

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМЕНИ АКАДЕМИКА В.Н.ОБРАЗЦОВА

На правах рукописи

УДК:630.31+630.385.(011.2) (65.011.56)

БОРИСОВ Георгий Александрович

**МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЛЕСОВОЗНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА**

Специальность: 05.22.12. Промышленный
транспорт;
05.13.12. Системы автоматизации
проектирования

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

ЛЕНИНГРАД 1987

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА В ОТДЕЛЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАРЕЛЬСКОГО ФИЛИАЛА АН СССР.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ДОКТОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОР

ИВАНИЛОВ Ю.П.

ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОР

ИЛЬИН Б.А.

ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОР

ХОМЯК Я.В.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ ГИПРОЛЕСТРАНС.

ЗАЩИТА СОСТОИТСЯ "....." 198..... г. В 14 ЧАСОВ НА ЗАСЕДАНИИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА 114.03.01 ПО ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИЙ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 05.22.12 "ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТРАНСПОРТ" ПРИ ЛЕНИНГРАДСКОМ ИНСТИТУТЕ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМ.АКАДЕМИКА В.Н.ОБРАЗЦОВА ПО АДРЕСУ: 190031, г.ЛЕНИНГРАД, МОСКОВСКИЙ ПР., 9.

С ДИССЕРТАЦИЕЙ МОЖНО ОЗНАКОМИТЬСЯ В БИБЛИОТЕКЕ ИНСТИТУТА.

126626к

АВТОРЕФЕРАТ РАЗОСЛАН "....." 198..... г.



Ученый секретарь
специализированного совета

ХАУСТОВ Г.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Решениями XXVI и XXVII съездов КПСС автоматизация проектно-конструкторских работ определена как одно из важнейших направлений ускорения научно-технического прогресса, повышения эффективности и производительности труда инженерно-технических работников. На широкое использование в проектном деле ЭВМ нацеливают решения ЦК КПСС и Совета Министров СССР по совершенствованию проектно-сметного дела 1969, 1981 г.г.

В связи с важной ролью лесотранспорта в лесозаготовительном производстве, значительной величиной капитальных и текущих затрат, длительным и значительным влиянием принятых при его проектировании решений основным направлением исследований выбраны методы автоматизированного проектирования транспортных сетей лесозаготовительных предприятий, а также лесовозных автомобильных дорог в продольном профиле, на базе которых работает около 70% лесозаготовительных предприятий страны. По аналогичным причинам в качестве другой области исследований выбраны методы проектирования на ЭВМ лесомелиорации. Эти объекты исследований объединяет общность целей, методики и средств реализации методов, а также совместно осуществляемые проектирование, строительство и эксплуатация.

Исследования, разработка и внедрение методов автоматизированного проектирования лесотранспорта и лесомелиорации представляет собой одну из актуальных отраслевых задач.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ. Основной целью диссертации является повышение эффективности проектирования лесотранспорта и лесомелиорации, которая достигается за счет сниже-

ния затрат на строительство, эксплуатацию и проектирование объектов, а также повышение качества проектных решений путем применения математических методов оптимизации проектных решений и реализации их на ЭВМ в составе специализированных систем автоматизированного проектирования.

В задачи исследований, выполненных лично автором, входило:

- разработка принципов построения систем автоматизированного проектирования;
- определение структур систем;
- формулировка математических моделей проектируемых объектов;
- обоснование применения известных математических методов для оптимизации проектных решений или разработка новых;
- разработка алгоритмов известных слабоформализованных расчетных методов (определения объектов подготовительных работ, распределения земляных масс и т.д.);
- оценка адекватности, эффективности, сходимости и устойчивости используемых в САПР методов;
- разработка принципов построения эффективной человеко-машинной технологии автоматизированного проектирования.

Кроме того, для достижения поставленных целей на основе проведенных исследований под научным руководством автора и при его личном участии разработаны специализированные САПР транспортных сетей лесозаготовительных предприятий, лесовозных автомобильных дорог и объектов осушительной лесомелиорации. Эти разработки осуществлены в соавторстве с сотрудниками Карельского филиала АН СССР, Карельского НИИ лесной промышленности и Карельского филиала Совзгипро-

лесхоза.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В основу исследований положен системный подход с широким использованием методов математического моделирования проектируемых объектов. Для исследования математических моделей используются методы линейного, динамического, целочисленного программирования, методы случайного поиска, а также различные модификации итеративных методов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА работы заключается в следующем:

- достигнуты новые качества методов автоматизированного проектирования, обусловленные особенностями их реализации на ЭВМ - системность, полная формализованность, обобщенность, повышенная точность, численность и многовариантность;

- впервые доказана необходимость оптимизации способов соединения элементов транспортных сетей лесозаготовительных предприятий и разработаны методы такой оптимизации;

- впервые выявлены значительные резервы улучшения структуры лесотранспортных сетей и доказана эффективность применения веерообразных схем соединения усов при существующей классификации лесовозных автомобильных дорог и дальнейшее ее расширение за счет оптимизации ряда нормируемых в настоящее время параметров;

- для оптимизации нормируемых при проектировании лесовозных автомобильных дорог продольных руководящих уклонов и радиусов вертикальных кривых разработан новый метод оптимизации "гладкой" проектной линии дороги, сплошь состоящий из отрезков вертикальных кривых;

- впервые разработан метод двухкоординатной оптимизации проектной линии дна лесомелиоративного и придорожного водоотводящего канала;

- впервые разработана и реализована на ЭВМ методика и технология автоматизированного проектирования лесовозных автомобильных дорог и лессмелиоративных каналов с оптимизацией проектных решений.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Результаты исследований использованы в разработках систем программ для проектирования на ЭВМ лесовозных автомобильных дорог САПАД-1, САПАД-2, САПАД-ЕС, лесомелиоративных каналов КАНАЛ-1, объектов лесомелиоративного строительства КАНАЛ-2, составления смет СМЕТА, лесотранспортных сетей лесозаготовительных предприятий СЕТИ, с использованием которых в процессе промышленной эксплуатации запроектировано свыше 5000 км лесовозных и лесохозяйственных дорог, свыше 70 000 км лесомелиоративных каналов. Приемочные испытания систем программ и их эксплуатация подтвердили эффективность предложенных методов и технологии машинного проектирования. Вышеназванные системы используются в учебном процессе лесоинженерных факультетов ряда высших учебных заведений страны.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались:

1. На Международном симпозиуме стран-членов СЭВ по использованию ЭВМ и математических методов в лесном хозяйстве (Пушкино, 1972) и по лесоосушению (Хельсинки, 1974).

2. На Всесоюзных научно-технических совещаниях, конференциях и симпозиумах:

- по применению математических методов и вычислительной

- техники в лесозаготовительной, лесопильно-деревообрабатывающей промышленности и лесном хозяйстве (Петрозаводск, 1966);
- по перспективам развития ЭЦВМ "Минск" (Минск, 1966);
 - по оптимальному планированию и управлению лесопромышленными комплексами (Москва, МЛТИ, 1968);
 - по проектированию, строительству и эксплуатации лесовозных дорог (Минск, 1972);
 - по проблемам автоматизированного проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов (Петрозаводск, 1978);
 - по исследованию операций (Горький, 1979);
 - по совершенствованию проектирования, строительства и эксплуатации лесотранспорта (Мостовая, 1981);
 - по автоматизации проектирования гидроэнергетических и водохозяйственных объектов (Ленинград, 1983);
 - по путям дальнейшего повышения уровня автоматизации работ при проектировании автомобильных дорог (Фрунзе, 1983).

3. Экспонировались на Выставке достижений народного хозяйства (1971, 1973, 1977, 1980).

4. На республиканских, региональных и ведомственных конференциях:

- по научной организации труда (Сыктывкар, 1967);
- по автоматизации составления сметной документации (Москва, 1972);
- по гидромелиорации (Петрозаводск, 1977).

На конференциях НИИ и ВУЗов:

- КАРНИИЛП (1966, 1967, 1968);

- ЛИСИ (1967);
- МЛТИ (1967, 1974, 1978);
- ЛИИ (1973);
- ЛТА (1977, 1979, 1980, 1984);
- ПГУ (1974);
- Карельского филиала АН СССР (1973, 1977, 1979).

ПУБЛИКАЦИИ. Основное содержание диссертации опубликовано в 41 статье и монографии объемом 10 печ.л.

АВТОР ВНОСИТ НА ЗАЩИТУ:

- основы теории и методик проектирования на ЭВМ сетей лесовозных дорог, включающую формулировки задач, математические модели лесотранспортной сети, обоснование методов оптимизации ее структуры, способов соединения элементов сети, координат развилки и очередности строительства дорог, учитывающих неоднородность условий строительства, эксплуатации элементов сети и распределения ликвидных запасов леса;

- методику автоматизированного проектирования продольного профиля лесовозных автомобильных дорог, включающую структуру системы, расчетные методы определения объемов подготовительных и основных земляных работ, алгоритмы распределения земляных масс, выравнивания толщины дорожной одежды, оптимизации проектной линии дороги в виде непрерывной гладкой функции;

- методику автоматизированного проектирования лесомелиоративных и придорожных водоотводящих каналов;

- основные положения технологии автоматизированного проектирования линейных сооружений и их сетей, заключающиеся в экономных методах кодирования исходных данных и

обнаружения в них ошибок, использования высокопроизводительных печатающих устройств для выводов эскизов чертежей продольных профилей линейных сооружений.

СТРУКТУРА РАБОТЫ. Объем диссертации 316 стр. машинописного текста, в том числе 20 таблиц и 38 рисунков. Она состоит из введения, 7 разделов и заключения. Кроме того, имеется список использованной литературы из 230 наименований, включая 16 наименований на иностранных языках.

2. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Развитие и широкое распространение вычислительной техники, методов оптимизации создали предпосылки автоматизации проектных расчетов и поиска оптимальных проектных решений. Наиболее эффективным путем реализации этих предпосылок являются системы автоматизированного проектирования, различным вопросам построения которых для проектирования лесотранспорта посвящена настоящая диссертация.

В работе проведен анализ методов проектирования лесотранспорта с позиции системотехники, определивший основные отличия путей совершенствования проектирования этих объектов - стремление к глобальному минимуму суммы приведенных затрат на основе системы математических моделей, выбор в качестве основного оптимизируемого параметра грузового потока, разработка методов как системной, так и локальной оптимизации моделей. Исходя из особенностей работы ЭВМ, определены основные требования к задачам и методам проектирования, реализуемым на ЭВМ:

- повышение степени формализованности постановок проектных задач и алгоритмов их решения, повышение точности и

универсальности, минимизации физического объема вводимой и выводимой информации, единства информационной базы и использования численных методов оптимизации.

Используя обобщенную модель для проектирования линейных сооружений проведена классификация задач их проектирования по уровням и этапам автоматизации их решения. На основе рассмотренной квалификации определены тенденции в развитии автоматизации проектирования и все возрастающие требования к техническому и системному уровню САПР.

Анализ широко известного аналитического метода проектирования транспортных сетей лесозаготовительных предприятий, развитого в работах Н.М.Невесного, Б.А.Ильина, Б.А.Дорохова, В.В.Щелкунова, Ю.П.Зубова, В.И.Мельникова, Ю.Н.Венценосцева, С.А.Шалаева в 30-60 годы, выявил значительную неадекватность решений реальным условиям, обусловленную большим количеством принимаемых допущений. В то же время, рассмотрение современных методов оптимизации для проектирования сетей различного назначения - дорог общего пользования, электроэнергетических, трубопроводных - показывает возможность отказаться от допущений, свойственных аналитическому методу и целесообразность использования математического программирования и итеративных методов.

Краткий обзор известных методов В.С.Михалевича, К.А.Хавкина, И.В.Турбина, В.И.Струченкова для оптимизации проектирования железных дорог и автомобильных дорог общего пользования в продольном профиле, а также использование методов В.С.Михалевича в системе САПАД-1 показал их вариантную избыточность и экономическую нецелесообразность

оптимизации точек перелома проектной линии по двум координатам. На основании этого сформулированы особые требования к методу оптимизации лесовозных дорог в продольном профиле и методам расчета частных проектных задач низшего уровня – расчета на осадку насыпи на болотах, выбора типа земляного полотна, расчета объемов земляных работ, распределения земляных масс, выравнивания толщины дорожной одежды. Для автоматизации проектирования лесомелиорации сформулированы задачи разработки эффективной человеко-машинной технологии проектирования и определения оптимального положения проектной линии дна канала.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В результате исследований доказано наличие систематической погрешности в расчетах транспортных сетей лесозаготовительных предприятий, возникающей при использовании средне-арифметических значений, влияющих на размещение сети параметров; обосновано использование принципа расчленения сырьевой базы и последовательной оптимизации параметров сетей лесозаготовительных предприятий.

В соответствии с этим принципом обоснована математическая модель сети с центрами запасов для приближенной оптимизации сети основных дорог, которая свелась к транспортной задаче с промежуточными пунктами и фиксированными доплатами. Эта задача формулируется следующим образом.

Найти

$$\min S = \sum_i \sum_j S_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

при

$$\sum_{i,j} x_{ij} - x_{ij} = b_j, \quad (2)$$

$$\sum_{i,j} x_{ij} - x_{ij} = a_j, \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{E K_{ij}}{x_{ij}} + C_{ij}, \quad (4)$$

$$K_{ij} = \frac{\alpha(x_{ij})}{2M} (K(u_i, x_{ij}) + K(u_j, x_{ij})) \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} + J_{ij}, \quad (5)$$

$$C_{ij} = \frac{\alpha(x_{ij})}{M} \left(\frac{1}{2} \tilde{r}(u_i, x_{ij}) + \frac{1}{2} \tilde{r}(u_j, x_{ij}) + d_j(x_{ij}) \right) \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (6)$$

- где x_{ij} - объем перевозки древесины из i -го центра запаса в j -й (м^3);
- a_j - объем заготавливаемой в j -м центре древесины (м^3);
- b_j - объем перерабатываемой в j -м центре древесины (м^3);
- E - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;
- K_{ij} - строительные затраты (руб.);
- C_{ij} - текущие затраты ($\frac{\text{руб}}{\text{м}^3}$);
- $\alpha(x_{ij})$ - коэффициент развития путей;
- $K(u_i, x_{ij}), K(u_j, x_{ij})$ - стоимость строительства 1 км пути в условиях i -го и j -го однородных участков сырьевой базы ($\frac{\text{руб}}{\text{км}}$);
- $\tilde{r}(u_i, x_{ij}), \tilde{r}(u_j, x_{ij})$ - соответственно транспортные и дорожные удельные затраты ($\frac{\text{руб}}{\text{м}^3 \text{ км}}$);
- x_i, y_i, x_j, y_j - координаты центров запасов древесины, снятые с карты (см);
- J_{ij} - стоимость искусственных сооружений на элементе сети;
- M - масштаб карты.

Приближенное решение этой задачи с количеством центров

запасов, доходящих до 1000, осуществлялось распределительным методом линейного программирования с пересчетом оценок, когда по результатам решения на предыдущей итерации пересчитываются значения целевой функции. Значительные размерности решаемых задач по определению положения основных дорог сети позволяют с большой дробностью и глобально, учитывая геометрические, таксационные и гидрогеологические условия сырьевой базы, находить лучший в экономическом смысле вариант сети.

Следом за приближенным определением положения сети основных дорог предлагается решение задачи улучшения фрагментов сети. Из анализа фрагментов сетей, полученных при решении первой задачи, выделены типовые схемы развилки с числом центров запасов, соединяющихся с общим центром дорогами, не более 6. Задача улучшения фрагментов сети заключается в том, чтобы получить сеть с меньшими значениями целевой функции путем изменения схемы развилки и их координат с учетом неоднородных условий для строительства и эксплуатации дорог. Предложен некоторый эвристический алгоритм соединения центров запасов с итеративным изменением координат развилки дорог, улучшающий локально значение целевой функции.

Вследствие слабой изученности вопросов улучшения топологии сети основных лесовозных дорог в сырьевой базе исследовались различные алгоритмы поиска глобального экстремума на сети, включающие полный перебор и случайный поиск топологий, определение наивыгоднейших координат развилки путей, последовательное улучшение точности решений.

Из-за большой трудоемкости перебора всех возможных топологий сети ставилась задача за приемлемый расход машинного времени получить наивыгоднейший проектный вариант сети. В результате исследований определены две группы алгоритмов для улучшения топологии сети, имеющей малое и большое количество центров запасов.

При малом количестве центров запасов в сети, которое получается при разбивке сети на ряд небольших фрагментов, используя вариант проектировщика или решение сети одним из ранее изложенных методов, оказывается возможным получить точное решение, используя перебор всех топологий и алгоритм градиентного поиска наивыгоднейших координат развилок путей. При решении задачи с большим числом центров запасов с перебором развилок от точки примыкания сети к периферийным центрам методом случайного поиска с самообучением осуществляется приближенная оптимизация топологии сети. На рис. I приводится в качестве примера решение транспортной сети Казахского леспромхоза такими методами.

Используя полученную одним из перечисленных способов сеть, определяется очередность освоения лесосырьевой базы. Для этого разработан на основе общей идеи динамического программирования алгоритм точного определения срока ввода каждого элемента сети. Для случая с ограниченным количеством плановых периодов (очередей строительства) в терминах линейного программирования сформулирована задача определения очередности строительства дорог, решаемая любым стандартным методом для транспортных задач линейного программирования.

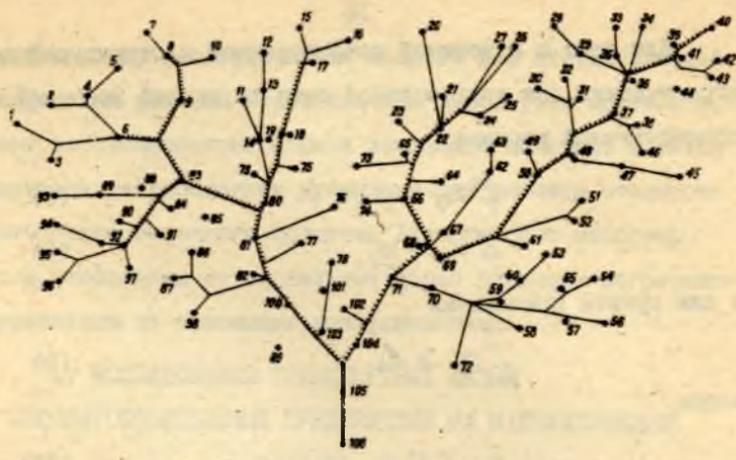


Рис. 1 Оптимизированная сеть Казахского леспромхоза

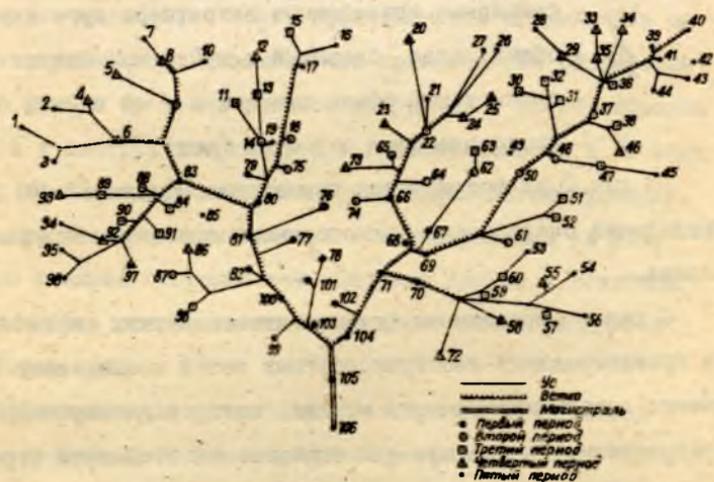


Рис. 2 Динамика транспортного освоения сырьевой базы Казахского леспромхоза

Для сети с известной конфигурацией и структурой и при ограничениях для транспортной сети по каждой концевой и промежуточной вершине

$$\sum_i x_{ij} = q_j, \quad (7)$$

$$\sum_j x_{ij} = q_i, \quad (8)$$

и для пункта примыкания

$$\sum_{t=1}^N x_t \geq v_n \quad (9)$$

найти

$$\min S = \sum_i \sum_j S_{ij} x_{ij}, \quad (10)$$

где x_{ij} - объем вывозки между вершинами i и j (м^3);

q_i, q_j - объем заготовки древесины в вершинах i и j (м^3);

S_{ij} - суммарные приведенные затраты на дуге (руб.);

v_n - общий запас, свозимый в пункт примыкания (м^3);

$\sum_{t=1}^{N-1}$ - планируемый объем вывозки в t -й период (м^3);

N - число плановых периодов (лет).

На рис.2 иллюстрируется применение модели (7+10) для определения очередности транспортного освоения лесного массива.

С целью определения технико-экономических характеристик проектирования лесотранспортных сетей исследовано применение детерминированного метода, методов дисперсионного и регрессионного анализа для определения стоимости строительства 1 км дорог различных категорий по данным, получаемым на стадии технико-экономического обоснования строительства лесозаготовительных предприятий. В результате исследований разработана методика, заключающаяся в исполь-

зовании методов дисперсионного анализа для статистической классификации условий строительства дорог (тип местности, процент заболоченности, ширина земляного полотна) и затем в получении регрессионных уравнений для расчета стоимости строительства земляного полотна. Для наиболее массовых классов лесовозных автомобильных дорог получены регрессионные уравнения со значимыми коэффициентами.

4. ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Исследования проводились на сетях, исходные данные по которым готовились сотрудниками проектных организаций Минлеспрома СССР. Прежде всего оценивалась адекватность разработанных моделей, а затем эффективность оптимизации основных дорог сети. Показано, что принятые при разработке модели сети с центрами запасов допущения о сосредоточении запасов в центрах кварталов и о вывозке запасов в смежные центры не вносят больших искажений в результаты решения. Используя методы статистического моделирования на ЭВМ, оценено влияние погрешностей исходных данных и показана независимость положения основных дорог от погрешностей параметров сети.

Эффективность оптимизации лесотранспортных сетей с использованием методов линейного программирования оценена в сравнении с алгоритмом Прима (20%) и в сравнении с вариантами проектировщиков (3%).

Используя полученные указанным методом решения всей сети и применяя частичный перебор топологий на ее фрагмен-

тах, получено улучшение значения целевой функции всего в среднем на 11%, в том числе 4,4% - за счет оптимизации координат развилки.

Для оценки и снижения затрат машинного времени проведены исследования сходимости решений в задаче определения положения основных дорог сети, позволившие определить момент окончания решения, и искусственные приемы ускорения сходимости.

При исследованиях на математических моделях транспортных сетей лесозаготовительных предприятий выявлен значительный разрыв между экономически целесообразным объемом вывозки по усам и их работоспособностью, приводящий к значительным экономически неоправданным затратам на строительство веток. В связи с этим рассмотрены различные способы проектирования периферийных путей сети, приводящие к укорачиванию веток - устройство параллельных усов, их многократный капитальный ремонт, введение промежуточных (между усам и ветками) категорий путей, устройство веерообразных схем примыкания усов к веткам. Исследованиями на математических моделях транспортных сетей показан значительный экономический эффект от использования этих способов, из которых при существующей классификации путей предпочтителен второй и четвертый. В то же время по эффективности наиболее перспективно расширение классификации путей, а также многопараметрическая оптимизация дорог и путей при любом значении объема вывозки Q .

Экономическая целесообразность расширения классификации лесовозных путей подтверждена моделированием сети

Казахского леспромхоза, а изучение свойств оптимальных лесотранспортных сетей показало теоретическую возможность достижения глобального минимума затрат на сети только при многопараметрической оптимизации дорог.

5. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ПРОДОЛЬНОМ ПРОФИЛЕ

Для проектирования автомобильных лесовозных дорог в продольном профиле сформулирована математическая модель дороги:

Найти

$$\min S = F(X_j, Y_j) \quad (II)$$

$$\text{при } Y_j \geq A(M_j, Y_j, B_j). \quad (I2)$$

$$I_{\min} \leq \frac{\Delta Y_{j,j+1}}{\Delta X_{j,j+1}} \leq I_{\max}, \quad (I3)$$

$$\Delta Y_{j,j+1} \geq \Delta l_{np}, \quad (I4)$$

$$R_j \geq R_1, R_j \geq R_2 \quad \text{при} \quad a \leq \left| \frac{\Delta Y_{j,j+1}}{\Delta X_{j,j+1}} - \frac{\Delta Y_{j,j-1}}{\Delta X_{j,j-1}} \right|, \quad (I5)$$

$$Y_j > Y^* \quad \text{или} \quad Y_j < Y^* \quad \text{или} \quad Y_j = Y^*, \quad (I6)$$

где j - номер точки перелома проектной линии дороги в продольном профиле;

X, Y - проектные отметки и пикетажное значение точек перелома проектной линии дороги (м);

M_j, Y_j, B_j - тип местности, вид грунта и уровень грунтовых вод в j -й точке;

I_{\min}, I_{\max} - руководящие уклоны в грузовом и порожнем направлениях;

- Δl_{no} - шаг проектирования (м);
- R_1, R_2 - минимально допустимые радиусы в выпуклых и вогнутых областях проектной линии дороги (м);
- J^* - особые отметки, задаваемые проектировщиком (м);
- Δ - разность координат смежных точек.

В модели для проектирования лесомелиоративных каналов в продольном профиле отсутствуют ограничения (I4, I5).

В качестве целевой функции оптимизации продольного профиля лесовозных автомобильных дорог принята сумма приведенных затрат, включающая строительные затраты на проведение подготовительных работ, сооружение земляного полотна, дорожной одежды, на снегозадержание и на транспортировку древесины. Затраты на обстановку и принадлежности пути, боковой водоотвод и разрубку трассы исключены как мало влияющие на положение проектной линии. Исходя из вида целевой функции, обоснован состав и последовательность частных задач, решаемых при оптимизации продольного профиля.

Для полной формализации расчетов подготовительных работ проведена классификация условий, при которых они производятся, и выведены для 10 сочетаний условий необходимые для расчета формулы корчевки и срезки пней заподлицо.

В расчете объемов земляных работ также проведена классификация условий по рабочим отметкам, поперечному уклону местности и видам грунтов, позволившая однозначно определять типовые поперечники земляного полотна, их конструктивные параметры и формулы для расчета объемов. Выведены для некоторых условий по поперечному уклону

местности отсутствующие формулы для расчета объемов земляных работ, а также формулы для определения осадки на болотах.

В связи со значительными затратами машинного времени на реализацию известных алгоритмов распределения земляных масс методами линейного программирования обоснованы и разработаны быстро работающие алгоритмы для случая двух и трех способов перемещения грунта. Основной принцип, положенный в основу этих алгоритмов, — выбор способа перемещения по последовательному увеличению стоимости и расстоянию перемещения грунта.

В связи с увеличивающимися требованиями по проектированию организации производства земляных работ обоснована, разработана и апробирована математическая модель производства основных земляных работ при строительстве автомобильных дорог.

При решении модели находится минимум стоимости производства земляных работ, т.е.

$$\min \left(\sum_{j=1}^n c_{1j} \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^m t_{ijk} + \sum_{j=1}^n c_{2j} n_j \sum_{k=1}^l T_{jk} \right) \quad (17)$$

при

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l p_{ijk} t_{ijk} &= U_i; \\ \sum_{i=1}^l t_{ijk} &\leq n_j T_{jk}; \\ t_{ijk} &\geq 0. \end{aligned}$$

В условиях модели:

- i - виды земляных работ;
- j - виды землеройно-транспортных машин;
- k - строительные сезоны;
- V - объемы земляных работ;
- T, t - ресурсы машинного времени;
- P - производительность машин и механизмов;
- n_j - количество машин и механизмов j -го вида;
- C_{1j} - затраты на эксплуатацию машин, зависящие от годового режима;
- C_{2j} - затраты на эксплуатацию машин, зависящие от внутрисменного режима.

Модель исследовалась на минимум стоимости производства земляных работ методом градиентного спуска с применением сглаживающей функции количества требующихся механизмов. Для целочисленного определения количества механизмов производилось многократное исследование модели при различных сочетаниях видов и числа механизмов.

Для повышения точности и эффективности назначения толщины дорожной одежды с учетом длины захватки сформулирована задача сглаживания дорожной одежды, решаемая на минимум объема одежды методом поиска кратчайшего пути в графе.

Для лесомелиоративных каналов, проектируемых в продольном профиле, доказано, что наилучшие в экономическом смысле решения вследствие выпуклости целевой функции лежат на грани области существования решений, образованной линиями минимальных рабочих отметок и предельных продольных уклонов. На основе этого свойства разработан алгоритм назначе-

ния оптимального положения проектной линии дна канала, позволяющий ограничиться рассмотрением двух вариантов положения проектной линии при оптимизации вертикальных и горизонтальных координат точек ее перелома. В сравнении с вариантами проектировщика алгоритм позволяет на 4% снизить объем земляных работ.

Для оптимизации положения проектной линии лесовозных автомобильных дорог в продольном профиле обоснован алгоритм оптимизации "гладкой" проектной линии, составленной из последовательно сопряженных вертикальных круговых кривых, проходящих через близко расположенные (через 10-20 м) оптимизируемые точки проектной линии. Основная идея алгоритма заключается в назначении начального варианта проектной линии дороги одинаковыми и большими шагами проектирования, оптимизации ее методом последовательного анализа вариантов и последовательного уменьшения шагов проектирования с доведением их до 10-20 м. Для исследования такого алгоритма разработана экспериментальная программа метода оптимизации, обобщающего методы сеток, итеративных и последовательного анализа вариантов. Исследования, проведенные с использованием программы, позволили сопоставить перечисленные методы и обосновать допустимость метода последовательного анализа вариантов, а также настраиваемые параметры алгоритма, позволяющего одновременно оптимизировать продольные уклоны, радиусы кривизны, рабочие отметки проектной линии, отказавшись от нормируемого прямолинейного шага проектирования. Получена верхняя оценка алгоритма - 11% снижения строительной или суммарной стоимости проекта в наиболее сложных рельефных условиях

в сравнении с решением системой САПАД-2.

6. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПРОГРАММ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛЕСОТРАНСПОРТА И ЛЕСОМЕЛИОРАЦИИ

Автоматизация проектирования существенно изменяет технологию проектирования за счет появления новых операций, изменения затрат на их выполнение. В связи с необходимостью снижения себестоимости автоматизированного проектирования линейных сооружений потребовалось максимально снизить затраты на наиболее дорогие и трудоемкие операции - подготовку исходных данных и обнаружение ошибок. Для этого были проведены исследования исходных данных для проектирования линейных сооружений и выявлены их оригинальные свойства - переменная частота повторяемости и статистические зависимости параметров, характеризующих поверхность земли. Используя высокую повторяемость исходных данных, предложен способ кодирования, сокращающий затраты на заполнение первичных форм документов и перфорацию в 2,3 - 3,6 раза. На основе статистических свойств исходных данных разработана система алгоритмов для обнаружения и индикации возможных ошибок в исходных данных. С целью повышения степени автоматизации оформительных работ проведены исследования автоматизированного вывода чертежей продольного профиля дорог и каналов с использованием фототелеграфных аппаратов и устройств широкоформатной печати. С использованием этих результатов исследований разработан ряд систем программ, в которых реализованы общие принципы технологии автоматизированного проектирования. Каждая из систем программ состоит из трех

основных блоков - ВХОД, ЯДРО и ВЫХОД. При разработке блоков ВХОД - узкоспециализированной системы управления базой данных - принят безызбыточный способ кодирования исходных данных, синтаксический и семантический анализ для обнаружения в них ошибок, преобразование сжатой формы представления исходных данных в машинный формат, удобный для дальнейшей обработки.

Блок ВЫХОД осуществляет вывод результатных данных в виде таблиц и эскизов чертежей продольных профилей.

Блоки ЯДРО индивидуальны для каждого вида системы программ.

Для оптимизации проектных решений при проектировании транспортных сетей лесозаготовительных предприятий разработана система программ СЕТИ. В системе используется программа распределительного метода линейного программирования для приближенного решения транспортной задачи с фиксированными доплатами и промежуточными пунктами. Для решения предоставляются данные, общие по всей лесосырьевой базе (стоимости строительства путей и вывозки по ним древесины, суммарный запас, масштаб карты), данные по отдельным кварталам (запас в квартале, координаты центра, удорожание затрат в квартале), данные по отдельным связям между центрами запасов (номера соединяемых центров, коэффициенты удлинения путей, стоимость строительства искусственных сооружений). В результате решения задачи выдаются в целом по сети и в отдельности по каждой связи между центрами запасов грузовой поток, строительные и транспортные затраты, вид пути.

Используя изложенные в пятом разделе алгоритмы, разработаны три системы автоматизированного проектирования

лесовозных автомобильных дорог (САПАД). Система САПАД-1 была разработана в 1971 г. на ЭВМ "Минск-22". Она включала алгоритмы расчета объемов подготовительных работ, выбора типа земляного полотна и расчета объемов основных земляных работ с поправками, расчета толщины и объемов однослойной нежесткой дорожной одежды, распределения земляных масс, расчета скорости движения автопоезда, расчета суммарных затрат. Поиск оптимальных отметок проектной линии в плоскостях перелома, заданных проектировщиком, осуществлялся модифицированным методом последовательного анализа вариантов. С помощью системы программ можно было определить оптимальное положение проектной линии дороги, соответствующее минимуму суммарных приведенных или строительных затрат, а также рассчитывать параметры дороги по варианту, заданному проектировщиком. В результате работы системы в табличной форме выводились данные для чертежа продольного профиля и попикетная ведомость основных земляных работ.

В 1976 г. на ЭВМ "Минск-32" разработана система САПАД-2, отличающаяся от первой расчетом многослойных дорожных одежд, более гибким алгоритмом распределения земляных масс, алгоритмом "пульсирующей" оптимизации положения проектной линии по двум координатам, выводом ведомостей устройства дорожной одежды, распределения земляных масс, объемов подготовительных работ, выводом эскиза чертежа продольного профиля, а также более совершенной технологией автоматизированного проектирования дорог. В 1980 г. сотрудниками КАРНИИЛПа эта система была перепрограммирована на ЭВМ типа ЕС-1022.

Для автоматизации проектирования лесомелиорации в 1971 г. на ЭВМ "Минск-22" была разработана система программ КАНАЛ-1, осуществляющая выбор параметров лесомелиоративных каналов, расчет объемов подготовительных и основных работ, вывод эскиза чертежа продольного профиля в соответствии с заданным проектировщиком положением проектной линии дна канала. В 1973 г. на ЭВМ "Минск-32" была разработана система программ для составления смет, а в 1976 г. сдана в эксплуатацию система программ КАНАЛ-2, завершившая комплексную автоматизацию проектирования лесомелиоративных объектов. Система программ КАНАЛ-2 осуществляет расчет требуемой по условиям лесосошения и лесовосстановления глубины канала, расчет оптимального положения проектной линии дна канала, расчет и печать ведомости параметров продольного профиля канала с эскизом чертежа, проведение гидрологических и гидравлических расчетов, печать итоговых ведомостей объемов строительных работ на объект в целом, расчет и печать сметной документации с выборками затрат труда, механизмов и материалов, формирования каталогов сметных расценок с затратами труда, материалов и механизмов.

7. ОЦЕНКА СИСТЕМ ПРОГРАММ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ

В разделе излагаются основные положения разносторонней оценки систем программ по экономическому эффекту, производительности труда, качеству и точности проектных решений, научно-техническому уровню, сокращению сроков проектирования и улучшению труда проектировщиков, использованные для разработки программ и методов приемочных

испытаний.

На основании действующих методик определения экономической эффективности капиталовложений и новой техники уточнены расчетные формулы для определения экономической эффективности систем программ. Кроме того, проведен анализ научно-технического уровня разработанных систем программ сопоставлением с известными отечественными и зарубежными аналогами по методическому, математическому, информационному и техническому обеспечению, показавший опережение разработок ближайших отечественных аналогов или отсутствие таковых, а также новизну и преимущества разработанных нами методов автоматизированного проектирования лесотранспорта и лесомелиорации.

По результатам внедрения и эксплуатации проведен анализ эффектов от использования разработанных систем программ в проектных организациях лесопромышленного и лесохозяйственного профиля, показавший повышение производительности труда, сокращение сроков проектирования в проектных организациях, а также суммарный экономический эффект от применения систем программ, превышающий 400 тыс. рублей в год.

8. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ. ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

Работа заканчивается постановкой новых проблем в области автоматизированного проектирования лесотранспорта и лесомелиорации, обоснованных анализов достигнутых результатов. Показано доминирующее влияние на развитие данного научного направления возможностей быстро развивающихся средств вычислительной техники. Обоснована разработка

интегрированной САПР для лесной промышленности и лесного хозяйства на основе унификации методического, информационного, математического и технического обеспечения, развитие САПР за счет решения новых задач, расширения областей использования функций и повышения эффективности оптимизации проектных решений.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение исследований по теме диссертации дало следующие основные результаты:

1. Разработана методика автоматизированного проектирования сетей лесовозных автомобильных дорог, отличающаяся от известных математическими моделями лесотранспортных сетей, численными методами оптимизации их структуры, способом соединения элементов, оптимизации координат развилок и очередности строительства дорог, нормативной базой. Методика позволяет учитывать неоднородность условий строительства и эксплуатации элементов сети и неоднородность распределения запасов леса.

2. При исследованиях оптимизированных сетей лесозаготовительных предприятий выявлены новые резервы повышения эффективности лесотранспорта – применение веерообразных схем соединения усов с ветками при существующей классификации лесовозных путей, непараллельное расположение веток, расширение принятой классификации лесовозных путей.

3. Разработана методика автоматизированного проектирования продольного профиля лесовозных автомобильных дорог, отличающаяся от ранее известных структур САПР алгоритмическими методами для:

- расчета объемов подготовительных работ в зависимости от всевозможных сочетаний природных условий и конструктивных параметров земляного полотна;
- выбора типа и параметров земляного полотна и расчета объемов земляных работ при его сооружении в зависимости от гидрогеологических условий, поперечного уклона местности и рабочей отметки;
- введения поправок на компенсацию снятого растительного слоя и осадку насыпей на болотах различного типа с помощью выведенных формул для расчета модулей сжимаемости и упругости торфа;
- распределения земляных масс с учетом их стоимостных оценок;
- сглаживания толщины дорожной одежды.

4. Для дальнейшего повышения эффективности оптимизации решений при проектировании продольного профиля лесовозных автомобильных дорог обоснован и разработан алгоритм оптимизации "гладкой" проектной линии, составленной из последовательно сопряженных элементов круговых кривых малой длины.

5. Разработана методика автоматизированного проектирования объектов осушительной лесомелиорации, включающая алгоритм двухкоординатной оптимизации проектного дна канала, метода расчета других параметров лесомелиоративного канала, объемов работ и автоматического составления смет.

6. Совокупность разработанных методов может классифицироваться как основа теории численной оптимизации транспортных сетей лесозаготовительных предприятий и лесовозных автомобильных дорог в продольном профиле.

7. Обоснованы оригинальные положения технологии автоматизированного проектирования линейных сооружений, заключающиеся в экономных способах кодирования исходных данных, обнаружения и исправления в них ошибок, использованием высокопроизводительных печатающих устройств для вывода эскизов чертежей продольных профилей линейных сооружений.

8. На основе разработанных методик и технологии созданы специализированные САПР транспортных сетей лесозаготовительных предприятий (СЕТИ), лесовозных автомобильных дорог (САПАД-1, САПАД-2, САПАД-ЕС), лесомелиоративных каналов (КАНАЛ-1), объектов лесосушительной мелиорации (КАНАЛ-2), а также система программ для составления смет (СМЕТА), внедренные во многих проектных организациях лесной промышленности и лесного хозяйства.

9. Методики и технология, положенные в основу разработанных специализированных САПР, проверены внедрением во многих проектных организациях лесной промышленности и лесного хозяйства и позволили получить учтенный годовой экономический эффект свыше 400 тыс. рублей.

10. Определены пути дальнейшего развития автоматизации проектирования лесотранспорта и лесомелиорации, используемые в продолжающихся разработках интегрированной САПР линейных сооружений для нужд лесной промышленности и лесного хозяйства.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

Монография – Методы автоматизированного проектирования лесотранспорта, Петрозаводск, "Карелия", 1978, 198 с.

Научные статьи –

1. Механизация расчета оптимальных отметок красной линии проектируемых дорог. "Лесная промышленность".

1965, № 5, 24–25 с. (В соавт. с О.М.Лайхinen).

2. Оптимизация распределения земляных масс при проектировании дорог. "Лесная промышленность", 1965, № 12, 27–28 с.

(В соавт. с О.М.Лайхinen, Ф.В. Пуговкиным).

3. Механизация графических работ. "Автомобильные дороги", 1967, № 2, 21–22 с. (В соавт. с Н.А.Каракулевым,

Г.Н.Мурашко, Р.А.Оюкияйнен).

4. Представление исходных данных для проектирования продольного профиля дорог на ЭВМ. "Лесной журнал", 1967,

№ 6, 146–149 с. (В соавт. с Г.И.Сидоровой).

5. Выбор рациональной схемы размещения сети лесовозных дорог. Реферативная информация "Лесозэксплуатация и лесосплав", М., ЦНИИТЭИ леспром. 1968, №3, 15–16 с. (В соавт. с Б.С.Герасимовым).

6. Математические модели организации производства.

"Механизация строительства", 1968, №3, 21–23 с. (В соавт. с Г.В.Воиновой).

7. Применение ЭЦМ при проектировании лесовозных дорог. В сб.: "Применение математических методов и вычислительной техники в лесной и деревообрабатывающей промышленности". М., "Лесная промышленность", 1968, 48–51 с.

(В соавт. с Н.А.Каракулевым, О.М.Лайхinen, Г.Н.Мурашко, Р.А.Патема, В.И.Скрипником, Р.А.Оюкияйнен, Г.И.Сидоровой).

8. Оптимизация схем транспортного освоения лесосырьевой базы методами линейного программирования. "Лесной журнал", 1969, № 2, 123-128 с. (В соавт. с В.С.Герасимовым, Р.А.Сюкияйнен).

9. Моделирование движения лесовозного автопоезда на ЭВМ. "Лесная промышленность", 1970, № 2, 31-32 с. (В соавт. с Н.А.Каракулевым, В.И.Скрыпником).

10. Оптимизация транспортных сетей лесозаготовительных предприятий. Материалы Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Оптимальное планирование и управление лесопромышленными комплексами". М., "Лесная промышленность", 1970, 85-91 с. (В соавт. с Б.С.Герасимовым, Р.А.Сюкияйнен).

11. Экспериментальная система проектирования продольного профиля лесовозных дорог. Материалы Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Оптимальное планирование и управление лесопромышленными комплексами", М., "Лесная промышленность", 1970, 91-97 с. (В соавт. с Н.А.Каракулевым, О.М.Лайхinen, Р.А.Патема, Г.И. Сидоровой, Р.А.Сюкияйнен).

12. Проектирование на ЭВМ лесотранспортных сетей. Сб.: "Применение математических методов и вычислительной техники в лесной и деревообрабатывающей промышленности". Петрозаводск, изд. "Карелия", 1971, 158-161 с. (В соавт. с В.Н.Земляченко).

13. Определение технико-экономических показателей для лесотранспортного проектирования. Сб.: "Применение математических методов и вычислительной техники в лесной и деревообрабатывающей промышленности". Петрозаводск, изд. "Карелия", 1971, 154-158 с. (В соавт. с С.П.Андреевой, В.В.Кириковым).

14. Система механизированного проектирования дорог. Сб.: "Применение математических методов и вычислительной техники в лесной и деревообрабатывающей промышленности". Петрозаводск, "Карелия", 1971, 146-149 с. (В соавт. с Г.В. Воиновой, О.М. Лайхinen, Р.А. Сюкияйнен).

15. Резервы повышения эффективности капитальных вложений в строительство лесовозных автомобильных дорог. В кн.: "Строительство, ремонт и содержание лесовозных автомобильных дорог", (обзор), М., ВНИПИЛеспром, 1971, 76-80 с. (В соавт. с Б.С. Герасимовым).

16. Итеративный метод улучшения транспортных сетей лесозаготовительных предприятий. "Лесной журнал", 1971, №5, 51-54 с. (В соавт. с В.Н. Земляченко).

17. К вопросу исследования управления лесозаготовительным процессом. Сб.: "Применение математических методов и вычислительной техники в лесной и деревообрабатывающей промышленности". Петрозаводск, изд. "Карелия", 1971, 36-38 с. (В соавт. с В.Д. Кукиным).

18. Механизация проектирования схем транспортного освоения лесных массивов. Материалы Всесоюзной научной конференции "Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог", Минск, 1972, 19-22 с. (В соавт. с С.П. Андреевой, Б.С. Герасимовым).

19. Основные направления комплексной механизации лесотранспортного проектирования. Материалы Всесоюзной научной конференции "Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог". Минск, 1972, 22-23 с.

20. Проектирование лесомелиоративных каналов с помощью

ЭВМ. "Лесное хозяйство", 1972, № 2, 39-41 с. (В соавт. с А. П. Соловьевым).

21. Опыт проектирования лесовозных и лесохозяйственных дорог с помощью системы САПАД-1. Материалы Всесоюзной научной конференции "Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог". Минск, 1972, 24-26 с. (В соавт. с Р. А. Сюкияйнен).

22. Система механизированного проектирования продольного профиля автомобильных лесовозных дорог (КарНИИЛП, декабрь, 1969), 115 стр. (Г. А. Борисов, Г. В. Воинова, И. М. Попов и др.) - В сб.: Алгоритмы и программы. Материалы ГЭАП. - М., 1972, № 1, 40 с.

23. Механизированное проектирование лесохозяйственных дорог на ЭВМ "Минск-22" и "Минск-32". В кн.: Доклады советских специалистов - участников международного симпозиума стран-членов СЭВ по использованию ЭВМ и математических методов в лесном хозяйстве. Пушкино, ВНИИЛП, 1972, с. 152-157.

24. Определение очередности транспортного освоения лесных массивов. "Лесной журнал", 1973, № 1, 145-149 с. (В соавт. с В. Н. Земляченко).

25. Система механизированного проектирования транспортных сетей лесозаготовительных предприятий (первая очередь). (КарНИИЛП, декабрь, 1972), 160 с. П000515 (В сб.: Алгоритмы и программы. Информационный бюллетень. Материалы ГЭАП СССР. - М., № 1, (В соавт. с С. П. Андреевой, З. П. Бричевой и др.).

26. Система программ по механизированному составлению смет (Отдел математических методов Карельского филиала АН СССР, июль 1973), 211 стр. В Сб.: Алгоритмы и программы. Материалы ГЭАП СССР. - М., 1974, № 3, с. 106. (В соавт. с

Г.В.Воиновой, Т.Ф.Леонтьевой и др.).

27. Механизация проектных работ по лесомелиорации и предпосылки для автоматизации с применением ЭВМ. Экспресс информация. ЦЕНТИ лесхоз. Серия: Лесоводство. "Проектирование лесосошения" (По материалам к Международному симпозиуму в г. Хельсинки, сентябрь 1974 г.) М., 1974, вып.5, с.12-18. (В соавт. с А.П.Соловьевым).

28. Составление смет на ЭВМ. "Лесное хозяйство", 1975, № 4, 70-72 с. (В соавт. с А.П.Соловьевым).

29. Математическая модель оптимизации сети лесохозяйственных дорог. "Лесной журнал", 1977, № 4, 168-171 с. (В соавт. с С.П.Андреевой, П.С.Гейзлером).

30. Информационно-справочная система по лесомелиорации. В кн.: Мелиорация лесохозяйственных и лесных угодий Европейского Севера СССР. П научно-техническая конференция. Гидролесомелиорация (тезисы докладов) - Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1977, с. 141-142. (В соавт. с Т.Ф.Леонтьевой, Т.П.Тихомировой).

31. Система автоматизированного проектирования лесомелиоративных каналов. В кн.: Мелиорация сельскохозяйственных и лесных угодий Европейского Севера СССР. П научно-техническая конференция. Гидролесомелиорация. (Тезисы докладов) - Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1977, с. 139-140. (В соавт. с С.П.Андреевой, Г.В.Воиновой и др.).

32. Система автоматизированного проектирования лесомелиоративных каналов (КАНАЛ-2) (Отдел математических методов Карельского филиала АН СССР, декабрь 1976 г.) 149 с.

П 002608. В сб.: Алгоритмы и программы. Информационный

бюллетень ГЭАП СССР - М., 1978, № I (21); с.20 (В соавт. с С.П.Андреевой, Г.В.Воиновой и др.).

33. Система автоматизированного проектирования продольного профиля автомобильных дорог (САПАД-П) (КАРНИИЛП, июль 1977), 68 с. П 003252. В сб.: Алгоритмы и программы. Информационный бюллетень ГЭАП СССР, - М., 1978, № 6 (26), с. 27-28. (В соавт. с С.П.Андреевой, З.П.Бричевой и др.).

34. Проектирование транспортных сетей лесозаготовительных предприятий методами линейного программирования и имитационного моделирования. В кн.: Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов. Материалы Всесоюзного симпозиума. - Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1979, с. 25-31. (В соавт. с С.П.Андреевой, В.Д.Кукиным).

35. Проблемы автоматизации проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов. В кн.: Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов. Материалы Всесоюзного симпозиума. - Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1979, с. 4-9.

36. О подходах к проектированию лесомелиоративных сетей на ЭВМ. В кн.: Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов. Материалы Всесоюзного симпозиума. - Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1979, с. 160-161. (В соавт. с Г.В.Воиновой).

37. Опыт и результаты эксплуатации системы программ "КАНАЛ-1" и "КАНАЛ-2" в Карельском филиале Совзгипролесхоза. В кн.: Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов. Материалы Всесоюз-

ного симпозиума. - Петрозаводск. Карельский филиал АН СССР, 1979, с. 151-154. (В соавт. с А.П.Ганиным).

38. Модели, методы и программные средства принятия решений при составлении технико-экономического обоснования реконструкции и строительства предприятий. В кн.: Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов. Материалы Всесоюзного симпозиума - Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1979, с. 38-41. (В соавт. с В.Н.Земляченко).

39. Автоматизированное проектирование продольного профиля лесных дорог. В кн.: Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов. Материалы Всесоюзного симпозиума. - Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1979, с. 90-94. (В соавт. с Р.А.Сюкияйнен).

40. Комплексная автоматизация лесомелиоративного проектирования. В кн.: Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов. Материалы Всесоюзного симпозиума. - Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1979, с. 154-160. (В соавт. с С.П.Андреевой, Г.В.Воиновой и др.).

41. Свойства оптимальных лесотранспортных сетей. В кн.: Система автоматизированного проектирования лесотранспорта и лесомелиорации. - Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1984, с. 2-10.