

## Геоинформационное обеспечение при трассировании лесовозных дорог: от алгоритмов к оптимальным решениям

О.Н. Бурмистрова<sup>a</sup>, С.В. Меньшиков<sup>b</sup>

Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская 13, Ухта, Республика Коми, Россия

<sup>a</sup> oburmistrova@ugtu.net, <sup>b</sup> serg2vk@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0000-8430-6848>

Статья поступила 13.11.2024, принята 27.12.2024

*В статье представлен разбор способов оптимизации транспортной инфраструктуры лесопромышленного комплекса в рамках стратегии развития лесного сектора в России до 2030 г. Основное внимание уделяется алгоритмам, способствующим развитию транспортной инфраструктуры и внедрению передовых технологий с целью обеспечения эффективного использования лесных участков. Внимание уделено анализу транспортной схемы, которая включает детальный план дорожной сети, улучшающий доступ к лесным ресурсам, обеспечивающий эффективное перемещение грузов и учитывающий экологические аспекты сохранения природной среды. Для достижения оптимального решения применяются разнообразные научные алгоритмы, включая метод Монте-Карло и динамическое программирование. Метод Монте-Карло используется для моделирования случайных событий и проведения различных видов статистического анализа, что помогает в выборе оптимальных транспортных решений. Динамическое программирование позволяет решать сложные задачи путем разбиения их на более простые подзадачи, что способствует повышению эффективности эксплуатации лесных ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Важно отметить, что результаты исследования указывают на то, что применение различных алгоритмов в процессе усовершенствования сети лесных дорог играет важную роль в улучшении эффективности лесопользования и снижении негативного воздействия на окружающую среду в рамках стратегии развития лесного комплекса. Для достижения этих целей процесс повышения эффективности транспортной инфраструктуры включает в себя подбор оптимальных параметров, направленных на минимизацию выбранного критерия, с применением метода Монте-Карло. В рамках данного процесса активно разрабатывается модель, которая помогает идентифицировать ключевые точки, необходимые для эффективного строительства дорожной инфраструктуры. Они позволяют оптимизировать размещение лесопромысловых дорог, учитывая различные факторы, такие как экономические затраты, техническое обслуживание и экологические аспекты. Все эти аспекты направлены на повышение эффективности и качества проектирования транспортной инфраструктуры в лесопромышленном комплексе, что способствует более рациональному использованию лесных ресурсов и содействует устойчивому развитию лесного сектора.*

**Ключевые слова:** лесная дорога; оптимальное проектирование; геоинформационные системы.

## Geoinformation support of forest roads tracing: from algorithms to optimal solutions

O.N. Burmistrova<sup>a</sup>, S.V. Menshikov<sup>b</sup>

Ukhta State Technical University; 13, Pervomayskaya St., Ukhta, Republic of Komi

<sup>a</sup> oburmistrova@ugtu.net, <sup>b</sup> serg2vk@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0000-8430-6848>

Received 13.11.2024, accepted 27.12.2024

*The article presents the analysis of ways to optimize the transport infrastructure of the timber industry complex within the framework of the strategy of the forest sector development in Russia until 2030. The main attention is paid to algorithms that promote the development of transport infrastructure and the introduction of advanced technologies in order to ensure the efficient use of forest areas. Attention is paid to the analysis of the transport scheme, which includes a detailed road network plan that optimizes access to forest resources, ensures efficient movement of goods and takes into account environmental aspects of preserving the natural environment. A variety of scientific algorithms, including the Monte Carlo method and dynamic programming, are applied to achieve an optimal solution. The Monte Carlo method is used to simulate random events and perform statistical analyses to help optimize the selection of optimal transport solutions. Dynamic programming allows complex problems to be solved by breaking them down into simpler sub-problems, which helps to improve the efficiency of forest resource exploitation and reduce negative environmental impacts. A variety of scientific algorithms, including the Monte Carlo method and dynamic programming, are applied to reach the optimal solution. The Monte Carlo method is used to simulate random events and perform statistical analyses to help optimize the selection of optimal transport solutions. Dynamic programming allows complex problems to be solved by breaking them down into simpler sub-problems, which helps to improve the efficiency of forest resource exploitation and reduce negative environmental impacts. It is important to note that the results of the study indicate that the application of different algorithms in the process of forest road network optimization plays an important role in improving the efficiency of forest management and reducing the negative impact on the environment within the framework of the forest complex development strategy. To achieve these goals, the optimization process of transport infrastructure in-*

cludes the selection of optimal parameters aimed at minimizing the selected criterion, using the Monte Carlo method. As part of this process, a model is being actively developed to help identify the key points required for efficient construction of road infrastructure. These key points make it possible to optimize the placement of forest roads, taking into account various factors such as economic costs, maintenance and environmental aspects. All these aspects are aimed at improving the efficiency and quality of transport infrastructure design in the forestry sector, which contributes to a more rational use of forest resources and promotes sustainable development of the forestry sector.

**Keywords:** forest road; optimal design; geographic information systems.

**Введение.** В рамках стратегии развития лесного комплекса в России до 2030 г. было принято решение о применении комплексных мер для сохранения и управления лесными ресурсами [1]. Эта стратегия направлена на обеспечение устойчивого развития лесопромышленного комплекса и эффективного использования лесных угодий с учетом сохранения экосистем.

Один из ключевых аспектов данной стратегии – это развитие транспортной инфраструктуры и внедрение передовых технологий, которые будут играть важную роль в обеспечении эффективного использования лесных участков [2]. Это включает в себя создание современных дорожных сетей, развитие транспортных маршрутов и внедрение инновационных решений для

оптимизации логистики в лесопромышленном комплексе.

**Материалы и методы исследования.** Особое внимание стоит уделить транспортной схеме (рис. 1), необходимой для осуществления освоения лесных территорий. Она представляет собой детальный план дорожной сети, который оптимизирует доступ к лесным ресурсам, обеспечивает эффективное перемещение грузов и оборудования, а также учитывает экологические аспекты сохранения природной среды [3]. Это позволяет согласовать экономические потребности с устойчивым использованием лесных ресурсов и сохранением биоразнообразия лесных экосистем.

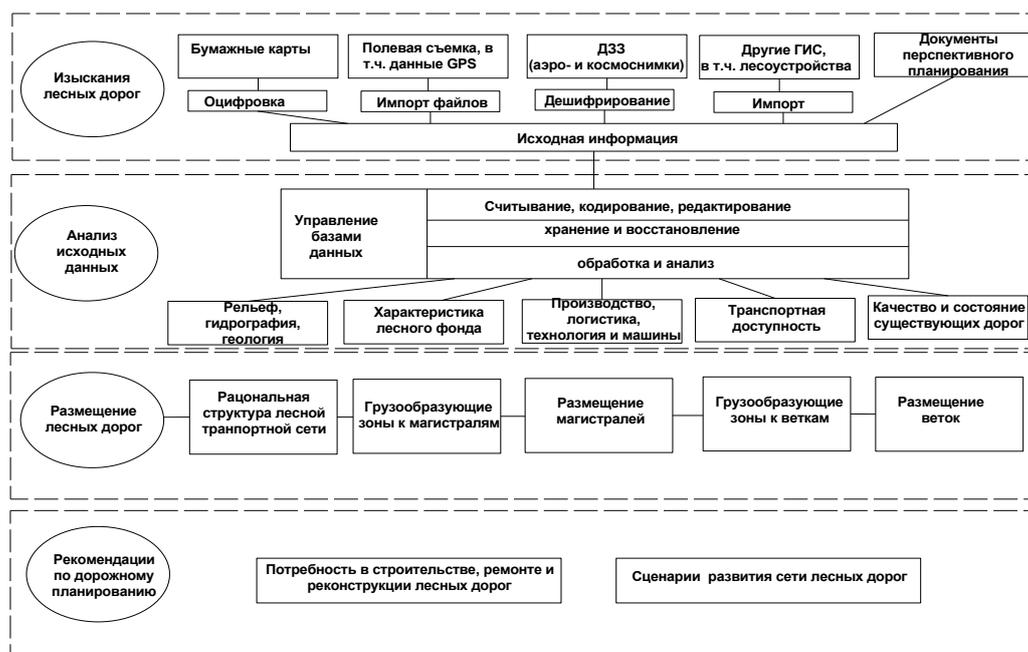


Рис. 1. Схема транспортного освоения ГИС

**Рекомендуемая плотность лесных дорог.** При разработке транспортной схемы важным этапом является анализ территориальных особенностей, определение оптимальных маршрутов, учет потенциальных экологических рисков и создание инфраструктуры для обеспечения безопасности и эффективности лесного хозяйства [4–7]. В контексте планирования развития инфраструктуры лесопромышленного комплекса необходимо провести анализ данных, выявить ключевые параметры и разработать новые транспортные маршруты [8–13]. Анализ территориальных особенностей включает в себя изучение рельефа, гидрографии, типов почв, климатических условий и других факторов, которые могут повлиять на выбор оптимальных маршрутов

для лесопромысловых дорог. Учет экологических рисков важен для минимизации негативного воздействия на окружающую среду, поэтому необходимо предусмотреть специальные меры по охране природы при планировании инфраструктуры. Создание инфраструктуры для обеспечения безопасности и эффективности лесного хозяйства включает в себя разработку системы дорог, мостов, переездов, а также обустройство лесных просек и других объектов, необходимых для лесозаготовительных работ. Эффективное планирование транспортной сети играет ключевую роль в повышении эффективности процессов лесозаготовок и управлении лесными ресурсами. Подробно разработанная транспортная сеть способствует снижению издержек, увели-

чению производительности и повышению эффективности лесопромышленного комплекса. При планировании транспортной инфраструктуры учитываются множество факторов, таких как оптимальные маршруты для доставки лесоматериалов, распределение грузов и оборудования, обеспечение доступности лесных угодий, а также учет экологических аспектов для минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Для начала требуется сбор и обработка данных о плотности лесных участков. Значения плотности временных лесных дорог и их максимальной протяженности при расстояниях трелевки 300 и 500 м и направлениях примыкания относительно грузосборочной дороги под углом 45° и 90° приведены в таблице [2].

Модернизированная транспортная сеть позволяет сократить временные и финансовые затраты на доставку лесопродукции, улучшить логистику и координацию деятельности в лесопромышленном комплексе. Это способствует повышению эффективности работы предприятий лесной отрасли, улучшению качества производства и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

**Таблица.** Рекомендуемая плотность лесных дорог

Расстояние трелевки, м	Направление под углом 45°				Направление под углом 90°			
	Расстояние между лесовозными ветками, км							
	4	5	6	7	4	5	6	7
Плотность временных лесных дорог, км/1000 га								
300	18,9	20,0	20,1	20,8	20,4	21,1	21,6	21,9
500	15,0	15,6	15,5	15,4	18,0	19,2	20,0	20,6
Максимальная протяженность, км								
300	2,3	2,9	3,5	4,1	2,0	2,6	3,2	3,8
500	1,8	2,4	3,0	3,6	2,4	2,4	3,6	4,2

Следующим не менее важным алгоритмом в трасировании лесовозных дорог является совершенствование плотности лесных дорог с целью повышения эффективности использования ресурсов и снижения негативного воздействия на природную среду [6–16]. Для этого следует выбирать методики, основанные на научных исследованиях и адаптированные к конкретным условиям [10–16]. Оптимизация сети дорог направлена на сравнение расходов на перевозку лесоматериалов и строительство. Для этой цели используются специальные формулы, что позволяет снизить издержки на строительство и транспортировку лесных материалов путем более эффективного использования дорожной инфраструктуры:

$$L = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{C \cdot M \cdot T}{Q \cdot A}} \quad (1)$$

$$V = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot A \cdot M \cdot T}{C}} \quad (2)$$

где  $L$  – оптимальное расстояние между точками;  $V$  – оптимальная интенсивность движения;  $A$  – затраты на процесс;  $C$  – стоимость услуг;  $Q$  – объем производства;  $M$  – коррекция в зависимости от обстоятельств;  $T$  – коэффициент влияния.

**Оптимизация лесных дорожных сетей.** В лесопромышленном комплексе вопрос рационального использования лесных дорог представляет собой сложную многопараметрическую задачу, где значимыми факторами являются следующие: длина дороги, плотность сети, затраты на строительство и обслуживание, объем лесных ресурсов, топографические особенности местности, а также коэффициент сети дорог [17–19].

В Республике Карелия используются различные научные методы, включая метод Монте-Карло и динамическое программирование, для усовершенствования сетей лесных дорог с целью повышения эффективности эксплуатации лесных ресурсов и снижения экологического воздействия [14]. При повышении эффективности использования транспортной инфраструктуры необходимо учитывать объемы перевозок, соблюдать нормативные требования и стремиться к минимизации издержек. Часто основным критерием является сумма приведенных затрат.

В контексте лесной инфраструктуры, совершенствование сетей лесных дорог имеет ключевое значение для обеспечения эффективной лесозаготовки, транспортировки и обработки лесопродукции. Учитывая сложность задачи, моделирование и анализ данных становятся неотъемлемой частью процесса принятия решений. Пример визуализации затрат, которые являются важным критерием при оптимизации транспортной инфраструктуры в лесопромышленном комплексе. Применение научных методов и инновационных подходов в планировании и оптимизации лесных дорог позволяет улучшить использование лесных ресурсов, снизить негативное воздействие на окружающую среду и обеспечить устойчивое развитие лесопромышленного комплекса в целом. Для лесных дорожных сетей сумма приведенных затрат может быть определена по формуле:

$$K = \sum_{t=1}^{T_c} \frac{C_t}{(1+E_{НП})^t} + \sum_{t=1}^{T_3} \frac{\Delta_t + M_t}{(1+E_{НП})^t}, \quad (3)$$

где  $C_t$  – ежегодные инвестиции в развитие транспортной инфраструктуры;  $\Delta_t$  – годовые расходы на обслуживание дорог;  $M_t$  – операционные издержки;  $T_c$  – время завершения проекта по модернизации дорожной сети;  $T_3$  – срок эксплуатации дороги до достижения предельного износа;  $E_{НП}$  – стандарт для учета различных временных затрат.

Проектирование транспортной инфраструктуры в лесопромышленном комплексе требует учета множества факторов, включая финансовые затраты на капиталовложения, техническое обслуживание, временные рамки завершения проекта, продолжительность эксплуатации и общую эффективность. Важно учитывать все эти аспекты для обеспечения успешной реализации про-

ектов по развитию транспортной инфраструктуры в соответствии с поставленными целями и стандартами.

Финансовые затраты на капиталовложения включают в себя расходы на строительство дорог, мостов, путей сообщения, закупку специализированной техники и другие инвестиции, которые необходимы для создания и развития транспортной сети в лесистых районах. Эффективное планирование бюджета позволяет оптимизировать расходы и добиться максимальной отдачи от инвестиций. Техническое обслуживание транспортной инфраструктуры включает в себя регулярное техническое обслуживание дорог, ремонт и обновление инфраструктуры, а также обеспечение безопасности движения транспортных средств. Правильное планирование технического обслуживания помогает продлить срок службы инфраструктуры и снизить риски аварийных ситуаций. Временные рамки завершения проекта важны для контроля над ходом строительства и планирования дальнейших этапов развития транспортной сети.

Соблюдение сроков позволяет избежать задержек в реализации проектов и минимизировать финансовые потери. Продолжительность эксплуатации инфраструктуры важна для обеспечения ее эффективности и устойчивости. Планирование долгосрочной эксплуатации позволяет учесть износ материалов, изменения в технологиях и потребностях лесопромышленного комплекса, обеспечивая сохранение функциональности и конкурентоспособности транспортной системы [19]. В математической терминологии проблема выбора оптимальной конфигурации дорожной сети может быть сформулирована как задача поиска наилучшего вектора  $X_{\text{ОПТ}}$ , который соответствует всем строительным нормам и правилам, и при этом минимизирует критерий оптимизации  $K$ :

$$K(X_{\text{ОПТ}}) = \min K(X) \quad (4)$$

$$X_{\text{ОПТ}} \in X, \quad (5)$$

где  $X$  – множество векторов-решений дорожной сети.

Процесс оптимизации транспортной инфраструктуры предполагает подбор оптимальных параметров, соответствующих установленным стандартам и направленных на минимизацию выбранного критерия. Для нахождения данного решения используется метод Монте-Карло, который включает в себя создание и анализ статистических вариантов дорожной сети. Этот подход позволяет эффективно усовершенствовать транспортную инфраструктуру, учитывая различные факторы и требования, что способствует повышению эффективности и качества проектирования [17–21]. Определение наилучшего решения сети с помощью метода Монте-Карло включает в себя следующее. Сначала создаются случайные статистические варианты дорожной сети. Количество вариантов определяется с использованием специальной формулы:

$$N_c = \frac{\lg(1-P)}{\lg(1-\Delta)}, \quad (6)$$

где  $P$  представляет вероятность обнаружения идеального варианта сети;  $\Delta$  обозначает степень точности при поиске наиболее выгодного решения.

**Результаты и обсуждение. Оптимальное решение в трассировании лесовозных дорог.** На сегодняшний день активно ведется разработка модели, направленной на выявление ключевых точек, которые являются неотъемлемыми для эффективного строительства дорожной инфраструктуры [22, 23]. Эти ключевые точки представляют собой важные факторы, определяющие оптимальное местоположение для возведения дорог, мостов, тоннелей и других элементов, которые оказывают влияние на качество и эффективность лесных дорожных сетей.

В рамках проводимого исследования изучаются различные алгоритмы, направленные на улучшение процесса усовершенствования сети лесных дорог. Результаты, получаемые в ходе расчетов алгоритмов, могут быть систематизированы и записаны в специальную базу данных, что позволит ученым и специалистам в области лесного хозяйства иметь доступ к актуальной информации для разработки эффективных стратегий развития лесопромышленного комплекса [21]. Разработка такой модели позволяет специалистам в области лесного хозяйства и транспортного проектирования проводить анализ и прогнозирование наиболее эффективных мест для размещения ключевых элементов инфраструктуры, учитывая различные параметры, такие как топография местности, объемы лесорубочных работ, планируемые объемы перевозок и экологические аспекты.

Выявление и правильное размещение ключевых точек на лесных территориях имеет стратегическое значение для обеспечения эффективности и устойчивости лесопромышленного комплекса. Это позволяет минимизировать издержки на строительство и обслуживание дорог, улучшить логистику лесозаготовок и снизить негативное воздействие на окружающую природную среду. Таким образом, разработка модели для выявления ключевых точек важна для повышения эффективности и устойчивости лесных дорожных сетей, что способствует развитию лесопромышленного комплекса в целом.

Пользователям предоставляется возможность задать количество целевых точек, на основе чего специализированная программа автоматически предлагает оптимальные решения [24]. При необходимости пользователь может внести корректировки в выбор, что позволяет улучшить результаты и учесть дополнительные факторы, влияющие на улучшение сети лесных дорог. Далее происходит создание картографического изображения с использованием метода интерполяции IDW, которое отображает уровни оптимальности для обработки древесных материалов [25]. Это позволяет визуализировать данные и результаты улучшения, что облегчает понимание и анализ информации специалистами и заинтересованными сторонами.

Исследование, проведенное в Петрозаводском государственном университете, привело к разработке компьютерной системы, предназначенной для оптимизации

ции проектирования лесных дорожных сетей. Система обладает множеством входных данных и быстро адаптируется под изменяющиеся события, что позволяет

эффективно управлять и улучшать лесную инфраструктуру в соответствии с требованиями и изменениями в окружающей среде (рис. 2).



Рис. 2. Схема структуры информационно-вычислительной системы

При проектировании транспортной сети в лесистых территориях уделяется особое внимание оптимизации размещения лесопромышленных дорог. Географические информационные системы играют значимую роль в этом процессе, обеспечивая возможность анализа различных вариантов транспортных маршрутов и выбора наилучших решений на основе данных геопространственных анализов.

Результаты моделирования лесных дорог представлены в виде модели, демонстрирующей оптимальное размещение дорожной инфраструктуры в лесистых районах со всеми необходимыми расчетами размеров и другими техническими параметрами. Это визуальное представление позволяет оценить эффективность выбранных маршрутов, учитывая как экономические, так и экологические аспекты развития лесного хозяйства.

В результате полученная модель представляет собой инструмент, который может служить основой для принятия обоснованных решений по планированию и совершенствованию транспортной инфраструктуры в лесных территориях. Эта модель учитывает различные параметры, такие как типы транспорта, расстояния, объемы перевозок, топография местности, спрос на лесопroduкцию и другие факторы, что позволяет проводить анализ и симуляции для распределения ресурсов и разработки эффективных стратегий лесопользования. Анализ данных, полученных из моделирования, и визуализация результатов играют важную роль в процессе принятия решений инженерами и специалистами по лесному хозяйству. Благодаря этому инструменту они могут оценить различные варианты планирования транспортной инфраструктуры, просчитать потенциальные риски и выгоды, а также принять информированные решения, направленные на улучшение управления лесными ресурсами.

Эффективное использование моделирования и анализа данных в планировании транспортной инфраструктуры на лесных территориях играет критическую роль в обеспечении устойчивого развития лесопромышленного комплекса. Этот подход позволяет инженерам и специалистам по лесному хозяйству принимать обоснованные решения, основанные на фактах и цифрах, что способствует оптимизации лесозаготовок и улучшению управления лесными ресурсами. Путем моделирования различных сценариев и анализа данных о транспортной инфраструктуре специалисты могут выявить наиболее выгодные решения, учитывая различные параметры, такие как объемы перевозок, длины путей, топографические особенности и экологические факторы. Это позволяет сократить издержки на транспортировку лесопroduкции, повысить эффективность лесозаготовок и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Применение современных технологий моделирования и анализа данных помогает также предотвращать неэффективное использование лесных ресурсов, снижать риск незаконной вырубке и сохранять биоразнообразие лесных экосистем. Таким образом, использование данных методов в планировании транспортной инфраструктуры лесных территорий не только способствует экономическому развитию лесопромышленного комплекса, но и является важным инструментом для сохранения природных ресурсов и поддержания экологического равновесия в лесах.

**Заключение.** Таким образом, по мнению авторов, применение различных алгоритмов в процессе совершенствования сети лесных дорог играет важную роль в улучшении эффективности лесопользования и снижении негативного воздействия на окружающую среду в рамках стратегии развития лесного комплекса.

Процесс повышения эффективности лесных дорожных сетей требует учета множества факторов, включая финансовые затраты, техническое обслуживание, временные рамки и другие параметры. Финансовые затраты включают в себя расходы на строительство, ремонт и техническое обслуживание дорог, закупку специализированной техники, обучение персонала и другие издержки, необходимые для обеспечения надежного функционирования лесных дорожных сетей. Техническое обслуживание лесных дорожных сетей включает в себя регулярное обслуживание, ремонт, укрепление и модернизацию дорожных покрытий, а также обеспечение безопасности движения и проходимости дорог. Эффективное техническое обслуживание позволяет продлить срок службы дорог, снизить вероятность аварийных ситуаций и обеспечить бесперебойное движение по лесным территориям. Учет временных рамок важен для планирования и реализации проектов по оптимизации лесных дорожных сетей. Соблюдение сроков позволяет контролировать ход работ, предотвращать задержки и обеспечивать своевременное внедрение улучшений в инфраструктуру.

В результате комплексных исследований, выполненных авторами и представленных в настоящей работе, предложены некоторые рекомендации:

1. Применение метода Монте-Карло и других научных подходов позволяет проводить комплексный анализ данных, усовершенствовать планы развития лесных дорожных сетей и принимать обоснованные решения на основе статистических расчетов и моделирования. Эти методы помогают выявить наиболее рациональные решения, способствующие улучшению эффективности использования лесных ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Развитие транспортной инфраструктуры в лесопромышленном комплексе с учетом оптимизации лесных до-

рожных сетей является ключевым аспектом стратегии устойчивого развития лесного сектора. Продвижение новых технологий и научных методов в лесном хозяйстве играет важную роль в обеспечении эффективного управления лесными ресурсами. Это позволяет совершенствовать методы лесозаготовок, лесопользования и лесозащиты, а также повышать производительность и экологическую устойчивость лесопромышленного комплекса.

2. Внедрение новых технологий в лесное хозяйство играет ключевую роль в автоматизации процессов, улучшении качества работ, сокращении временных и финансовых затрат, а также снижении рисков негативного воздействия на окружающую среду. Этот подход позволяет современным лесным предприятиям повысить эффективность своей деятельности и сделать ее более устойчивой. Научные методы и инновационные технологии играют важную роль в сборе и анализе данных о лесных ресурсах.

3. Благодаря использованию современных средств сбора информации, таких как дистанционное зондирование, геоинформационные системы и дроны, специалисты могут получить более точные и полные данные о состоянии лесов. Это позволяет улучшить использование лесопродукции, планировать лесозаготовки более эффективно и разрабатывать устойчивые стратегии управления лесами. Применение новейших технологий также способствует созданию баланса между экономической выгодой от использования лесных ресурсов и экологической ответственностью перед природой. Благодаря оптимизации процессов и снижению воздействия на окружающую среду, лесопользователи могут сохранять биоразнообразие и устойчивость лесных экосистем. Это важно не только для сохранения природных ресурсов, но и для обеспечения устойчивого развития лесопромышленного комплекса в целом.

#### *Литература*

1. Официальное государственное распоряжение «Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». Утверждено распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.09.2018 № 1989-р. [Электронный ресурс]. <http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdIxID77KCTL.pdf> (дата обращения 23.04.2024).
2. Приказ от министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации СП 288.1325800.2016. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства. Утверждено приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16.12.2016 № 952/пр. [Электронный ресурс]. <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14471/> (дата обращения 21.04.2024).
3. Скворцов А.В., Поспелов П.И., Котов А.А. Геоинформатика в дорожной отрасли. М.: Изд-во Моск. автомобил.-дорож. гос. технич. ун-та, 2005. 250 с.
4. Герасимов Ю.Ю. Совершенствование системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог // Уч. записки Петрозаводск. гос. ун-та, 2013. № 8 (137). С. 70-76.
5. Громская Л.Я., Симоненков М.В. Современное состояние моделирования и оптимизации лесных дорог // Лесной журнал. 2016. № 5. С. 108-122.
6. Козлов Д. Г. Информационно-интеллектуальные системы проектирования сетей лесовозных автомобильных дорог. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. аграр. ун-та, 2021. 206 с.
7. Heinimann H.R. Forest Road Network and Transportation Engineering – State and Perspectives // Croatian Journ. of Forest Engineering. 2017. Vol. 38 (2). P. 155-173.
8. Соколов А.П. Логистическая поддержка лесозаготовок. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводск. гос. ун-та, 2015. 160 с.
9. Бурмистрова О.Н., Пластинина Е.В., Воронина М.А. Математическая модель проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом климатических условий Северо-Западного региона // Изв. Коми науч. Центра. 2011. Вып. 4 (8). С. 79-84.
10. Катаров Н.В. Проектирование, строительство, содержание и ремонт лесных дорог: учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводск. гос. ун-та, 2014. 92 с.
11. Книскинен П. Строительство лесной дороги. Йозенсу: НИИ Леса Финляндии, 2014. 52 с.
12. Рожин Д.В. Применение геосинтетических материалов при строительстве лесовозных дорог // Тр. лесоинженерного факультета. 2010. № 8. С. 126-127.
13. Seo J., Kang S. Geographic information system based roadway construction planning // Canadian Journ. of Civil Engineering. 2006. Vol. 33. P. 508-520.
14. Еналеева-Бандура И.М. Принципы и методы оценки эффективности лесотранспортной сети в условиях многоце-

- левого лесопользования. Красноярск: Изд-во Сиб. гос. ун-та науки и технологий, 2022. 178 с.
15. Gumus S., Acar H.H., Toksoy D. Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting // *Environ Monit Assess.* 2008. Vol. 142. P. 109-116.
  16. Uotila E., Viitala E.-J. Optimaalinen tietiheys yksityismetsätalouden kannalta // *Metsätieteen aikakauskirja.* 1999. № 2. P. 167-179.
  17. Отраслевые и ведомственные нормативно-методические документы: интернет-документ /Рекомендации по проектированию автомобильных дорог областного и местного значения. М.: Мин. транспортного строительства СССР, 1970. 37 с. [Электронный ресурс]. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293854/4293854762.pdf> (дата обращения 20.04.2024).
  18. Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов: мат-лы Всесоюз. симпози. по пробл. автоматизации проектирования трансп. и мелиор. освоения лесн. массивов (25-27 мая 1978 г.) / Отв. ред. Г.А. Борисов. Петрозаводск: Карел. филиал АН СССР, 1979. 167 с.
  19. Борисов Г.А. Методы автоматизированного проектирования лесотранспорта. Петрозаводск: Карелия, 1978. 198 с.
  20. Болотов О.В. Автоматизированное проектирование и оптимизация транспортной схемы освоения лесосырьевой базы // *Лесной комплекс: состояние и перспективы развития: междунар. сб. науч. тр. Брянск, 2003. С. 62-65.*
  21. Расчет стоимости строительства альтернативных участков лесовозных дорог // *Транспортное дело России.* 2010. № 2 (75). С. 106-111.
  22. Теория графов: Алгоритм. Подход: перевод с англ. Э.В. Вершкова, И.В. Коновальцева / Под ред. Г.П. Гаврилова. М.: Мир, 1978. 432 с.
  23. Лотарев Д.Т. Задача Штейнера для транспортной сети на поверхности, заданной цифровой моделью // *Автоматика и телемеханика.* 1980. Т. 10. С. 104-115.
  24. Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе: учеб. пособие. Йоэнсуу: Изд-во Ун-та Йоэнсуу, 1999. 200 с.
  25. Динамическое программирование, пер. с англ. И.М. Андреевой / Под ред. Н.Н. Воробьева. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. 400 с.
  6. Kozlov D.G. Information-intelligent systems of forest road networks design. Voronezh: Publishing house of Voronezh State Agrarian University, 2021. 206 p.
  7. Heinimann H.R. Forest Road Network and Transportation Engineering – State and Perspectives // *Croatian Journ. of Forest Engineering.* 2017. Vol. 38 (2). P. 155-173.
  8. Sokolov A.P. Logistic support of logging. Petrozavodsk: Publishing house of Petrozavodsk State University, 2015. 160 p.
  9. Burmistrova O.N., Plastinina E.V., Voronina M.A. Mathematical model for designing forest roads with regard to climatic conditions of the North-West region // *Izvestia Komi Science Center.* 2011. Iss. 4 (8). P. 79-84.
  10. Katarov N.V. Design, construction, maintenance and repair of forest roads: textbook. Petrozavodsk: Izvestiya Petrozavodsk. state university, 2014. 92 p.
  11. Kiiskinen P. Forest road construction. Joensuu: Research Institute of Forestry of Finland, 2014. 52 p.
  12. Rozhin D.V. Application of geosynthetic materials in the construction of forest roads // *Proceedings of the Faculty of Forest Engineering.* 2010. № 8. P. 126-127.
  13. Seo J., Kang S. Geographic information system based roadway construction planning // *Canadian Journ. of Civil Engineering.* 2006. Vol. 33. P. 508-520.
  14. Yenaleeva-Bandura I.M. Principles and methods for assessing the efficiency of forest transportation network in the conditions of multi-target forest use. Krasnoyarsk: Publishing house of the Siberian State University of Science and Technology, 2022. 178 p.
  15. Gumus S., Acar H.H., Toksoy D. Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting // *Environ Monit Assess.* 2008. Vol. 142. P. 109-116.
  16. Uotila E., Viitala E.-J. Optimaalinen tietiheys yksityismetsätalouden kannalta // *Metsätieteen aikakauskirja.* 1999. № 2. P. 167-179.
  17. Sectoral and departmental normative and methodological documents: Internet-document /Recommendations on design of highways of regional and local importance. Moscow: Ministry of Transport Construction of the USSR, 1970. 37 p. [Electronic resource]. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293854/4293854762.pdf> (date of address 20.04.2024).
  18. Automation of design of transport and land reclamation development of forest areas: materials All-Union symposium on the problems of automation of design of transport and land reclamation development of forest areas (May 25-27, 1978) / Ed. by G.A. Borisov. Petrozavodsk: Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1979. 167 p.
  19. Borisov G.A. Methods of the automated design of forest transportation. Petrozavodsk: Karelia, 1978. 198 p.
  20. Bolotov O.V. Automated Design and Optimization of the Transport Scheme of Development of the Timber Raw Material Base // *Forest Complex: State and Prospects of Development: International Collection of Scientific Works.* Bryansk, 2003. P. 62-65.
  21. Calculation of the cost of construction of alternative sections of forest roads // *Transport business of Russia.* 2010. № 2 (75). P. 106-111.
  22. Graph Theory: Algorithm. Approach: translation from English by E.V. Vershkov, I.V. Konovaltsev / Ed. by G.P. Gavrilov. Moscow: Mir, 1978. 432 p.
  23. Lotarev D.T. Steiner problem for a transportation network on a surface given by a digital model // *Automatics and Telemechanics.* 1980. Vol. 10. P. 104-115.
  24. Andreev V.N., Gerasimov Y.Yu. Optimal decision making: theory and application in forestry complex: textbook. Joensuu: Publishing house of the University of Joensuu, 1999. 200 p.
  25. Dynamic Programming, translated from English by I.M. Andreeva / Ed. by N.N. Vorobyov. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 1960. 400 p.

### References

- 1 Official state regulation "Strategy for the development of the forestry complex of the Russian Federation until 2030". Approved by the order of the Government of the Russian Federation from 20.09.2018 № 1989-р. [Elektronnyi resurs]. <http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MOBgNpm5hSavTdxID77KCTL.pdf> (date of address 23.04.2024).
2. Order from the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation SP 288.1325800.2016. Forest roads. Rules of design and construction. Approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation from 16.12.2016 № 952/pr. [Electronic resource]. <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14471/> (date of address 21.04.2024).
3. Skvortsov A.V., Pospelov P.I., Kotov A.A. Geoinformatics in the road industry. Moscow: Publishing House of Moscow Automobile and Road State Technical University, 2005. 250 p.
4. Gerasimov Yu.Yu. Perfection of the system of optimal design of the forest highway network // *Scientific Notes of Petrazavodsk State University,* 2013. № 8 (137). P. 70-76.
5. Gromskaya L.Y., Simonenkov M.V. Current state of modeling and optimization of forest roads // *Forestry Journ.* 2016. № 5. P. 108-122.