

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЛЕСОВОЗНОГО УСА НА ТЕРРИТОРИИ ЛЕСНОГО КВАРТАЛА

Рукомойников К.П.¹

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

В статье предложены математическая модель и методика, позволяющие осуществить выбор рациональной схемы транспортно-технологического освоения лесного квартала с учетом сокращения затрат при выполнении комплекса операций подготовительных и основных работ по освоению разрозненных лесосек и отличающиеся возможностью комплексного решения задач выполнения основных переместительных операций трелевки и вывозки древесины с анализом размещения на территории лесного квартала, помимо ограничивающих его периметр квартальных просек, дополнительных временных лесовозных усов. Обоснование путей с минимальными затратами на прокладку волоков и трелевку лесоматериалов между всеми парами анализируемых участков на территории лесного квартала, базируется на последовательности из k преобразований первоначальной матрицы и делении основной задачи на подзадачи меньшего размера, что позволяет исключить повторный учет затрат на прокладку магистральных волоков при анализе сети трелевочных путей, соединяющих лесосеки с погрузочными пунктами при поквартальном освоении участков лесного фонда.

Ключевые слова: лесной квартал, лесозаготовка, трелевка, вывозка лесоматериалов, погрузочный пункт, теория графов, лесовозный ус.

GRAPHIC-ANALYTICAL APPROACH TO RATIONALE OF PLACING SECONDARY ROAD ON TERRITORY OF FOREST COMPARTMENT

Rukomojnikov K.P.¹

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

The paper suggests a mathematical model and method for selecting a rational scheme of transportation and technological development of the forest compartment with the cost reduction in the performance of complex operations basic and preparatory works during the harvesting on territorially disparate cutting areas and capabilities of solving of complex problems of the transport operations of skidding and hauling with the analysis of accommodation within forest compartment additional temporary secondary road. Justification paths with minimal material costs for accommodation of skid roads and skidding between all pairs of analyzed sites on the territory of forest compartment based on a sequence of k transformation of the original matrix and the division of the main tasks into subtasks smaller, eliminating re-registration costs of the main skid road for network in the analysis of skidding roads, connecting the cutting area with the loading points on territory of forest compartment.

Keywords: forest compartment, logging, skidding, haulage, loading point, graph theory, secondary road.

Проблеме повышения эффективности функционирования первичной лесотранспортной сети лесных предприятий уделено внимание в исследованиях ученых ПетрГУ [8, 9, 10], ВГЛТА, СПБЛТА, МГУЛ, ЦНИИМЭ, ГНЦ ЛПК [1, 2], ПГТУ [3, 4, 5] и др.

Задачи обоснования целесообразности строительства временных лесовозных усов при освоении небольших лесосек анализировались в работах [1, 7]. В работе [6] предложены зависимости для составления программы определения критического значения объема вывозки леса с лесосеки, при котором целесообразно размещение временного лесовозного уса, прилегающего непосредственно к лесосеке, построены номограммы для упрощения расчетов в реальных производственных условиях. Даны рекомендации к осуществлению трелевки ле-

соматериалов тракторами^к по магистральным волокам за пределы лесосеки к погрузочному пункту, примыкающему к лесовозной дороге или поквартальной просеке на границе лесного квартала, в случае если планируемый объем вывозки леса меньше обоснованного критического значения.

Однако данные исследования не предполагают эффективного анализа возможности размещения временных лесовозных дорог в пределах квартала при наличии и совместном учете возможности трелевки лесоматериалов к ограничивающим периметр лесного квартала квартальным просекам в условиях хорошо развитой, действующей квартальной сети на арендуемой площади и одновременном освоении нескольких, расположенных на территории квартала лесных участков с различными объемами лесозаготовительных работ на их территории.

Цель исследования. Обоснование рациональной технологической схемы размещения временных лесовозных усов и сети погрузочных пунктов при поквартальном освоении участков лесного фонда с учетом ограничивающих периметр лесного квартала действующих квартальных просек.

Материал и методы исследования. Предлагаемая методика основана на реализации метода решения задачи о р-медиане в терминах целочисленного программирования. Последовательность расчетов предусматривает сопоставление анализируемых участков с вершинами графа. При этом количество вершин графа зависит от числа разрабатываемых лесосек и может быть увеличено в зависимости от природных условий и необходимой степени детализации результатов расчета путем разделения крупных лесосек на части и отображения их на графе в качестве его новых вершин. Одновременно с вершинами графа, характеризующими разрабатываемые лесосеки в пределах лесного квартала, на графе отмечаются вершины, характеризующие возможные места размещения погрузочных пунктов вблизи, ограничивающих квартал поквартальных просек. В качестве ребер графа отмечаются возможные варианты прокладки магистральных волоков на его территории, фиксируются их длины и прогнозируемые затраты на их размещение.

Вершины полученного графа нумеруются в следующей последовательности: первоначально нумеруются вершины графа, соответствующие участкам, отмеченным вблизи поквартальных просек, а затем все анализируемые лесосеки на территории квартала.

Прогнозируются затраты на обустройство погрузочных пунктов на каждом из анализируемых участков. Если же в виду каких либо причин размещение погрузочного пункта на территории лесосеки невозможно, то затраты на его обустройство приравниваются к $+\infty$. Прогнозируются объемы заготавливаемой древесины на каждой из лесосек.

Примем $[\xi_{ij}]$ – матрицей распределения, в которой

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если участок (лесосека) с центром тяжести } x_j \\ & \text{соединена магистральным волоком с участком } x_i; \\ 0, & \text{в противоположном случае.} \end{cases}$$

Примем $\xi_{ii} = 1$, если вершина x_i является медианной вершиной (т.е. на данном участке лесного квартала расположен погрузочный пункт и есть подъездные пути, обеспечивающие возможность вывозки древесины с использованием лесовозного автотранспорта на лесопромышленный склад) и $\xi_{ii} = 0$, в том случае, когда на анализируемом участке не предполагается размещение погрузочного пункта и обустройство лесотранспортных путей.

Предлагаемая методика предусматривает сокращение суммарных затрат на поддержание в действующем состоянии существующих поквартальных просек, размещение на территории лесного квартала дополнительных лесовозных дорог, магистральных волоков, обустройство заданного числа погрузочных пунктов, трелевку к ним древесины и учитывает затраты на вывозку древесины к лесопромышленному складу. Использование методики предусматривает минимизацию целевой функции:

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [d_{ij} \cdot \xi_{ij}] + \sum_{i=1}^n \xi_{ii} \cdot C_{ппi} + \\ + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s \left[\xi_{ii} \cdot \rho_{ij}^{min} \cdot C_{прв} + \frac{2 \cdot C_B \cdot (\rho_{ij}^{min} + \rho_{yj}) \cdot \sum_{j=1}^n (V_{ij} \cdot \xi_{ij})}{\vartheta_B \cdot M_B \cdot 3600 \cdot m_B \cdot \varphi_B} \right].$$

Физический смысл учитываемых в целевой функции слагаемых следующий:

- первое слагаемое характеризует суммарные затраты на прокладку всех магистральных волоков, связывающих между собой осваиваемые участки в лесном квартале, и трелевку по ним лесоматериалов к погрузочным пунктам:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [d_{ij} \cdot \xi_{ij}],$$

где d_{ij} - минимальные суммарные затраты на прокладку магистральных волоков, связывающих между собой участки i и j , и на трелевку древесины между обозначенными участками, д.е.;

- второе слагаемое учитывает суммарную стоимость обустройства погрузочных пунктов:

$$\sum_{i=1}^n [\xi_{ii} \cdot C_{ппi}],$$

где $C_{ппi}$ - стоимость размещения погрузочного пункта на i - участке, д.е.;

- третье слагаемое учитывает возможные затраты на прокладку лесовозной дороги:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s [\xi_{ij} \cdot \ell_{ij}^{min} \cdot C_{пр в ij}],$$

где $\ell_{i1}^{min}, \ell_{i2}^{min}, \dots, \ell_{is}^{min}$ различные варианты прокладки транспортных путей от анализируемого участка до участков, расположенных у поквартальных просек, соответствующие минимальным затратам на прокладку магистральных волоков (временных лесовозных дорог), м; s – число участков, примыкающих к поквартальным просекам, шт; $C_{пр в ij}$ – дополнительные затраты, связанные с превращением 1 п.м. магистрального волока в лесовозную дорогу, д.е.;

- четвертое слагаемое учитывает дополнительные затраты на перемещение лесовозного автотранспорта по дополнительным лесовозным дорогам, анализ целесообразности размещения которых в лесном квартале является составной частью данной методики:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s \left[\frac{2 \cdot C_{в} \cdot (\ell_{ij}^{min} + \ell_{yj}) \cdot \sum_{j=1}^n (V_{ij} \cdot \xi_{ij})}{\vartheta_{в} \cdot M_{в} \cdot 3600 \cdot m_{в} \cdot \varphi_{в}} \right],$$

где $C_{в}$ – стоимость машино-смены лесовозного автотранспорта, задействованного на вывозке древесины, д.е.; V_{ij} – вырубаемый запас древесины на каждом из анализируемых участков, м³; $\vartheta_{в}$ – средняя скорость движения лесовозного автотранспорта в холостом и грузовом направлениях по дополнительным лесовозным дорогам, прокладываемым в лесном квартале, м/с; $M_{в}$ – средняя нагрузка на рейс лесовозного автотранспорта, м³; $m_{в}$ – число часов работы лесовозного автотранспорта в смену, ч.; $\varphi_{в}$ – коэффициент использования времени смены лесовозного автотранспорта; $\ell_{y1}, \ell_{y2}, \dots, \ell_{ys}$ – минимальные расстояния от анализируемого участка, расположенного у поквартальной просеки до угла лесного квартала в направлении которого осуществляется вывозка лесоматериалов на лесопромышленный склад.

Ограничения, накладываемые на целевую функцию:

- для всех анализируемых участков ($j = 1, \dots, n$) должно выполняться условие, гарантирующее, что любая анализируемая вершина x_j прикреплена к одной и только одной медианной вершине x_i (т.е. любой анализируемый участок (лесосека) на территории лесного квартала связан посредством магистрального волока только с одним погрузочным пунктом).

$$\sum_{i=1}^n \xi_{ij} = 1;$$

- на территории лесного квартала для обеспечения выполнения всех операций лесосечных работ должно быть расположено один или более погрузочных пунктов (т.е. в графе, характеризующем участки на территории лесного квартала должно быть не менее p медианных вер-

шин). Выполнение этого условия обеспечивается вводимым ограничением на количество погрузочных пунктов в лесном квартале.

$$\sum_{i=1}^n \xi_{ii} \geq p;$$

- число используемых в анализе вариантов размещения погрузочных пунктов вблизи поквартальной просеки должно соответствовать условию:

$$p \leq s$$

- для всех анализируемых участков ($j = 1, \dots, n$) должно выполняться условие, гарантирующее, что любая анализируемая вершина x_j может быть прикреплена только к вершине x_i входящей в медианное множество (т.е. если $\xi_{ii} = 0$, то $\xi_{ij} = 0$, т.к. присоединение любого анализируемого участка (лесосеки) на территории лесного квартала посредством магистрального волокна или сети магистральных волокон ко второму участку, может быть оправдано, только в том случае, если на втором участке расположен погрузочный пункт).

$$\xi_{ij} \leq \xi_{ii};$$

- значения ξ_{ij} являются целочисленными и могут находиться в пределах $[0; 1]$. Аналогично методу решения задачи о p -медиане в терминах целочисленного программирования, целесообразно преобразовать данное условие в выражение:

$$\xi_{ij} \geq 0;$$

- каждый участок (лесосека), принимаемый в качестве медианной вершины должен быть связан магистральным волокном или сетью магистральных волокон и поквартальных просек с одним или несколькими участками, расположенными на границе лесного квартала.

$$\xi_{ii} \leq \sum_{j=1}^s \xi_{ij}.$$

Обоснование минимальных затрат на прокладку волокон и трелевку между всеми парами анализируемых участков лесного квартала

Для решения поставленной задачи необходимо обоснование методики расчета минимальных суммарных затрат на прокладку магистральных волокон и трелевку древесины между всеми парами анализируемых участков x_i и x_j .

Для реализации этой задачи выведены математические зависимости, учитывающие особенности технологического процесса лесосечных работ в условиях поквартального освоения участков лесного фонда и разнообразие природно-производственных условий анализируемых участков, позволяющие заполнять и преобразовывать все последовательные матрицы, промежуточных значений обоснования минимальных затрат на прокладку волокон и трелевку между всеми парами анализируемых участков лесного квартала.

Для заполнения первоначальной матрицы, охватывающей значения минимальных суммарных затрат на прокладку магистральных волоков и трелевку древесины лишь между ближайшими парами анализируемых участков x_i и x_j , напрямую связанных между собой магистральным волоком, без реализации возможности его прокладки через территорию другой лесосеки, предложена математическая зависимость:

$$d_{ij}^{k=0} = C_{\text{пр } ij} + \frac{2 \cdot C_{\text{тр}} \cdot V_{ij} \cdot \ell_{ij}}{3600 \cdot M \cdot t \cdot \varphi \cdot \vartheta},$$

где $C_{\text{пр } ij}$ – затраты на прокладку магистрального волока между участками x_i и x_j , расположенными на территории лесного квартала, д.е.; ℓ_{ij} – расстояние между участками x_i и x_j , м; $C_{\text{тр}}$ – стоимость машино-смены техники, задействованной на трелевке лесоматериалов, д.е.; M – средний объем трелеваемой пачки лесоматериалов, м³; t – число часов работы машины, задействованной на трелевке, в смену, ч.; φ – коэффициент использования времени смены при трелевке древесины; ϑ – средняя скорость движения машины, задействованной на трелевке в холостом и грузовом направлениях по магистральным волокам, м/с.

В случае, если магистрального волока, напрямую соединяющего между собой анализируемые участки x_i и x_j , не существует, элементу $d_{ij}^{k=0}$ первоначальной матрицы присваивается значение $+\infty$. Элементам d_{ii} первоначальной матрицы присваивается значение $+\infty$.

Предлагаемая методика базируется на последовательности из k преобразований первоначальной матрицы. Задача разбивается на подзадачи меньшего размера. Применяется принцип динамического программирования, где оптимальное решение задачи меньшего размера может быть использовано для решения исходной задачи. При этом, согласно алгоритму Флойда [10], на каждой последующей k - итерации новая матрица представляет собой минимальные суммарные затраты на прокладку магистральных волоков и трелевку древесины между парами анализируемых участков x_i и x_j с ограничением в том, что путь между всеми парами участков x_i и x_j в качестве промежуточных участков содержит только участки из множества $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$.

Для вычисления элементов всех последующих матриц рекомендуется использование рекуррентного соотношения:

$$d_{ij}^k = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{\text{пр } kj}^{*(k-1)} + \frac{2 \cdot C_{\text{тр}} \cdot V_{ij} \cdot (\ell_{ik}^{(k-1)} + \ell_{kj}^{(k-1)})}{3600 \cdot M \cdot t \cdot \varphi \cdot \vartheta}; \\ \text{при этом} \\ \ell_{ij}^k = \ell_{ik}^{(k-1)} + \ell_{kj}^{(k-1)}; \\ C_{\text{пр } ij}^{*k} = C_{\text{пр } kj}^{*(k-1)} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} d_{ij}^{(k-1)} \\ \text{при этом} \\ \ell_{ij}^k = \ell_{ij}^{(k-1)}; \\ C_{\text{пр } ij}^{*k} = C_{\text{пр } ij}^{*(k-1)} \end{array} \right\}$$

где k – номер анализируемой матрицы значений $(1, \dots, n)$ (номер итерации); $\ell_{kj}^{(k-1)}$, ℓ_{ij}^k – соответственно, расстояния между участками x_i и x_j , полученные по результатам матриц $(k-1)$ и k , м; $C_{пр\ ij}^{*(k-1)}$, $C_{пр\ ij}^{*k}$ – соответственно, затраты на прокладку магистрального волокна до первого ближайшего участка на пути между участками x_i и x_j , полученные по результатам матриц $(k-1)$ и k , д.е.

Элементам d_{ii} , ℓ_{ij} , $C_{пр\ ij}$ последней матрицы результатов присваивается значение 0.

Результаты последней итерации подставляются в предложенную ранее целевую функцию. Поиск решения может быть осуществлен с использованием методов линейного программирования.

Результаты исследования и их обсуждение. Предложенная методика обоснования минимальных затрат на прокладку волокон и трелевку между всеми парами анализируемых участков лесного квартала позволяет исключить повторный учет затрат на прокладку магистральных волокон при анализе сети магистральных волокон, соединяющих лесосеки с погрузочными пунктами на территории лесного квартала. При практическом использовании результатов возможно смещение погрузочных пунктов на некоторое расстояние от заложенных в расчеты значений, либо размещение лесоматериалов вдоль временного лесовозного уса, но следует учесть, что перемещение погрузочных пунктов в направлении вывозки древесины приведет к увеличению затрат на транспортно-технологическое освоение лесного квартала в соответствии со следующей зависимостью:

$$\Delta z = \left[\left(\frac{C_{тр}}{M \cdot m \cdot \varphi \cdot \vartheta} - \frac{C_{в}}{M_{в} \cdot m_{в} \cdot \varphi_{в} \cdot \vartheta_{в}} \right) \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ x_j \in X_p}}^n \frac{V_{pj}}{1800} - C_{пр\ в} + C_{пр} \right] \cdot \ell_{fp},$$

где Δz – величина, соответствующая изменению суммарных затрат на освоение лесного квартала, д.е.; ℓ_{fp} – отклонение от расчетного положения -погрузочного пункта в направлении трелевки (вывозки древесины), м; V_{pj} – объемы работ по трелевке древесины с лесосек, соединенных магистральными волокнами с p -погрузочным пунктом, м³; $C_{пр}$, $C_{пр\ в}$ соответственно, затраты на прокладку 1 п.м. магистрального волокна и 1 п.м. лесовозного уса.

Выводы. Предложенные математические зависимости и методика позволяют обеспечить возможность комплексного учета основных переместительных операций трелевки и вывозки древесины и анализа размещения на территории лесного квартала, помимо ограничивающих его периметр кварталных просек, дополнительных временных лесовозных усов.

Список литературы

1. Алябьев В.И. Оптимизация производственных процессов на лесозаготовках- М.: Лесн. пром-сть. -1977. -232 с.
2. Кочегаров В.Г., Бит Ю.А., Меньшиков В.Н. Технология и машины лесосечных работ- М.: Лесн. пром-сть. -1990. -392 с.
3. Рукомойников К. П. Графоалгоритмический подход к обоснованию рациональной технологии поквартального освоения участков лесного фонда // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. -2014. -№ S2. -С. 96-103.
4. Рукомойников К.П. Обоснование методики расчета основных технологических параметров освоения квартала // Лесной вестник. 2007. –№4(53)- – С.96-102.
5. Рукомойников К.П. Развитие инфраструктуры поквартального освоения участков лесного фонда // Лесной журнал. - 2008. - №2 – С.36-41.
6. Скрыпник В.И., Кузнецов А.В. Обоснование целесообразности строительства временных лесовозных дорог (усов) // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф. Вып. 30. Брянск: БГИТА,-2011. -С. 168–171.
7. Скрыпник В.И., Кузнецов А.В., Ратманова Ю.А. Способы минимизации затрат на первичный транспорт леса// Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. Петрозаводск: ПетрГУ, - 2012. -№4,-С. 98-101.
8. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок - СПб.: Профи-информ -2005. -337 с.
9. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Кузнецов А.В. Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки» -2010. -№ 4 (109).- С. 66–75.
10. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Кузнецов А.В., Пладов А.В. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация- СПб.: ПРОФИКС- 2008.- 304 с.

Рецензенты:

Ширнин Ю.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ТОЛП, ФГБОУ ВПО Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола;

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