

А.Ф. Эйвазов, О.В. Зубова

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ ЛЕСНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Введение. Лесная дорожная сеть является основой транспортной системы лесного хозяйства, играя ключевую роль в лесозаготовке, лесоуправлении, противопожарной охране и рекреационной деятельности [Катаров и др., 2023; Heinimann, 2017]. Экономическая эффективность и устойчивость лесопользования тесно связаны с рациональностью проектирования и техническим состоянием лесных дорог [Akay, 2006]. Однако традиционные подходы к их проектированию часто сталкиваются с проблемами высокой стоимости, трудоемкости и ограниченной точности исходных данных, особенно под густым лесным пологом [Krogstad, Schiess, 2004; Hatta Antah et al., 2021]. Сложность рельефа местности, геологические особенности и необходимость соблюдения нормативных требований создают значительные трудности для инженеров-проектировщиков [Абдельвахаб, 2020; Jaafari et al., 2021,].

Задача оптимизации проектирования лесных дорог заключается в поиске наилучшего варианта трассы, минимизирующего суммарные затраты на её создание и эксплуатацию при соблюдении всех технических и нормативных ограничений [Пятин, 2020; Hruza et al., 2018]. Проектирование лесных дорог регламентируется СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства». С развитием вычислительной техники и методов математической оптимизации появились новые возможности для автоматизации процесса проектирования и повышения качества принимаемых решений [Matinnia et al., 2018; Kardoš et al., 2024].

Ключевым элементом для успешного применения оптимизационных моделей является наличие точных и детальных пространственных данных о рельефе. Технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в особенности воздушное лазерное сканирование (LiDAR), коренным образом изменили подходы к сбору такой информации [İnan, Öztürk, 2022; Watanabe et al., 2023]. Технология LiDAR позволяет получать цифровые

модели местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) с очень высокой точностью и разрешением, эффективно проникая сквозь лесной полог [Krogstad, Schiess, 2004; Watanabe et al., 2023]. Использование LiDAR, в том числе установленного на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), обеспечивает повышенную детальность данных [Matinnia et al., 2018; Shin, 2022], что позволяет точно моделировать рельеф, выявлять оптимальные коридоры для прокладки трасс, идентифицировать препятствия и участки с неблагоприятными условиями (например, переувлажненные, оползнеопасные), а также оптимизировать объемы земляных работ.

В данной статье предлагается математическая модель оптимизации трассирования лесных автомобильных дорог, интегрирующая методы поиска оптимального пути на графе с высокодетальными данными о рельефе, полученными методом LiDAR. Целью модели является минимизация стоимости строительства дороги с учетом её длины, рельефных характеристик (влияющих на объемы земляных работ) и необходимости устройства водопропускных сооружений.

Методика и результаты исследования. Задача состоит в нахождении оптимального пути для лесной дороги между заданными начальной и конечной точками (или соединяющего несколько обязательных пунктов) на территории с известным рельефом, представленным ЦМР. Оптимальность понимается как минимизация стоимости строительства дороги.

Территория проектирования дискретизируется и представляется в виде взвешенного графа

$$G = (V, E),$$

где V – множество узлов, соответствующих точкам на ЦМР, а E – множество дуг, представляющих потенциальные элементарные сегменты дороги между соседними узлами [Пятин, 2020; Shin, 2022]. Каждой дуге $e = (i, j)$ присваивается вес c_{ij} , представляющий стоимость строительства данного сегмента.

Минимизируется суммарная стоимость строительства дороги, представляющая собой сумму стоимостей всех сегментов (дуг), входящих в выбранный путь P :

$$Z = \sum_{(e \in P)} c_e * x_e \rightarrow \min, \quad (1)$$

где x_e – бинарная переменная: $x_e = 1$, если дуга e включена в путь P , и $x_e = 0$ в противном случае.

Стоимость c_e для сегмента $e = (i, j)$ зависит от ряда факторов:

$$c_e = f(L_e, S_e, ET_e, WC_e), \quad (2)$$

где

- L_e – длина сегмента, учитывающая рельеф:

$$L_e = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}. \quad (3)$$

Базовая стоимость обычно пропорциональна длине и включает затраты на земляные работы. Однако существенную долю в общей стоимости строительства составляет устройство дорожной одежды (покрытия), которая может различаться по типу и толщине в зависимости от категории дороги и местных условий¹ [Jaafari et al., 2021];

- S_e – продольный уклон сегмента:

$$S_e = \frac{|z_j - z_i|}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} * 100\%, \quad (4)$$

где $|z_j - z_i|$ – абсолютная разница высот между конечной (j) и начальной (i) точками сегмента, а $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ – горизонтальная проекция длины сегмента. Увеличение продольного уклона S_e ведет к росту объемов перемещаемого грунта, что в свою очередь, требует работ по обеспечению устойчивости откосов. В модели это влияние учитывается через безразмерный коэффициент удорожания $k(S_e)$, который является функцией от величины уклона и определяется в соответствии с требованиями СП 288.1325800.2016 к проектированию лесных дорог в сложных рельефных условиях. Данный коэффициент $k(S_e) \geq 1$ и монотонно не убывает с ростом S_e . Коэффициент может быть представлен в виде полиномиальной зависимости (5):

$$k(S_e) = 1 + \frac{\sum_{n=1}^N a_n * \left(\frac{S_e}{100}\right)^n}{1 + b \left(\frac{S_e}{100}\right)^m}, \quad (5)$$

где S_e – уклон в процентах, а a_n , b , m – калибруемые коэффициенты, обеспечивающие асимптотическое приближение функции к максимальному значению при больших уклонах. В простейшем случае может использоваться кусочно-линейная аппроксимация, где для различных диапазонов

¹ СП 288.1325800.2016. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства.

уклонов задаются определенные значения коэффициента. Для практического применения рекомендуется следующая шкала коэффициента удорожания в зависимости от величины уклона сегмента (табл. 1) (на основе СП 288.1325800.2016, [Абдельвахаб, 2020; Layton et al., 1992]):

Таблица 1

Коэффициенты удорожания

Price increase factors

Диапазон уклонов, %	$k(S_e)$	Обоснование/источник
0–4	1,00	Базовые условия, минимальные затраты
4–6	1,15	Увеличение объема земляных работ, необходимость укрепления откосов
6–8	1,30	Сложные условия, дополнительные мероприятия по устойчивости
8–10	1,50	Особо сложные условия, максимальные допустимые по СП 288
>10	1,80	Крайне сложные условия, допустимы только при обосновании, требуют специальных решений

- ET_e – оценка сложности земляных работ. Может косвенно учитываться через уклон S_e и перепад высот $|z_j - z_i|$ или более точно, если доступны данные о грунтах [Абдельвахаб, 2020]. Большая высота насыпи или глубина выемки значительно удорожают строительство;

- WC_e – стоимость водопропускного сооружения. Если сегмент e пересекает водоток, к c_e добавляется $C_{crossing}e$.

Упрощенная формула для стоимости сегмента может выглядеть так:

$$c_e = C_{base} * L_e * k(S_e) + C_{wear} * L_e + C_{crossing}e, \tag{6}$$

где C_{base} – нормативная стоимость строительства 1 км дороги на ровной местности, $k(S_e)$ – коэффициент, учитывающий удорожание из-за уклона (включая земляные работы), $C_{crossing}e$ – стоимость моста/трубы (ненулевая при пересечении водотока), C_{wear} – нормативная стоимость устройства дорожной одежды на 1 км (или 1 м) дороги, учитывающая проектные решения по конструкции покрытия и плечо транспортировки материалов. Минимизация целевой функции (1) с такой стоимостью (6) будет стремиться к выбору более коротких и пологих маршрутов с меньшим числом пересечений водотоков, что косвенно минимизирует объемы насыпей и выемок.

Ограничения:

1. Максимальный продольный уклон (S_{\max}): уклон каждого сегмента e в выбранном пути P не должен превышать нормативное значение и устанавливается согласно СП 288.1325800.2016, где для лесных дорог различных категорий установлены предельные значения уклонов:

$$S_e \leq S_{\max} \quad \forall e \in P.$$

Реализуется назначением очень большого (или бесконечного) веса c_e дугам, не удовлетворяющим этому условию;

2. Геометрические ограничения по плану: минимальные радиусы кривых. Эти ограничения сложнее учесть на этапе поиска пути в графе. Обычно их проверяют и обеспечивают на этапе детальной проработки трассы, корректируя путь, найденный моделью. Можно вводить штрафы за повороты с радиусами кривых меньше нормативных значений в стоимость c_e [Пятин, 2020; İnan, Öztürk, 2022]. Под резкими поворотами понимаются горизонтальные кривые с радиусами меньше минимально допустимых значений, установленных СП 288.1325800.2016 для соответствующей расчетной скорости движения. Согласно нормативным требованиям, минимальные радиусы кривых в плане составляют: при расчетной скорости 60 км/ч — не менее 300 м; при расчетной скорости 50 км/ч — не менее 200 м; при расчетной скорости 40 км/ч — не менее 150 м; при расчетной скорости 30 км/ч — не менее 100 м. В особо сложных условиях допускается снижение этих значений до 50 м при скорости 30 км/ч. Штраф за резкие повороты может быть реализован через увеличение весового коэффициента дуги c_e пропорционально отклонению от нормативного радиуса или установлением запретительно высокого веса для недопустимых радиусов поворота;

3. Для повышения экономической эффективности рекомендуется учитывать плечо транспортировки природных дорожно-строительных материалов для устройства дорожной одежды. В модель вводится дополнительное ограничение:

$$\sum_{e \in P} L_e * D_{tr,e} \leq D_{\max}$$

где $d_{tr,e}$ — расстояние транспортировки материалов для сегмента e , D_{\max} — максимально допустимая суммарная транспортная работа по доставке материалов.

Данное ограничение реализуется следующим образом:

1) Этап предварительной обработки данных:

а. На основе данных ЦМР и геологических изысканий определяются местоположения потенциальных карьеров дорожно-строительных материалов (песка, щебня, грунта);

б. Для каждого сегмента дороги e рассчитывается расстояние $d_{tr,e}$ до ближайшего источника материалов по автомобильным дорогам с использованием алгоритмов поиска кратчайшего пути.

2) Алгоритм реализации ограничения:

а. В процессе поиска оптимального пути алгоритм отслеживает накопленную транспортную работу: $D_{acc} = \sum L_e * D_{tr,e}$ для всех сегментов e , включенных в текущий путь;

б. При рассмотрении каждой новой дуги проверяется условие: $D_{acc} + L_{new} * D_{tr,new} \leq D_{max}$;

с. Если условие не выполняется, дуга исключается из рассмотрения или ей присваивается запретительно высокий вес.

4. Избегание запретных зон: узлы и дуги, попадающие в зоны, где строительство запрещено (водоохранные зоны, особо защитные участки и т.д.), удаляются из графа или получают бесконечный вес.

Данные LiDAR, особенно полученные с БПЛА [Matinnia et al., 2018], являются основным источником для построения модели:

- Создание ЦМР: облако точек LiDAR обрабатывается для фильтрации растительности и построения высокоточной ЦМР. Точность ЦМР, достигаемая современными системами LiDAR, может составлять сантиметры по высоте [Hrůza et al., 2018; Matinnia et al., 2018, İnan, Öztürk, 2022], что критически важно для точного расчета уклонов и оценки земляных работ.

- Извлечение параметров: с помощью ГИС из ЦМР извлекаются: высотные отметки узлов графа z_i , уклоны S_e для всех дуг графа e , гидрологическая сеть (происходит идентификация водотоков и точек их пересечения с потенциальными сегментами дороги [Watanabe et al., 2023]), неблагоприятные участки (выявляются зоны с чрезмерными уклонами, потенциально оползневые участки [Watanabe et al., 2023], заболоченные территории на основе анализа производных ЦМР (кривизна, топографический индекс влажности и т.п.));

- Построение графа и стоимостей: данные ЦМР и извлеченные параметры используются для построения графа $G = (V, E)$ и расчета стоимостей c_e для каждой дуги согласно формулам (2) или (6).

Обсуждение. Описанная задача является задачей поиска кратчайшего пути во взвешенном графе. Для ее решения применяются стандартные алгоритмы:

- Алгоритм Дейкстры: гарантирует нахождение оптимального пути от источника ко всем остальным узлам [Shin, 2022];
- Алгоритм A*: часто более эффективен для поиска пути между двумя конкретными точками s и t ;
- ГИС-инструменты: большинство ГИС-пакетов имеют встроенные инструменты для анализа сетей и поиска кратчайшего пути, основанные на этих алгоритмах [Watanabe et al., 2023].

Если требуется соединить множество точек (несколько лесосек), задача усложняется до задачи поиска дерева Штейнера минимальной стоимости, которая является NP-трудной [Пятин, 2020]. В таких случаях используются эвристические алгоритмы (MST, SPOH, RT) [Shin, 2022].

Предложенная математическая модель, использующая высокоточные данные LiDAR, позволяет значительно улучшить процесс проектирования лесных дорог по сравнению с традиционными методами. Основные преимущества заключаются в объективности, скорости и возможности анализа большого числа вариантов [Hatta Antah et al., 2021]. Точность ЦМР, получаемой с помощью LiDAR, позволяет детально учитывать рельеф и минимизировать объемы дорогостоящих земляных работ [Krogstad, Schiess, 2004; İnan, Öztürk, 2022]. Идентификация водотоков и неблагоприятных участков на ранней стадии помогает избежать ошибок и снизить будущие эксплуатационные расходы [Shin, 2022; Watanabe et al., 2023].

Тем не менее важно понимать ограничения модели. Точность результата напрямую зависит от качества исходных данных LiDAR и корректности их обработки [Krogstad, Schiess, 2004; Matinnia et al., 2018]. Модель стоимости является упрощенной и требует калибровки для конкретных условий [Aka, 2006; Jaafari et al., 2021]. Явный расчет и балансировка земляных работ остаются задачами детального проектирования. Вычислительная сложность может стать проблемой для очень больших территорий, требуя эффективных реализаций алгоритмов поиска пути [Shin, 2022].

Заключение. Интеграция математического моделирования с данными воздушного лазерного сканирования (LiDAR) открывает новые возможности для оптимизации проектирования сети лесных автомобильных дорог. Представленная модель позволяет находить экономически эффективные трассы, минимизируя затраты на строительство с учетом рельефа, длины и пересечений водотоков. Использование высокоточных ЦМР, созданных по данным LiDAR, обеспечивает детальный учет местности и повышает качество проектных решений. Данный подход способствует переходу к более

объективному, быстрому и экономически обоснованному процессу проектирования лесной дорожной инфраструктуры, что является важным шагом на пути к устойчивому лесопользованию.

Вместе с тем дальнейшее развитие представленной модели предполагает интеграцию данных о типах грунтов на территории проектирования. Учет геологических условий является критически важным, поскольку тип грунта напрямую влияет на стоимость и сложность земляных работ: разработка скальных, мерзлых или переувлажненных грунтов существенно затратнее по сравнению с более податливыми грунтами. Кроме того, несущая способность основания, определяемая типом грунта, диктует требования к конструкции дорожной одежды и ее стоимости. Устойчивость откосов насыпей и выемок также зависит от характеристик грунта, что может потребовать изменения геометрии земляного полотна или применения специальных мер по укреплению. Включение информации о пространственном распределении различных типов грунтов, полученной из почвенных карт или данных инженерно-геологических изысканий, позволит дифференцировать затраты на отдельных участках трассы с большей точностью. Это усовершенствование повысит адекватность модели и надежность экономического обоснования при выборе оптимального маршрута лесной дороги, особенно в районах со сложными инженерно-геологическими условиями, способствуя принятию еще более взвешенных проектных решений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Абдельвахаб М.А.Х. Обоснование методики проектирования производства земляных работ при строительстве лесовозных автомобильных дорог: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2020. 20 с.

Катаров В.К., Рожин Д.В., Сюнёв В.С. Оптимальное проектирование сети лесных дорог: от методов к решениям // *Resources and Technology*. 2023. Т. 20, № 3. С. 32–47.

Пятин Д.С. Совершенствование методов решения задачи автоматизированного планирования сети лесных дорог // *Инженерный вестник Дона*. 2020. № 4 (64). Ст. № 6428.

Akay A.E. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model // *Sadhana*. 2006. Vol. 31, iss. 5. P. 621–633.

Hatta Antah F., Khoiry M.A., Abdul Maulud K.N., Abdullah A. Perceived Usefulness of Airborne LiDAR Technology in Road Design and Management: A Review // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Art. no. 11773.

Heinimann H.R. Forest Road Network and Transportation Engineering – State and Perspectives // *Croatian journal of forest engineering*. 2017. Vol. 38, iss. 2. P. 155–173.

Hruža P., Mikita T., Tyagur N., Krejza Z., Cibulka M., Procházková A., Patočka Z. Detecting Forest Road Wearing Course Damage Using Different Methods of Remote Sensing // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, iss. 4. Art. no. 492.

Inan M., Öztürk T. A simple approach on forest roads drainage structures planning using GIS: A case study of Şile-Turkey // *Anatolian Journal of Forest Research*. 2022. Vol. 8, iss. 2. P. 104–110.

Jaafari A., Pazhouhan I., Bettinger P. Machine Learning Modeling of Forest Road Construction Costs // *Forests*. 2021. Vol. 12, iss. 9. Art. no. 1169.

Kardoš M., Sačkov I., Tomašтик J., Basista I., Borowski Ł., Ferenčík M. Elevation Accuracy of Forest Road Maps Derived from Aerial Imaging, Airborne Laser Scanning and Mobile Laser Scanning Data // *Forests*. 2024. Vol. 15, iss. 5. Art. no. 840.

Krogstad F., Schiess P. The allure and pitfalls of using LiDAR topography in harvest and road design // Joint Conference of IUFRO 3.06 Forest Operations under Mountainous Conditions and the 12th International Mountain Logging Conference. 2004. 10 p.

Layton D.A., LeDoux C.B., Hassler C.C. Cost Estimators for Construction of Forest Roads in Central Appalachians. USDA Forest Service, NE-RP-665, 1992. 4 p.

Matinnia B., Parsakhoo A., Mohamadi J., Shataee Jouibary S. Study of the LiDAR accuracy in mapping forest road alignments and estimating the earthwork volume // *Journal of Forest Science*. 2018. Vol. 64, iss. 11. P. 469–477.

Shin J. Road-network location heuristics for the tactical harvest scheduling model: master's thesis. Lakehead University, 2022. 53 p.

Watanabe M., Saito M., Toda K., Shirasawa H. Rain-Driven Failure Risk on Forest Roads around Catchment Landforms in Mountainous Areas of Japan // *Forests*. 2023. Vol. 14, iss. 3. Art. no. 537.

References

Abdelwahab M.A.Kh. Substantiation of methodology for designing earthwork production during the construction of timber transport roads: author's abstract. Diss. ... Cand. Tech. Sci. St. Petersburg, 2020. 20 p. (In Russ.)

Akay A. E. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model. *Sadhana*, 2006, vol. 31, iss. 5, pp. 621–633.

Hatta Antah F., Khoiry M.A., Abdul Maulud K.N., Abdullah A. Perceived Usefulness of Airborne LiDAR Technology in Road Design and Management: A Review. *Sustainability*, 2021, vol. 13, art. no. 11773.

Heinimann H.R. Forest Road Network and Transportation Engineering – State and Perspectives. *Croatian journal of forest engineering*, 2017, vol. 38, iss. 2, p. 155–173.

Hruža P., Mikita T., Tyagur N., Krejza Z., Cibulka M., Procházková A., Patočka Z. Detecting Forest Road Wearing Course Damage Using Different Methods of Remote Sensing. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 4, art. no. 492.

Inan M., Öztürk T. A simple approach on forest roads drainage structures planning using GIS: A case study of Şile-Turkey. *Anatolian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 8, iss. 2, pp. 104–110.

Jaafari A., Pazhouhan I., Bettinger P. Machine Learning Modeling of Forest Road Construction Costs. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 9, art. no. 1169.

Kardoš M., Sačkov I., Tomašík J., Basista I., Borowski L., Ferenčík M. Elevation Accuracy of Forest Road Maps Derived from Aerial Imaging, Airborne Laser Scanning and Mobile Laser Scanning Data. *Forests*, 2024, vol. 15, iss. 5, art. no. 840.

Katarov V.K., Rozhin D.V., Syunyov V.S. Optimal Design of Forest Road Networks: From Methods to Solutions. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 3, pp. 32–47. (In Russ.)

Krogstad F., Schiess P. The allure and pitfalls of using LiDAR topography in harvest and road design. *Joint Conference of IUFRO 3.06 Forest Operations under Mountainous Conditions and the 12th International Mountain Logging Conference*. 2004, 10 p.

Layton D.A., LeDoux C.B., Hassler C.C. Cost Estimators for Construction of Forest Roads in Central Appalachians. USDA Forest Service, NE-RP-665, 1992. 4 p.

Matinnia B., Parsakhoo A., Mohamadi J., Shataee Jouibary S. Study of the LiDAR accuracy in mapping forest road alignments and estimating the earthwork volume. *Journal of Forest Science*, 2018, vol. 64, iss. 11, pp. 469–477.

Pyatin D.S. Improving Methods for Solving the Problem of Automated Planning of Forest Road Networks. *Engineering Bulletin of the Don*, 2020, no. 4 (64), art. no. 6428. (In Russ.)

Shin J. Road-network location heuristics for the tactical harvest scheduling model: master's thesis. Lakehead University, 2022. 53 p.

Watanabe M., Saito M., Toda K., Shirasawa H. Rain-Driven Failure Risk on Forest Roads around Catchment Landforms in Mountainous Areas of Japan. *Forests*, 2023, vol. 14, iss. 3, art. no. 537.

Материал поступил в редакцию 15.05.2025

Эйвазов А.Ф., Зубова О.В. Математическая модель оптимизации проектирования сети лесных автомобильных дорог с использованием данных дистанционного зондирования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 468–479. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.468-479

Эффективное проектирование сети лесных дорог является ключевым фактором для оптимизации затрат на лесозаготовительные операции, лесоуправление и обеспечение устойчивого доступа к лесным ресурсам. Традиционные подходы к проектированию часто сталкиваются с проблемами высокой стоимости, трудоемкости и ограниченной точности исходных данных,

особенно в сложных рельефных условиях и под густым лесным пологом. Данная статья представляет математическую модель, разработанную для автоматизированного проектирования и оптимизации трасс лесных автомобильных дорог. Территория проектирования дискретизируется и представляется в виде взвешенного графа, где узлы соответствуют точкам на цифровой модели рельефа (ЦМР), а дуги – потенциальным сегментам дороги. Модель направлена на минимизацию суммарной стоимости строительства дороги. Эта стоимость рассчитывается с учетом длины каждого сегмента трассы с поправкой на рельеф, продольный уклон, влияющий на объемы земляных работ (насыпей и выемок) через специальный коэффициент удорожания, а также необходимость устройства водопропускных сооружений при пересечении водотоков. Особое внимание уделяется интеграции в модель высокоточных данных о рельефе местности, полученных с помощью современных методов дистанционного зондирования Земли, в частности, воздушного лазерного сканирования (LiDAR), в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Применение LiDAR позволяет получать высокоточные ЦМР, эффективно проникая сквозь лесной полог, что критически важно для точного моделирования рельефа, выявления оптимальных коридоров, идентификации препятствий (переувлажненных или оползнеопасных участков) и оптимизации объемов земляных работ. В статье описаны математическая постановка задачи оптимизации как поиск кратчайшего пути на графе, целевая функция минимизации затрат, система ограничений. Рассмотрены методы получения исходных данных из облаков точек LiDAR: создание ЦМР, извлечение высотных отметок, расчет уклонов и идентификация пересечений с гидрографической сетью с применением геоинформационных систем (ГИС). Разработанная модель, использующая алгоритмы поиска оптимального пути (Дейкстры, A*), создает основу для объективного, быстрого и экономически обоснованного выбора оптимального варианта трассы лесной дороги, способствуя повышению качества проектных решений. Авторы также указывают на перспективы дальнейшего развития модели, включая интеграцию данных о типах грунтов.

Ключевые слова: лесная дорога, оптимизация проектирования, LiDAR, БПЛА, цифровая модель рельефа, ГИС, стоимость строительства.

Eyvazov A.F., Zubova O.V. A mathematical model for optimizing the design of a forest highway network using remote sensing data. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicoskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 468–479 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.468-479

Effective design of forest road networks is crucial for optimizing logging costs, forest management, and sustainable access to resources. Traditional approaches often suffer from high costs, labor intensity, and limited accuracy of initial data, especially in complex terrain and dense forests. This article presents a mathematical model for

computer-aided design and optimization of forest road routes. The project area is discretized as a weighted graph, with nodes representing points on the digital terrain model (DEM) and arcs representing potential road segments. The model aims to minimize total construction cost, considering segment length, terrain, longitudinal slope (affecting earthwork volumes) via a special appreciation coefficient, and the need for culverts at watercourse crossings. Special attention is given to integrating highly detailed terrain data obtained through airborne laser scanning (LiDAR), including unmanned aerial vehicles (UAVs). LiDAR enables high-precision DEMs that penetrate the forest canopy, which is essential for accurate terrain modeling, identifying optimal corridors, obstacles (e.g., waterlogged or landslide-prone areas), and optimizing earthwork volumes. The article details the mathematical formulation as a shortest path problem on a graph, with a cost-minimizing objective function and constraints. Methods for extracting initial data from LiDAR point clouds are discussed: DEM creation, elevation extraction, slope calculation, and hydrographic network analysis using GIS. The developed model, utilizing optimal path algorithms (Dijkstra, A*), provides an objective, efficient, and economically justified choice of forest road routes, enhancing design quality. The authors also discuss prospects for further model development, including integrating soil type data.

Key words: forest road, design optimization, LiDAR, UAV, digital terrain model, GIS, construction cost.

ЭЙВАЗОВ Али Фируддинович – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 8022-1192. ORCID: 0009-0005-3229-8459.

194021, Институтский пер., д. 5, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: thefezerstyle@gmail.com

EYVAZOV Ali F. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8022-1192. ORCID: 0009-0005-3229-8459.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg, Russia. E-mail: thefezerstyle@gmail.com

ЗУБОВА Оксана Викторовна – доцент кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 6997-4065. ORCID: 0000-0002-6263-4688.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ok_z19@mail.ru

ZUBOVA Oksana V. – PhD (Technical), Associate Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6997-4065. ORCID: 0000-0002-6263-4688.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg, Russia. E-mail: ok_z19@mail.ru