

## СТРУКТУРИЗАЦИЯ ПОГРУЗОЧНЫХ ПУНКТОВ И МАГИСТРАЛЬНЫХ ВОЛОКОВ ПРИ ПОКВАРТАЛЬНОМ ОСВОЕНИИ УЧАСТКОВ ЛЕСНОГО ФОНДА

Рукомойников К.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола, Россия (424000, Респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д.3), e-mail:RukomojnikovKP@volgatech.net

В статье предложена методика выбора рациональной схемы транспортного освоения лесных участков, отличающаяся комплексным учетом процесса трелевки с нескольких разрозненных лесосек в границах лесного квартала в условиях существующей сети лесовозных дорог. В расчетах использованы методы теории графов решения поставленной задачи. Предложенная методика позволяет осуществить поиск рационального варианта размещения магистральных волоков в лесном квартале, сократить затраты на обустройство погрузочных пунктов, прокладку транспортных путей и трелевку по ним лесоматериалов. Результаты расчетов доказали возможность снижения материальных затрат на обустройство погрузочных пунктов, прокладку транспортных путей и трелевку лесоматериалов на величину до 18%. При этом расчетный экономический эффект использования алгоритма составил 26 руб./м<sup>3</sup>. Предложенная методика рекомендуется для малообъемных лесозаготовительных предприятий, арендующих участки в ограниченно эксплуатационных лесных районах.

Ключевые слова: лесной квартал, алгоритм, лесозаготовка, трелевка, технологическая схема, трелевочный волок, лесосека, погрузочный пункт, теория графов

## STRUCTURING OF LOADING POINTS AND MAIN SKID ROAD IN THE FOREST COMPARTMENT

Rukomojnikov K.P.<sup>1</sup>

*Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia (424000, Yoshkar-Ola, Lenin Square, 3), e-mail: RukomojnikovKP@volgatech.net*

Methodology for the selection of a rational road pattern of forest areas proposed. Algorithmic graph theory used in the calculations in solving the problem. The method is characterized by complex analysis of the process of logging from multiple disparate cutting areas within the boundaries of the forest compartment with existing network of forest roads. The proposed technique allows to search for a rational variant organize main skid road in the forest compartment, cut the cost of equipping loading points, laying transport routes and skidding timber on them. The calculation results have shown the possibility of reducing material costs for the resettlement of loading points, gasket transport routes and skidding timber by up to 18%. In this case, the estimated economic impact of using the algorithm is 26 rubles per cubic meter. The proposed method is recommended for low-volume logging companies who rent plots in limited operational forest areas.

Keywords: forest compartment, algorithm, harvesting, skidding, flow sheet, logway, cutting area, loading point, graph theory.

В настоящее время существуют эффективные методики выбора трасс трелевочных волоков лесосек [3], рассмотрены вопросы их компьютерного проектирования [4], проведены исследования, посвященные моделированию размещения погрузочных пунктов и сети волоков на лесосеке с использованием лингвистических переменных в качестве структур для моделирования [5] и покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом [1, 2] из условия минимизации повреждения грунта. Исследования [7, 8] предусматривают эффективный анализ выбора функционального назначения транспортных путей.

В то же время в отмеченных научных работах уделено недостаточное внимание одно-временному, комплексному учету всего разнообразия возможных вариантов размещения магистральных волоков и погрузочных пунктов на лесной территории по критерию минимизации

ции затрат на освоение лесного квартала, что особенно актуально в условиях поквартального освоения участков лесного фонда [6, 9, 10].

**Цель исследования:** сокращение затрат на обустройство погрузочных пунктов, прокладку магистральных волоков и трелевку лесоматериалов в границах лесного квартала в условиях существующей сети лесовозных дорог.

**Материал и методы исследования.** При анализе вариантов поквартального освоения участков лесного фонда существует возможность наглядного изображения лесного квартала и находящихся на его территории делянок в виде схемы, представляющей собой связи между определенными парами вершин, характеризующими основные элементы анализируемой ситуации, соединенными посредством ребер. В качестве таких вершин могут быть приняты различные варианты размещения погрузочных пунктов и участков лесосек, а в качестве ребер использованы возможные варианты соединяющей их сети транспортных путей (поквартальных просек, лесовозных дорог, технологических коридоров, магистральных и пасечных волоков). Подобное представление лесного квартала является эффективным инструментом для формулировки и решения задач его обустройства и размещения на его территории основных технологических элементов для выполнения всего комплекса лесосечных работ.

Пример постановки задачи структуризации погрузочных пунктов и магистральных волоков в пределах лесного квартала приведен на рисунке 1, где показана схема с вариантами размещения погрузочных пунктов и транспортных путей. Число анализируемых элементов может быть различно и проектируется в зависимости от условий местности: рельефа, почвенно-грунтовых условий, территориального размещения выделов, требующих на разных этапах своего развития различных мероприятий, класса возраста и состояния древостоя, наличия заболоченных участков, прогалин и т. д. Для получения результатов, более точно отражающих реальную ситуацию, при построении технологической карты лесного квартала с указанием расположенных на его территории участков может быть допущена дополнительная детализация их геометрических характеристик, связанная с разделением всех или части крупных лесосек вытянутой формы на ряд небольших участков, характеризующихся своими «центрами тяжести» выполняемых работ. На представленном рисунке подобная детализация и предпринята для разделения на участки двух выделов, в результате которой получены участки лесосек с центрами тяжести, обозначенными номерами 4, 5 и 7, 8, 9.

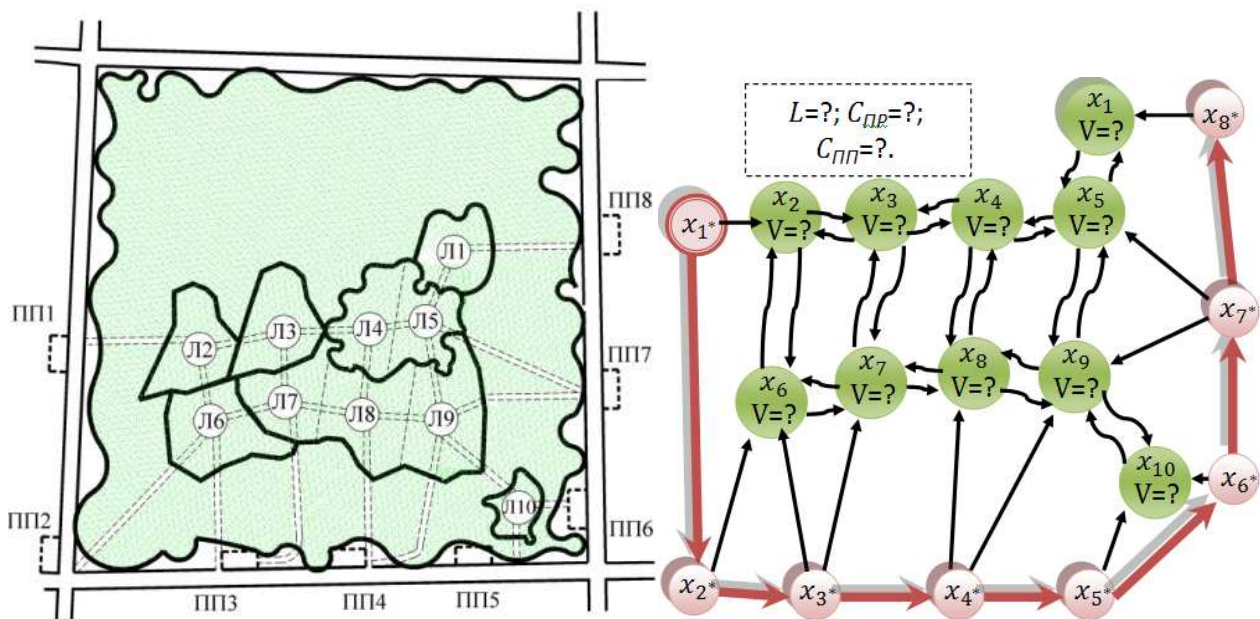


Рис. 1. Постановка задачи выбора схемы размещения транспортных путей в лесном квартале

Для построения графа введем обозначения наиболее вероятных мест размещения погрузочных пунктов (ПП1, ПП2, ..., ПП $i^*$ , ...ПП $k$ ) и, обозначив центры тяжести каждого участка лесосеки (Л1, Л2, ..., Л $i$ , ...Л $n$ ), соединим их ребрами на графе в соответствии с наиболее вероятными направлениями трелевки древесины.

Очевидно, что при увеличении числа возможных вариантов размещения погрузочных пунктов и числа разрабатываемых лесосек (делянок) на территории лесного квартала, а также в зависимости от уровня детализации принятых при построении схемы транспортных путей на его территории число вариантов остовов графов растет в геометрической прогрессии.

Постановка задачи предполагает:

- анализ затрат на обустройство погрузочных пунктов  $C_{ППi^*}$ ;
- определение возможных расстояний трелевки с учетом длин анализируемых транспортных путей предварительной транспортной сети;
- обоснование возможных затрат на прокладку 1 п. м каждого трелевочного волокна  $C_{ПР}$  в зависимости от природных условий лесных участков, через которые они будут проложены;
- определение стоимости машиносмены  $C_T$  при трелевке древесины.

Линиям, ведущим от места предполагаемого расположения погрузочного пункта к участку лесосеки, присваивается значение  $C_{ППi^*}$ , равное значению стоимости подготовки погрузочного пункта, необходимого для использования данного направления. Линиям, соединяющим погрузочные пункты между собой, а также соединяющим между собой участки лесосек, присваивается значение  $C_{ПП} = 0$ , свидетельствующее о том, что использование данных транспортных путей не вызывает необходимости обустройства погрузочного пункта.

Использование данного показателя позволит сократить число погрузочных пунктов, поскольку становится очевидным, что внедрение в граф нового магистрального волокна предусматривает дополнительные материальные затраты на обустройство примыкающего погрузочного пункта. Все вершины, характеризующие погрузочные пункты, должны быть связаны между собой ребрами, соответствующими поквартальным просекам, но не образовывать замкнутого цикла.

Анализируя существующие алгоритмы поиска кратчайшего каркаса графа, можно отметить, что наиболее известные в настоящее время алгоритмы Краскала, Прима, Соллина, Тарьяна—Черитона не могут быть применены в данной ситуации ввиду того, что в этом случае мы имеем дело с ориентированным графом, предусматривающим трелевку лишь в направлении к погрузочным пунктам. В то же время алгоритм Эдмондса, дающий возможность поиска минимального по весу оркаркаса и предусматривающий просмотр вершин графа в произвольном порядке, также не может быть использован в данной ситуации, поскольку весовые характеристики дуг, входящих в орграф, изменяются в зависимости от перечня дуг, вошедших в оркаркас и соединяющих анализируемую вершину с его корнем.

Предлагаемый алгоритм решения задачи выбора схемы размещения транспортных путей в лесном квартале относится к жадным алгоритмам и позволяет осуществить выбор кратчайшего оркаркаса при решении частной задачи выбора схемы размещения транспортных путей в лесном квартале посредством разрастания одного поддерева графа (обозначим его  $T_g$ ), содержащего больше одной вершины.

На практике ведения лесосечных работ в квартале отчетливо видно, что расстояние трелевки и затраты на трелевку с каждого нового анализируемого участка должны учитывать удаленность от погрузочного пункта предыдущего участка, через территорию которого проложен волок. Таким образом, особенностью задачи размещения транспортных путей в лесном квартале является то, что вес каждой присоединяемой к поддереву дуги не может быть известен на начальной стадии проектирования, а зависит от состава дуг, включенных в поддерево на предыдущих этапах анализа. Алгоритм предусматривает последовательное частичное увеличение веса каждой следующей присоединяемой к поддереву графа дуги за счет веса всех или части дуг, присоединенных к нему ранее.

Для реализации предлагаемого алгоритма вершины графа пронумерованы так, чтобы вершина  $x_1^*$ , соответствующая корню оркаркаса, получила номер  $x_1^*$ . Принимаем  $x_1^* \in T_g$ .

Затраты на прокладку магистрального волокна, обустройство погрузочного пункта и трелевку лесоматериалов с анализируемого участка лесного фонда  $x_i$  на погрузочный пункт  $x_i^*$  можно найти по формуле:

$$C_{bij} = L_{ij} \cdot C_{пфиij} + C_{ппиij} + \frac{C_T \cdot V_j \cdot \left( T + \frac{2 \cdot L_{i^*j}}{\vartheta_{i^*j}} \right)}{3600 \cdot M \cdot m \cdot \varphi},$$

где  $L_{ij}$  — расстояние между смежными участками лесного фонда  $x_i$  и  $x_j$ , между которыми анализируется возможность прокладки магистрального волока, м;  $C_{пфиij}$  — стоимость прокладки магистрального волока, связывающего между собой анализируемую вершину (участок лесосеки) с предыдущей вершиной (участком лесосеки), руб.;  $C_{ппиij}$  — стоимость обустройства погрузочного пункта для трелевки лесоматериалов с участка  $x_j$ , руб. (указывается в тех случаях, когда анализируемый магистральный волок (ребро) примыкает непосредственно к погрузочному пункту (вершине  $x_{i^*}$ );  $C_T$  — стоимость машиносмены при трелевке, руб./смена;  $V_j$  — вырубаемый запас на анализируемом участке лесной площади, м<sup>3</sup>;  $T$  — трудозатраты при сборе и разгрузке пачки лесоматериалов, с;  $L_{i^*j}$  — расстояние между погрузочным пунктом  $x_{i^*}$  и анализируемым участком лесного фонда  $x_j$ , м;  $\vartheta_{i^*j}$  — средняя скорость движения машины, задействованной на трелевке, при движении в холостом и грузовом направлениях на участке между погрузочным пунктом  $x_{i^*}$  и анализируемым участком лесного фонда  $x_j$ , м/с;  $M$  — средний объем трелеваемой пачки лесоматериалов, м<sup>3</sup>;  $m$  — время смены, ч;  $\varphi$  — коэффициент использования времени смены.

Каждой вершине, последовательно включаемой в поддерево  $T_{\mathcal{S}}$ , присваивается пометка  $[\mathcal{S}_i; C_{bij}]$ . В данной пометке  $\mathcal{S}_i$  есть вершина поддерева  $T_{\mathcal{S}}$  ближайшая к вершине  $x_j$ , присоединяемой к поддереву, а  $C_{bij}$  — вес присоединяемой дуги графа, лежащей между вершинами  $(\mathcal{S}_{ij}; x_j)$ .

При наличии существующих лесовозных дорог вершины, обозначающие погрузочные пункты, соединяются между собой ребрами уже на первом этапе функционирования алгоритма. Получим:

$$T_{\mathcal{S}} = x_{i^*}, x_{i^*+1}, \dots, x_{k^*};$$

$$A_{\mathcal{S}} = \{(x_{i^*}, x_{i^*+1}), (x_{i^*+1}, x_{i^*+2}), \dots, (x_{k^*-1}, x_{k^*})\}.$$

В ходе дальнейшего анализа поддерево графа постепенно разрастается за счет присоединения ребер  $(x_i(x_{i^*}); x_j)$ , где  $x_i(x_{i^*}) \in T_{\mathcal{S}}$ .

При каждой новой итерации одна из вершин графа  $x_j \notin T_{\mathcal{S}}$  присоединяется к поддереву  $T_{\mathcal{S}}$  посредством добавления дуги  $(\mathcal{S}_{ij}; x_j)$ , либо, во избежание образования циклов, происходит обновление поддерева путем замены одной из входящих в него дуг на дугу с более низким весом. Добавленная дуга должна иметь минимальный вес  $C_{bij}$  из всех примыкающих

к поддереву  $T_s$  дуг. При добавлении к поддереву  $T_s$  новой вершины возникает необходимость пересмотра пометок  $[S_i; C_{bij}]$  у всех вершин, примыкающих к последней присоединенной к поддереву вершине. При этом анализируются как примыкающие вершины, принадлежащие поддереву  $T_s (x_j \in T_s)$ , так и вершины, не принадлежащие ему ( $x_j \notin T_s$ ).

Если в результате анализа получен цикл с существующими дугами поддерева, т.е. выявлена вершина  $x_j \in T_s$ , вес которой может быть уменьшен в результате последующей итерации, то из поддерева следует удалить дугу, которая входила в узел на предыдущей итерации. Происходит разрыв орцепи, и все вершины, соединенные ранее с вершиной  $x_j \in T_s$  посредством исходящих из нее дуг, исключаются из поддерева  $T_s$  и теряют свои пометки.

Анализ продолжается до тех пор, пока каждая из вершин графа не получит пометку, вес которой будет соответствовать минимальному значению веса из всех соответствующих показателей входящих в нее дуг, а число ребер в поддереве  $T_s$  не станет равным  $k + n - 1$  (где  $n$  – общее число лесных участков,  $k$  – общее число погрузочных пунктов).

Полученное дерево можно будет принять в качестве кратчайшего оркаркаса графа, а, следовательно, и в качестве рационального варианта размещения сети трелевочных путей в анализируемом квартале.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Результаты выполненных расчетов с использованием предложенного алгоритмического подхода обоснования методики размещения транспортных путей в лесном квартале доказали возможность снижения материальных затрат на обустройство погрузочных пунктов, прокладку транспортных путей и трелевку лесоматериалов на величину до 18%. При этом расчетный экономический эффект использования алгоритма составил 26 руб./м<sup>3</sup>.

**Выводы.** Предложенная методика позволяет получить рациональный вариант размещения магистральных волоков при поквартальном освоении участков лесного фонда, сократить затраты на обустройство погрузочных пунктов, прокладку транспортных путей и трелевку по ним лесоматериалов.

### Список литературы

1. Воронов Р.В., Воронов Р.В., Пискунов М.А. Задача покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом и ее приложение для оптимального проектирования схем волоков на лесосеках // Информатика и системы управления. — № 1, 2012. С. 56–64.

2. Воронова А.М., Воронов Р.В., Пискунов М.А., Щеглова Л.В. Алгоритм оптимального размещения волоков из условия минимизации повреждения грунта // Тракторы и сельхозмашины. — № 9. 2013. С. 33–35.
3. Кончев А.М., Юшков А.Н. Методология выбора трелевочных волоков лесосеки // Лесной журнал. — № 3, 2013. С. 65–70.
4. Макаренко А.В. Программное проектирование трелевочных волоков на лесосеке // Лесной вестник. – № 1(93), 2013. С. 99–104.
5. Пискунов М.В. Алгоритм построения оптимальной сети лесных дорог // Лесной журнал - № 3, 2011. С. 58–63.
6. Рукомойников К.П. Графоаналитический подход к обоснованию целесообразности размещения лесовозного уса на территории лесного квартала // Современные проблемы науки и образования. — № 6, 2014; URL: [www.science-education.ru/120-16418](http://www.science-education.ru/120-16418) (дата обращения: 27.01.2015).
7. Скрыпник В.И., Кузнецов А.В., Ратманова Ю.А. Способы минимизации затрат на первичный транспорт леса // Ученые записки Петрозаводского государственного университета – №4, 2012. С. 98–101.
8. Шегельман И.Р., Кузнецов А.В., Скрыпник В.И., Баклагин В.Н. Методика оптимизации транспортно-технологического освоения лесосырьевой базы с минимизацией затрат на заготовку и вывозку древесины // Инженерный вестник Дона. — № 4-2(23), 2012. С. 35.
9. Ширнин Ю.А., Царев Е.М., Крицкая Н.А., Рукомойников К.П. Способ освоения участков лесного фонда // Патент России № 2175830.2001. Бюл. № 32.
10. Ширнин Ю.А., Царев Е.М., Рукомойников К.П. Способ освоения участков лесного фонда // Патент России № 2234832.2004. Бюл. № 24.

**Рецензенты:**

Войтко П.Ф., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола;

Царев Е.М., д.т.н., доцент ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола.