- при проектировании лесотранспортных сетей до настоящего времени в основном решались отдельные (локальные) задачи без учета их взаимосвязей и многих влияющих факторов.

*Конфигурацией  $K_{\text{ЛТС}}$*  мы будем называть показатель для оценки пространственного расположения лесотранспортных путей и траекторий перемещения транспортных потоков древесного сырья и нелесных грузов.

*Структура  $S_{\text{ЛТС}}$*  – совокупность путей различных категорий на всех участках сети и типов транспортных узлов.

Дополнительными параметрами для ЛТС являются: количество центров формирования транспортных потоков  $N_i$ , развилок путей  $N_s$  и пунктов примыкания  $N_v$ , расположение пунктов примыкания в лесном массиве и специализация сети.

**Постановка задачи.** При проектировании сети автомобильных дорог общего пользования проф. Хомяк Я. В. использовал алгоритм Прима [8] с последующей оптимизацией фрагментов геометрическим методом. Алгоритм Прима позволяет относительно легко находить кратчайшую связывающую сеть на заданном множестве точек.

Поэтому проектирование оптимальной по конфигурации и структуре реальной ЛТС будет связан с решением двух математических задач:

- 1) поиском кратчайшей связывающей сети (КСС – алгоритм Прима);
- 2) поиском локально-оптимальной ЛТС путем добавления развилок путей и определе-

нием их координат.

Выполним формальное описание задачи. Пусть в некоторой ограниченной области на плоскости заданы:

1) конечное множество грузообразующих вершин  $X_i \subset \{X_i, x, y, q_i\}$ , включающее  $N_i$  центров  $x_i$  запасов древесины, нелесных грузов и пассажиропотоков;

2) конечное множество корневых вершин  $X_v \subset \{X_v, x, y, Q_v\}$ ; содержащее  $N_v$  пунктов примыкания  $X_v$  лесной дороги.

Каждая  $x_i$  вершина сети обладает мощностью, равной объему  $q_i$  сосредоточенного на ней древесного сырья, а мощность  $x_k$  вершины – объему  $q_k$  транспортного потока. В  $x_v$  вершине расположен пункт примыкания (сток для сети), принимающий транспортный поток в объеме  $Q_v$ , равном годовому объему производства нижнего лесосклада.

Чтобы получить представление о трудностях, возникающих при составлении математической модели, отметим две особенности, связанные с проектированием локально-оптимальной ЛТС.

*Первая особенность* – лесотранспортная сеть представляет собой структурное дерево в виде графа  $G_{ЛТС}$  с корневыми вершинами  $X_v$ . Данный граф формируется путем введения в КСС нового подмножества развилок путей  $X_s \{x_s, x, y\}$  с нулевыми запасами транспортных потоков ( $Q_s = 0$ ) в них. При этом,  $r$ -й ярус графа  $G_{ЛТС}$  состоит из всех ребер  $l'_{ij}$ , имеющих  $q^r$  расчетный грузооборот.

*Вторая особенность.* Простое соединение вершины  $x_i, x_j$ , транспортной связью  $l'_{ij}$  не позволяет оценить стоимость пути  $C_{ij}$ , т. к. неизвестны категория  $r$  и пропускная способность  $q_{ij}$  пути.

Поэтому предполагается следующий подход для решения задачи (рис. 2):

1-й этап – построить КСС с использованием алгоритма Прима [13] в виде графа  $G_{ЛТС}$ ;

2-й этап – при известных конфигурации  $K_{ЛТС}$ , графа  $G_{ЛТС}$  и стоимости единицы длины путей  $C^r_{ij}$  вести поиск минимального «многоярусного дерева Штейнера» (МДШ) путем оптимального размещения развилок путей  $X_s$ . Этим обеспечивается нахождение ЛТС с локально-оптимальными параметрами и получение эскиза в виде графа  $G_{ЛТС}$ , близкого к оптимальному  $G_{ЛТС}^{opt}$ .

Целевая функция – минимум затрат на транспортное освоение лесных массивов:

(6)

Также необходимо отметить следующие особенности.

1. Дополнительные вершины  $X_s$  используются только в качестве транзитных, в них отсутствует запасы древесины.



Рис. 2. Построение локально-оптимальной ЛТС

2. В зависимости от интенсивности потока  $q^r_{ij}$  на путях  $(i, j)$  приведенные затраты  $C^r_{ij}$  принимают различные величины.

Величина приведенных затрат  $C^r_{ij}$  нелинейна и зависит от величины грузопотока  $q^r_{ij}$  на пути  $(i, j)$ , который, в свою очередь, определяется длиной  $l^r_{ij}$ . Значения  $C^r_{ij}$  и  $l^r_{ij}$  рассчитываются по следующим формулам [13]:

; (7)

$$C^r_{ij} = \frac{E_n^r \cdot K_{ij}^r + \frac{E_n^r \cdot I_{ij}}{l_{ij}^r}}{q_{ij}^r + T_{ij}^r}, \quad (8)$$

где  $q^r_{ij}$  – объем перевозки грузов из  $i$ -й вершины в  $j$ -ю,  $m^3$ ;  $\alpha^r_{ij}$  – коэффициент развития транспортного пути  $(i, j)$ ;  $E_n$  – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений; – стоимость строительства 1 км пути  $r$ -й категории на участке  $(i, j)$ , млн. руб/км;  $T^r_{ij}$  – текущие транспортные затраты

на единицу длины пути  $(i, j)$ , млн. руб/м<sup>3</sup>км;  $I_{ij}$  – стоимость искусственного сооружения на пути  $(i, j)$ , млн. руб;  $x, y$  – координаты исходных вершин сети.

**Заключение.** В результате построения многоуровневой системы математических моделей лесотранспортной сети можно выделить основные модели оптимизации.

1. Определение однородных лесоэксплуатационных районов в лесном массиве  $M_{лр}$ .

2. Формирование транспортных потоков  $M_{тп}$ .

3. Оптимизация параметров ЛТС для размещения в лесном массиве  $M_{лтс}$ .

Разработанные математические модели позволяют учесть и оценить влияние на оптимальную конфигурацию  $K_{лтс}$  и структуру  $S_{лтс}$  лесотранспортной сети  $G_{лтс}$  следующих факторов:

- размера и очертания лесосырьевой базы;
- распределения ликвидных запасов древесины по лесосырьевой базе;
- наличия существующих транспортных путей;

- местоположения нижнего склада;
- рельефа местности;
- гидрологических условий;
- расположения карьеров, и т.д.

При этом необходимо соблюдать следующие рекомендации.

1. Размещать лесные дороги следует с учетом особенностей ведения лесного хозяйства, продолжительности цикла лесохозяйственного производства, распределения объемов работ по территории лесного фонда, многократного возвращения в одни и те же участки леса в течение длительного периода, а также проведения ряда работ в определенные агротехнические сроки.

2. Лесные дороги, по которым в расчетный период или в перспективе будут производиться перевозки древесины в хлыстах, должны быть проложены в обход населенных пунктов. Если по технико-экономическим расчетам установлена целесообразность проложения указанных дорог через населенные пункты, необходимо обеспечить безопасность движения местного транспорта и пешеходов, а также съезды на пересекаемые улицы.

3. Расчет густоты транспортной сети необходимо вести с учетом объема перевозок, стоимости строительства разных типов дорог, типа подвижного состава, себестоимости перевозок и доставки груза из леса к дорогам и др.

4. Главное направление магистрали лесных дорог должно быть размещено по линии, делящей зону тяготения примерно на две равные части, а сеть лесохозяйственных дорог должна по возможности совмещать с направлениями квартальных просек с углом

примыкания их к магистрали, равным 45–60°, при условии, что стоимость строительства не повлияет на технико-экономические показатели работы транспорта.

## Литература

1. Программа развития лесного хозяйства на 2007–2011 годы / РУП «Белгипролес». – Минск, 2007. – 86 с.

2. Капыш, Ю. Ф. Размещение и оптимизация лесотранспортных систем на основе ГИС с учетом их развития / Ю. Ф. Капыш // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2007. – Вып. XV. – С. 96–99.

3. Цветков, В. Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В. Д. Цветков. – М.: Наука и техника, 1979. – 260 с.

4. Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях / М. И. Нечепуренко [и др.]. – Новосибирск: Сиб. отделение, 1990. – 515 с.

5. Использование природных индикаторов при дорожном строительстве и гидромелиорации / К. Я. Казаков, В. Н. Кирышкин. – Л.: ЛенНИИЛХ, 1979. – 71 с.

6. Стенбринк, П. Оптимизация транспортных сетей: пер. с англ. / П. Стенбринк; под ред. В. К. Лившица. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.

7. Левит, Б. Ю., Лившиц, В. К. Нелинейные транспортные задачи / Б. Ю. Левит, В. К. Лившиц. – М.: Транспорт, 1972. – 143 с.

8. Хомяк, Я. В. Проектирование сетей автомобильных дорог / Я. В. Хомяк. – М.: Транспорт, 1983. – 206 с.

9. Правдин, Н. В. Прогнозирование пассажирских потоков (методика, расчеты, примеры) / Н. В. Правдин, В. Я. Негрей. – М.: Транспорт, 1980. – 222 с.

10. Кучинский, В. И. Экономико-математическая модель нормативной схемы размещения сети автомобильных дорог: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 08.00.13 / В. И. Кучинский; – Киров, 1978. – 20 с.

11. Моделирование пассажиропотоков в транспортной системе (Оценка вариантов развития транспортной системы и анализ чувствительности): пер. с англ. / П. У. Бонсалл. – М.: Транспорт, 1982. – 207 с.

12. Устойчивое лесопользование и лесопользование. Требования к лесным автомобильным дорогам: СТБ 1627-2006. – Введ. 01.11.2006. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2006. – 20 с.

13. Разнов, Л. М. Экономическое обоснование перспективных схем сети автомобильных дорог / Л. М. Разнов. – М.: Высшая школа, 1980. – 87 с.