

Р.С. Беспалов, С.А. Угрюмов

**ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ФОРВАРДЕРА
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СПЛОШНЫХ ЛЕСОСЕЧНЫХ РУБОК**

Введение. В условиях спада российской экономики из-за воздействия масштабных внешнеторговых и финансовых санкций и ограничений произошло нарушение работы всех промышленных комплексов России, в том числе лесопромышленного [Цатрян, 2023; Галактионов и др., 2024]. Европейские санкции и разрыв торгово-технологических связей стали одними из главных негативных факторов, осложнивших развитие лесопромышленной отрасли. В современных условиях, когда экономический сектор отрасли находится в сложном положении, повышение эффективности работы лесозаготовительной техники и оптимизация ее работы имеют особо важное значение [Черных, 2011; Рукомойников, 2014]. Качественная подготовка территорий, оптимизация технологического процесса лесозаготовок и правильный подбор систем машин для работы на лесосеках позволяют повысить эффективность функционирования лесозаготовительных предприятий на территории Российской Федерации [Жемулин, 2011].

В большинстве случаев производительность харвестера (или другой валочной лесозаготовительной техники) на лесосеках стабильна, при этом итоговые показатели работы лесозаготовительного предприятия, в том числе производительность, зависят от эффективности работы форвардера [Меньшиков, 1983; Каляшов, 2004]. Путем модернизации производственного процесса (как с точки зрения применяемой технологии, так и с точки зрения применяемой техники и оборудования) можно повышать эффективность лесозаготовки с учетом природно-производственных и почвенных условий [Клубничкин, 2025].

Разрабатываемая лесосека всегда уникальна, и каждая создаваемая карта-схема ее разработки составляется индивидуально. Разрабатываемые участки имеют разную форму, характеристики древостоя, поэтому подбор схем расположения пасечных и магистральных волоков может отходить от методических [Григорьев и др., 2013], становясь сложно-комбинированными. Исходя из этого, до сих пор не ясно, как следует по-

ступать оператору форвардера при работе на различных участках волока с учетом возвращения на лесоскладской пункт при различных объемах заполнения корзины техники.

Данный вопрос рассматривался в рамках оптимального построения маршрута для канатных трелевочных установок [Королько и др., 2025], для обоснования выборочных рубок или касаясь общей транспортной сети лесовозных дорог и проходимости техники [Воронова и др., 2009; Рукомойников, 2015]. Определение оптимального маршрута трелевочной техники на сплошных рубках в достаточной степени не освещено, поэтому вопрос оптимизации работы форвардера при проведении сплошных лесосечных рубок является актуальным и требует практического решения.

Применение графового анализа территорий при освоении лесосек может использоваться для изучения и оптимизации технологического процесса лесозаготовок, при этом средоошащающее использование лесосек путем рационального перемещения по волокам позволит уменьшить воздействие на почвогрунт [Григорьев и др., 2008], а полученные рекомендации могут быть использованы при проектировании лесосечных работ с повышением их эффективности.

Цель работы – разработка методики нахождения оптимального маршрута форвардера John Deere 1210g на лесосеке с применением теории графов для достижения наименьшего проходимого расстояния. Модель лесосеки представлена в виде взвешенного графа, где связанные вершины соответствуют пачкам сортиментов и пунктам погрузки, а ребра – пасечным или магистральным волокам с весами, характеризующими расстояние и трудоемкость проезда. Исследование подразумевает анализ работы трелевочной техники при работе на сплошных рубках.

Методика исследования. В качестве объектов исследования была рассмотрена разработанная лесосека на территории Вашкинского округа Вологодской области РФ. Данная лесосека разрабатывалась комплексом многооперационных лесозаготовительных машин бренда John Deere. Под харвестер John Deere 1270, соответствующий среднему классу по снаряженной массе [Егорин и др., 2021], подобран форвардер John Deere 1210g [Андронов и др., 2021]. Рассматриваемая техника положительно зарекомендовала себя в природно-производственных условиях Северо-Западного Федерального округа.

Полученная технологическая карта-схема участка была обработана в системе автоматизированного проектирования и черчения Autodesk Auto-

CAD 2025 с целью определения размерностей рассматриваемого участка, а также протяженности проектируемых трелевочных волоков и расстояний между создаваемыми пачками сортиментов. Приведенное в графический вид изображение технологической карты в виде схемы приведено на рис. 1.

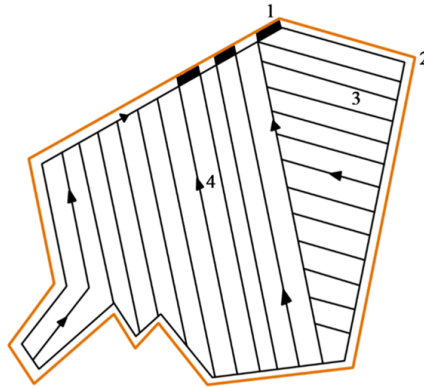


Рис 1. Карта-схема разрабатываемого технологического участка: 1 – лесопогрузочный пункт; 2 – граница лесосеки; 3 – волок; 4 – направление вывозки

Fig. 1. Schematic map of the technological site under development: 1 – timber loading point; 2 – cutting area boundary; 3 – portage; 4 – export direction

Как видно из рис. 1, расположение пасечных и магистральных волоков имеет сложно-комбинированный вид за счет своей формы. На данном участке нет биотопов, не подлежащих рубке, местность равнинная, не имеет природных препятствий, оказывающих влияние на производительность техники. Оператор трелевочной техники имеет стаж более 5 лет, что, согласно исследованиям [Dvořák et al., 2008] снижает антропогенный фактор в работе.

Результаты исследования. Для данной задачи подразумевается создание взвешенного и связанного графа, ребрами которого выступают участки волоков, вершинами являются формируемые харвестером пачки сортиментов на расстоянии, определяемом по формуле:

$$V_{\text{м.п}} = 2(k_{\text{с.в}} \cdot r), \quad (1)$$

где $V_{\text{м.п}}$ – расстояние между формируемыми пачками на волоках, м.; $k_{\text{с.в}}$ – коэффициент снижения вылета стрелы манипулятора харвестера; r – ради-

ус вылета стрелы манипулятора харвестера, м (из технического паспорта техники).

Так как в реальном рабочем процессе не всегда есть возможность максимально охватывать рабочий участок из-за различных условий, применяется коэффициент его снижения, определяемый по формуле:

$$k_{с.в} = k_p \cdot k_{п} \cdot k_{к}, \quad (2)$$

где k_p – коэффициент рельефа (0,7...0,9); $k_{п}$ – коэффициент препятствий (0,8...0,9); $k_{к}$ – коэффициент квалификации оператора харвестера (0,75...0,9).

Принимая положение (1), понимаем, что на лесосеке вершины графа будут появляться в интервале $V_{м.п}$, м и иметь объем сортиментов исходя из таксационных показателей лесосеки в области работы харвестера на волоке $Q_{п.в.м}$, м³.

Для более четкого представления графа, с учетом вычисляемых вершин, лесосека принимает вид, представленный на рис. 2.

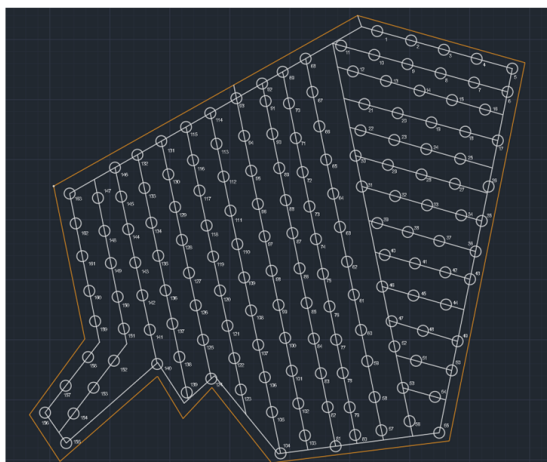


Рис 2. Граф рассматриваемой лесосеки
Fig. 2. Graph of the cutting area under consideration

По заданным условиям мы имеем итоговый граф:

$$G = (A, E), \quad (3)$$

где A – количество вершин графов; E – множество ребер графа.

Траектория пути форвардера опирается на модель используемой на лесосеке техники и технические характеристики грузоподъемности сортиментов. Она будет принимать вид:

$$ЛПП \rightarrow A_i \rightarrow \dots \rightarrow A_m \rightarrow ЛПП, \quad (4)$$

где ЛПП – погрузочный пункт лесосеки; A_i – начальная вершина графа; A_m – конечная вершина графа, которую может обработать форвардер.

Общее множество вершин создаваемого ряда для данной лесосеки составляет 163 шт. Для определения необходимого количества рейсов трелевочной техники необходимо установить количество вершин, которые она может забрать:

$$N_{\text{ц}} = \frac{A_i}{A_{\text{рейс}}} = \frac{A_i \cdot Q_{\text{вершины}}}{Q_{\text{кор}}}, \quad (5)$$

где A_i – количество всех вершин графа, шт.; $A_{\text{рейс}}$ – количество вершин, которые форвардер может обработать за один рейс, шт.; $Q_{\text{вершины}}$ – объем сортиментов, хранящихся на каждой вершине, м^3 ; $Q_{\text{кор}}$ – объем корзины форвардера, м^3 .

При проведении расчетов (5) результаты значений округляются в большую сторону при наличии десятичных частей, так как дополнительный объем, который не смог забрать форвардер на том или ином рейсе, все равно требуется забрать.

Форвардеру в рамках данной лесосеки будет необходимо совершить не менее 55 циклических маршрутов, чтобы обработать все вершины графа исходя из заданных условий и ограничений. Важно учитывать, что для вершин, находящихся на краях или на пересечении, более двух ребер имеют меньший объем хранящихся сортиментов, так как на таких участках либо заканчивается граница разрабатываемой лесосеки, либо уже была затронута часть древостоя. Для данной работы допускается усредненное значение объема заготавливаемых пачек в связи с различными производственными факторами на лесозаготовке.

Так как при проведении сплошных рубок работа харвестера и форвардера происходят одновременно, то трелевочная техника не может передвигаться в различные точки, которые не посещал вальщик. Исходя из этого начальный маршрут форвардера будет дублировать путь харвестера. Опираясь на то, что харвестер движется от одного массива деревьев к другому, а трелевочный трактор совершает циклические операции, включающие в себя, как минимум, проезды в порожнем и холостом ходе на лесопогру-

зочный пункт, зона вариативности перемещения форвардера будет постепенно увеличиваться.

Имея известные объемы, находящиеся на вершинах, и грузоподъемность рассматриваемой техники на лесосеке, можно увидеть, что при данных природно-производственных условиях можно за один рейс обработать 3 вершины рассматриваемого графа. Для других видов работ и унификации рассмотрения графа лесосеки возможно создание сверхграфа, снижающего общее количество вершин, но данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Движение на волоках, у которых вершины имеют лишь два ребра, будет плавным, от одной вершины к другой, а на вершинах, имеющих более двух ребер, – идти по принципу «ближайшего соседа» и варьироваться от расстояния между вершинами.

Итогом является поиск целевой функции по преодолению наименьшего пути трелевки для всех вершин:

$$S_{\min} = \min \sum_{i=0}^{k-1} S_{\text{в}}(V_i, V_{i+1}), \quad (6)$$

где $S_{\min}$ – общее наименьшее проходимое расстояние, м; $S_{\text{в}}(V_i, V_{i+1})$ – длина конкретного волока, м.

По своей сущности поиск оптимального построения посещения вершин графа сводится к решению задачи коммивояжера, направленному на поиск оптимального маршрута.

Для точек, которые имеют более двух ребер, учитывается следующее:

$$S_{\min} = \min(P_{i,m}) \sum S_{\text{волока}}, \quad (7)$$

где $(P_{i,m})$ – любой допустимый путь между вершинами волока, м; $S_{\text{волока}}$ – длина волока, м.

В конечном итоге модель движения трелевочного трактора на рассматриваемой лесосеке представляется как:

$$N_{\text{рейса}} = t_{\text{ЛПП},i}^{\text{хол}} + t_{i+1}^{\text{хол-груз}} + t_{i+2}^{\text{груз}} + t_{i+3,\text{ЛПП}}^{\text{груз}}, \quad (8)$$

где $N_{\text{рейса}}$ – номер рейса форвардера; $t_{\text{ЛПП},i}^{\text{хол}}$ – операция перехода от ЛПП до вершины 1 в холостом ходе; $t_{i+1}^{\text{груз}}$ – операция обработки вершины графа из холостого пути в груженный; $t_{i+2}^{\text{груз}}$ – операция переезда на вторую вершину графа в груженом состоянии; $t_{i+3,\text{ЛПП}}^{\text{груз}}$ – операция по обработке третьей вершины графа и возвращение на ЛПП в груженом виде.

Использование графоаналитического метода позволяет при наличии опытных данных рассматривать граф не только со стороны проходимого расстояния, но и со стороны времени затрат, также влияющих на итоговый результат выработки техники.

Заключение. Рассмотрение работы многофункциональной лесозаготовительной техники путем применения графоаналитического метода позволяет внести ясность во многие технологические процессы при проведении подготовительных и лесосечных работ [Воронова и др., 2009; Рукомойников, 2015]. Использование предложенного метода позволяет рекомендовать операторам форвардеров конкретные технические задания с оптимизацией маршрутов, снижая вероятность возникновения случайных переместительных операций. С учетом сложной экономической ситуации в лесном секторе применение данного подхода к проектированию работ может позволить лесозаготовителям оптимизировать работу трелевочной техники и повысить эффективность лесозаготовительного производства в целом. Так как все лесосеки индивидуальны, и на каждой из них рабочий процесс отличается, применение предлагаемого метода благоприятно влияет на итоговую производительность.

Представленные в работе методы могут быть автоматизированы с получением быстрого и гибкого расчета работы трелевочной техники на сплошных лесосечных рубках, с обеспечением минимального отрицательного воздействия на окружающую среду, почвогрунт и произрастающий древостой, не подлежащий рубке [Григорьев и др., 2008; Воронова и др., 2013].

Рассмотренные и выведенные положения по нахождению оптимального пути при работе форвардера среднего класса на взвешенном графе в виде лесосеки позволяют развивать данную тему в дальнейшем с обработкой большого массива лесосек. Расширение базы данных множества лесосек и обработка информации в целом позволит сделать рассматриваемую модель более адекватной и устойчивой на различных типах лесосек.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Андронов А.В., Петросян С.С., Егорин А.А., Ильюшенко Д.А., Хитров Е.Г. Классификация форвардеров с использованием кластеризации данных об их эксплуатационных характеристиках // Resources and Technology. 2021. Т. 18, №4. С. 1–16. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5983.

Воронова А.М., Воронов Р.В., Пискунов М.А. Задача размещения волоков и погрузочных пунктов на лесосеке и вопросы применения оптимальных схем на практике // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2009. №9. С. 58-62.

Воронова А.М., Воронов Р.В., Пискунов М.А., Щеглова Л.В. Алгоритм оптимального размещения волоков из условия минимизации повреждения грунта // Тракторы и сельхоз машины. 2013. №9. С. 33-35.

Галактионов О.Н., Васильев А.С., Суханов Ю.В. Пути развития лесопромышленного комплекса России в современных экономических условиях // Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию: мат. IV межд. молодеж. науч.-практ. конф. Архангельск, 2024. С. 16-23.

Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средооадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации: монография. СПб.: ЛТА, 2008. 178 с.

Григорьев И.В., Тихонов И.И., Куницкая О.А. Технология и машины лесосечных работ: учеб. пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 132 с.

Егорин А.А., Петросян С.С., Андронов А.В., Хитров Е.Г., Степанищева М.В. Анализ эксплуатационных характеристик современных харвестеров // Системы. Методы. Технологии. 2021. №4 (52). С.127-131. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-4-127-131.

Жемулин С.Б. Проблемы развития предприятий лесозаготовительной промышленности и ключевые направления их решения // Российское предпринимательство. 2011. №10-1. С. 119-124.

Каляшов В.А. Обоснование рациональной технологии несплошных рубок при заготовке сортиментов многооперационными машинами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004. 20 с.

Клубничкин В.Е. Методы разработки беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2025. 326 с.

Королько Н.С., Свойкин Ф.В., Рего Г.Э., Королько А.С., Россихин К.В., Кретьинин В.И. Оптимальная схема разработки лесосеки канатной трелёвочной установкой // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 317-334. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.317-334.

Меньшиков В.Н. Разработка лесосек машинами при сплошнолесосечных рубках: лекции для студентов. Л.: ЛТА, 1983. 58 с.

Рукомойников К.П. Графоаналитический подход к обоснованию целесообразности размещения лесовозного уса на территории лесного квартала // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. С.1-8.

Рукомойников К.П. Обоснование способов и параметров рациональных технологий поквартального освоения лесных участков: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Йошкар-Ола, 2015. 34 с.

Цатрян Л.Р. Анализ проблем и перспектив развития лесопромышленного комплекса в условиях санкций // Промышленное развитие России: проблемы, перспективы: сб. ст. по мат. XXI Межд. науч.-практ. конф. преподавателей вузов, ученых, специалистов, аспирантов, студентов. Нижний Новгород, 2023. С. 71-75.

Черных Р.А. Обоснование выбора алгоритма поиска кратчайшего пути для построения схемы сети лесовозных дорог // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. 28, №1/2. С. 130-133.

Dvořák J., Malkovský Z., Macků J. Influence of human factor on the time of work stages of harvesters and crane-equipped forwarders // Journal of Forest Science. 2008. Vol. 54, iss. 1. P. 24-30. DOI: 10.17221/790-JFS.

References

Andronov A.V., Petrosyan S.S., Egorin A.A., Ilyushenko D.A., Khitrov E.G. Classification of forwarders using clusterization of data on their operational characteristics. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 1-16. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5983. (In Russ.)

Chernykh R.A. Substantiation of the choice of an algorithm for finding the shortest path for constructing a network of logging roads. *Conifers of the boreal zone*, 2011, vol. 28, no. 1/2, pp. 130-133. (In Russ.)

Dvořák J., Malkovský Z., Macků J. Influence of human factor on the time of work stages of harvesters and crane-equipped forwarders. *Journal of Forest Science*, 2008, vol. 54, iss. 1, pp. 24-30. DOI: 10.17221/790-JFS.

Egorin A.A., Petrosyan S.S., Andronov A.V., Khitrov E.G., Stepanishcheva M.V. Analysis of the Performance Characteristics of Modern Harvesters. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 4(52), pp. 127-131. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-4-127-131. (In Russ.)

Galaktionov O.N., Vasilyev A.S., Sukhanov Yu.V. Ways of developing the Russian timber industry in modern economic conditions. *Arctic research: from extensive development to integrated development*: proceedings of the IV Int. youth sci.-pract. conf. Arkhangelsk, 2024, pp. 16-23. (In Russ.)

Grigoryev I.V., Zhukova A.I., Grigoryeva O.I., Ivanov A.V. Environmental-Friendly Technologies for Developing Timber Areas in the North-Western Region of the Russian Federation: monograph. St. Petersburg: LTA, 2008. 178 p. (In Russ.)

Grigoryev I.V., Tikhonov I.I., Kunitskaya O.A. Technology and Machines of Logging Operations: textbook. St. Petersburg: SPbSFTU, 2013. 132 p. (In Russ.)

Kalyashov V.A. Substantiation of the rational technology of non-continuous felling in the preparation of assortment by multi-operation machines: author's abstract. Diss. ... Cand. Tech. Sci. St. Petersburg, 2004. 20 p. (In Russ.)

Klubnichkin V.E. Methods of development of unmanned wheeled and tracked skidder machines. Diss. ... Dr. Tech. Sci. Moscow, 2025. 326 p. (In Russ.)

Korolko N.S., Svoikin F.V., Rego G.E., Korolko A.S., Rossikhin K.V., Kretinin V.I. Optimal scheme of logging area development by cable skidding unit. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 317-334. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.317-334. (In Russ.)

Menshikov V.N. Development of logging sites by machines during clear-cutting: lectures for students. Leningrad: LTA, 1983. 58 p. (In Russ.)

Rukomoynikov K.P. Graphoanalytical approach to substantiating the feasibility of placing a logging fence on the territory of a forest quarter. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 6, pp.1-8. (In Russ.)

Rukomoynikov K.P. Substantiation of methods and parameters of rational technologies for quarterly development of forest plots: author's abstract. Diss. ... Dr. Tech. Sci. Yoshkar-Ola, 2015. 34 p. (In Russ.)

Timber industry complex. Results of 2024 and January-February 2025. *Bulletin of the LESTECH Association*, 2025, no. 2(20), p. 16. (In Russ.)

Tsaryan L.R. Analysis of problems and prospects for the development of the timber industry in the context of sanctions. *Industrial development of Russia: problems, prospects*: collection of articles based on the mat. of the XXI Int. sci.-pract. conf. of university teachers, scientists, specialists, PhD students, students. Nizhny Novgorod, 2023, pp. 71-75. (In Russ.)

Voronova A.M., Voronov R.V., Piskunov M.A. The task of placing haulage and loading points in the cutting area and the application of optimal schemes in practice. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2009, no. 9, pp. 58-62. (In Russ.)

Voronova A.M., Voronov R.V., Piskunov M.A., Shcheglova L.V. Algorithm of optimal placement of fibers from the condition of minimizing soil damage. *Tractors and agricultural machinery*, 2013, no. 9, pp. 33-35. (In Russ.)

Zhemulin S.B. Problems of Development of Enterprises in the Timber Industry and Key Directions for Their Solution. *Russian Entrepreneurship*, 2011, no. 10-1, pp. 119-124. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 27.07.2025

Беспалов Р.С., Угрюмов С.А. Применение графоаналитического метода для оптимизации работы форвардера при проведении сплошных лесосечных рубок // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 257. С. 369–380. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.257.369-380

В современных условиях, когда экономический сектор отрасли находится в сложном положении, повышение эффективности работы лесозаготовительной техники и оптимизация ее работы имеют особо важное значение. Качественная подготовка территорий, оптимизация технологического процесса лесозаготовок и правильный подбор систем машин для работы на лесосеках позволяют повысить эффективность функционирования лесозаготовительных предприятий.

В данной статье рассмотрен вопрос применения графоаналитического метода на сплошных лесосечных рубках по скандинавской технологии с применением харвестера и форвардера. В исследованиях была обработана реальная лесосека на территории Северо-Западного федерального округа, лесной участок представлен в виде взвешенного графа. Для обработки результатов применялись специализированные приложения, позволяющие сократить и автоматизировать процесс. Представлена трансформация лесосеки в граф со связанными вершинами. Выведены формулы, позволяющие определить минимальное проходимое расстояние по принципу «ближайшего соседа». Представлена целевая функция для определения поставленной задачи, которая сводится к решению задачи коммивояжера. Использование предложенного метода позволяет рекомендовать операторам форвардеров конкретные технические задания с оптимизацией маршрутов, снижая вероятность возникновения случайных переместительных операций. С учетом сложной экономической ситуации в лесном секторе применение данного подхода к проектированию работ может позволить лесозаготовителям оптимизировать работу трелевочной техники и повысить эффективность лесозаготовительного производства в целом. Рассмотренные и выведенные положения по нахождению оптимального пути при работе форвардера среднего класса на взвешенном графе в виде лесосеки позволяют развить данную тему в дальнейшем с обработкой большого массива лесосек. Расширение базы данных множества лесосек и обработка информации в целом позволит сделать рассматриваемую модель более адекватной и устойчивой на различных типах лесосек.

Ключевые слова: лесозаготовка, харвестер, форвардер, лесосека, производительность, расстояние трелевки, теория графов.

Bespalov R.S., Ugryumov S.A. Application of the graph-analytical method to optimize the operation of a forwarder during clear-cutting logging. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2026, iss. 257, pp. 369–380 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.257.369-380

In modern conditions, when the economic sector of the industry is in a difficult situation, increasing the efficiency of logging equipment and optimizing its operation is particularly important. High-quality preparation of territories, optimization of the technological process of logging and the correct selection of machine systems for work in logging areas make it possible to increase the efficiency of logging enterprises. This article discusses the issue of using the graphoanalytical method on continuous logging using Scandinavian technology using a harvester and forwarder. In the research, a real logging area in the Northwestern Federal District was processed, the forest area is represented as a weighted graph. To process the results, specialized applications were used to shorten and automate the process. The transformation of a cutting area into a graph with connected vertices is presented. Formulas are derived to determine the

minimum distance traveled according to the “nearest neighbor” principle. An objective function is presented to determine the task, which boils down to solving the traveling salesman problem. Using the proposed method allows forwarder operators to recommend specific technical tasks with route optimization, reducing the likelihood of accidental relocation operations. Given the difficult economic situation in the forestry sector, the application of this approach to work design may allow loggers to optimize the operation of skidding equipment and increase the efficiency of logging production in general. The considered and derived provisions on finding the optimal path when working with a middle-class forwarder on a weighted graph in the form of a cutting area, allows us to develop this topic in the future with the processing of a large array of cutting areas. Expanding the database of multiple cutting areas and processing information in general will also make the model under consideration more adequate and sustainable for various types of cutting areas.

Key words: logging, harvester, forwarder, cutting area, productivity, skidding distance, graph theory.

БЕСПАЛОВ Родион Сергеевич – аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lesnik787@inbox.ru

BESPALOV Rodion S. – PhD student, Department of Technologies of Logging Industries, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: lesnik787@inbox.ru

УГРЮМОВ Сергей Алексеевич – профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-8077-3542.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ugr-s@yandex.ru

UGRYUMOV Sergey A. – DSc (Technical), Professor, Department of Technologies of Logging Industries, St.Petersburg State Forest Technical University. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-8077-3542.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: ugr-s@yandex.ru