

УДК 630.6

UDC 630.6

**ЛОГИСТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ЛЕСОСЫРЬЕВОЙ БАЗОЙ<sup>1</sup>****LOGISTIC MANAGEMENT OF FOREST RE-  
SOURCES**

Соколов Антон Павлович  
к.т.н., доцент

Sokolov Anton Pavlovich  
Cand.Tech.Sci. associate professor

Катаров Василий Кузьмич  
к.т.н., доцент  
*Петрозаводский государственный университет,  
Россия*

Katarov Vasilii Kuzmich  
Cand.Tech.Sci. associate professor  
*Petrozavodsk State University, Russia*

В статье приводится постановка задачи логистического управления лесосырьевой базой. Рассматриваются различные варианты ее решения на стратегическом и тактическом уровнях

The article gives a formulation of the problem of logistic management of forest resources. Different variants of its decision on the strategic and tactical levels are described

Ключевые слова: ЗАГОТОВКА ДРЕВЕСИНЫ, ЛЕСНАЯ ЛОГИСТИКА, ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ, ЛЕСНЫЕ ДОРОГИ

Keywords: WOOD HARVESTING, FOREST LOGISTICS, WOOD HARVESTING ENTERPRISE, FOREST ROADS

## **Введение**

Управление лесосырьевой базой лесозаготовительного предприятия (ЛЗП) заключается в планировании и выполнении всех мероприятий, связанных с ведением лесного хозяйства и лесозаготовками на данной территории. Применительно к российским условиям, как правило, эта территория - арендованный лесной участок лесного фонда [1]. К таким мероприятиям относятся уход за лесом (включая рубки ухода), выборочные и сплошные рубки, мероприятия по лесовосстановлению (подготовка почвы, посев, посадки) и т. д. [10]. Отдельная группа мероприятий - это мероприятия по планированию, строительству и содержанию лесных дорог, которая в целом носит вспомогательный характер, но при этом очень важна и обязательна для выполнения [18, 25].

Основной задачей логистического управления лесосырьевой базой следует считать определение сроков выполнения различных видов работ (здесь чаще всего речь идет о рубках) на каждой отдельной лесосеке (де-

---

<sup>1</sup>Работа выполнена в рамках международного проекта «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике», финансируемого Европейским союзом по программе приграничного сотрудничества KareliaENPI в соответствии с Программой стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012-2016 г.

лянке) с тем, чтобы удовлетворить все запросы потребителей с наименьшими затратами и при выполнении всех ограничений, связанных с обеспечением условия неистощительного лесопользования [23]. При этом критическим ограничением на выполнение работ на участках является их транспортная доступность. Проведение большей части видов работ возможно только при наличии условий для проезда к лесосеке, что значительно усложняет задачу. При отсутствии дороги к лесосеке возможны две альтернативы: либо необходимо запланировать строительство нового участка дороги, либо изменить сроки выполнения работ [25]. Оптимальные сроки рубок могут быть определены по таблицам хода роста или с использованием математических моделей и компьютерных программ-симуляторов развития древостоев [22, 26, 33, 38]. Однако отсутствие дорог приводит к тому, что оптимальное с учетом затрат на строительство дорог решение оказывается связанным со смещением времени проведения работ на отдельных участках на более ранние или поздние сроки относительно оптимальных моментов по показателям продуктивности древостоев.

На сегодняшний день все подходы к решению описанной задачи логистического управления лесосырьевой базой могут быть разделены на две группы: «однофазные» и «двухфазные».

Первую группу составляют подходы, в которых планирование заготовки и дорожного строительства осуществляется одновременно путем решения одной оптимизационной задачи («однофазные»). В этом случае задача получается более сложной и трудной для решения, но вместе с тем дает результаты более близкие к оптимальным. Пример методики планирования заготовки и строительства дорог как единой оптимизационной задачи можно найти в работах [27, 36].

Во вторую группу включаются подходы, в которых подзадача определения оптимального размещения дорожной сети в лесосырьевой базе и подзадача календарного планирования заготовки ставятся и решаются от-

дельно друг от друга и последовательно. Назовем эту группу подходов «двухфазными». При этом при решении первой подзадачи учитывается пространственное размещение древостоев, а при решении второй - полученный план транспортного освоения. Т. е., из рассмотрения исключаются участки, недоступные в заданном периоде по транспортному критерию.

При использовании «двухфазного» подхода более сложной является первая подзадача - оптимальное размещение дорог в лесосырьевой базе. В различное время был предложен ряд разнообразных методов ее решения. Сначала использовались простейшие аналитические модели на основе усредненных характеристик лесосырьевых баз [8, 13, 14]. Следующую группу составляют разнообразные методы размещения сети дорог на заданном множестве точек, базирующиеся на линейном, нелинейном или целочисленном программировании [2, 5, 9, 11,12, 20,21]. Эти методы хорошо зарекомендовали себя, т. к. они позволяют учитывать особенности лесосырьевой базы в каждой из рассматриваемых точек, особенности условий строительства дорог для каждого конкретного участка (от точки до точки) [19, 24], а также дают возможность работать с лесосырьевыми базами неправильной формы. Благодаря этому эти методы широко применяются и в настоящее время. Однако методы с фиксированными точками не позволяют в ходе оптимизации изменять положение развилок (перекрестков). Для устранения этого недостатка в работе [3] предлагается итеративный метод оптимизации координат развилок. Методика, основанная на динамическом программировании, дополняет этот подход возможностью учета фактора времени [4]. И, наконец, еще одна группа методов размещения сетей лесных дорог использует схемы решения задачи Штейнера на графах со свободно размещаемыми развилками [6, 7, 15-17, 37].

Вторая подзадача, решаемая в рамках «двухфазного» подхода - это задача определения очередности выполнения работ на участках при заданной дорожной сети. Существует несколько вариантов формулировки этой

задачи. Чаще всего они решаются с помощью методов целочисленного программирования, а при оперативном планировании и с помощью комбинации целочисленного программирования и эвристических методов [28, 34, 35].

«Однофазный» подход, как правило, используется для решения задач на стратегическом уровне планирования (с горизонтом планирования более года), тогда как «двухфазный» применяется как на стратегическом, так и на тактическом (с горизонтом планирования менее года) уровнях.

Отдельную группу задач составляют задачи ремонта и реконструкции дорог, подходы к решению которых предложены, в работах [30, 31].

### **Задачи стратегического управления лесосырьевой базой ЛЗП**

В рассматриваемом подходе [27] планирование заготовки, строительства и реконструкции дорог выполняется одновременно путем решения единой оптимизационной задачи, т. е. подход является «однофазным».

Постановка задачи следующая. Пусть имеется лесосырьевая база, разделенная на отдельные участки - делянки. Каждой делянке соответствует древостой с определенными параметрами: запасом, породным составом, возрастом, почвенными условиями и т. д. Известен список делянок, которые могут быть назначены в рубку посезонно в пределах горизонта планирования. Для определения состояния древостоев на делянках в любой момент времени используются модели роста и программы-симуляторы развития древостоев такие, как, например, МОТТИ [22, 26, 33, 38].

Вся производимая на делянках продукция делится на три группы: экспортные круглые лесоматериалы, пиловочник и баланс для отечественного рынка. В действительности видов продукции, отличающихся по размерам по породе и по качеству, бывает больше, однако, на данном уровне планирования (тактическом) достаточно именно такого деления. Это позволяет значительно упростить решение задачи.

Для осуществления заготовки на определенной делянке необходимо наличие дороги, по которой можно подъехать к соответствующей погрузочной площадке. Часть делянок примыкает к уже существующим дорогам, но есть и такие, для доступа к которым необходимо строить новые участки дорог. Принимаются во внимание также конструктивные особенности дорог. Они делятся на два класса: дороги круглогодичного действия и зимние дороги. Строительство дорог круглогодичного действия требует намного больших затрат, чем строительство зимних дорог.

Заготовленная в зимнее время древесина (частично) может быть доставлена по зимним дорогам до промежуточных терминалов для временного хранения и дальнейшей транспортировки потребителю в летнее время, когда производственные ресурсы обычно бывают более свободными. Хранение древесины на терминалах с предыдущей зимы до следующей не допускается во избежание потери качества. Кроме того, дорожное строительство должно выполняться по возможности равномерно в пределах планового периода и быть запланированным так, чтобы дорога была уже готова к началу заготовки на конкретной делянке. Дорожное строительство может выполняться только в летний период.

Объемы поставок продукции каждому потребителю задаются в виде верхней и нижней границы. Также должен быть задан уровень цен на каждый вид продукции с учетом их изменения. Транспортировка продукции потребителям выполняется автомобильным транспортом.

Задача заключается в определении для каждого сезона, на которые разделен горизонт планирования, следующих значений:

- списка отводимых в рубку делянок;
- объема производства круглых лесоматериалов с учетом обеспечения всех запросов потребителей;
- новых участков зимних и всесезонных дорог, которые должны быть построены до момента начала заготовок;

- участков зимних дорог, которые должны быть реконструированы во всесезонные;
- объемов поставки круглых лесоматериалов для каждого пункта назначения;
- объемов круглых лесоматериалов, временно хранящихся на промежуточных складах;
- потребных производственных мощностей на заготовке и транспортировке древесины.

Рассматриваемая оптимизационная задача представляет собой задачу смешанного целочисленного линейного программирования с сезонными периодами, в которой непрерывные переменные описывают величину потоков древесины и площади рубок, а целочисленные переменные логического типа обозначают принимаемые решения в каждом конкретном периоде: в отношении дорог - строить или не строить, реконструировать или не реконструировать; в отношении участков - рубить или не рубить. Главная цель: обеспечить выгоднейший в пределах горизонта планирования компромисс между доходом от продажи продукции лесозаготовок и затратами на заготовку, транспортировку, хранение, строительство и реконструкцию дорог.

В простых случаях решение этой оптимизационной задачи возможно с помощью метода ветвей и границ, реализованного в коммерческих пакетах программ линейного программирования. В более сложных случаях для снижения времени решения и повышения его качества пользуются итерационным методом, базирующемся на лагранжевой релаксации. В этом случае задача оптимизации разделяется на две более простые подзадачи [27].

### **Задачи тактического управления лесосырьевой базой ЛЗП**

Одной из важнейших задач, стоящих перед ЛЗП, является вопрос, как наилучшим образом в течение года использовать имеющуюся у них собственную лесозаготовительную технику или технику, привлекаемую на контрактной основе (аутсорсинг). В настоящее время одной из самых эффективных технологий лесозаготовок, широко распространенных в мире и в России, является сортиментная технология, базирующаяся на применении таких машин, как харвестер и форвардер. Рассмотрим подход к решению задач оперативного логистического управления лесозаготовками с помощью харвестеров и форвардеров, а также и харвардеров [28]. Главная цель состоит в том, чтобы выполнить все запланированные лесозаготовительные работы с наименьшими затратами. Затраты включают в себя несколько компонент. Во-первых - это эксплуатационные затраты, связанные с работой основных машин. Во-вторых - это затраты на транспортировку операторов с мест их базирования на делянки и обратно. Третий компонент затрат - это затраты на перемещение основных машин с делянки на делянку.

В данной постановке задачи горизонт планирования ограничен одним годом с выделением четырех сезонов: зима, весна, лето и осень. Список и характеристики делянок, отведенных в рубку должны быть известны заранее, они являются исходными данными. Предполагается, что имеется доступ по дорожной сети к каждой делянке, расстояния и время движения - известны. Известен состав лесозаготовительных машин, которые могут быть привлечены к работам, их производительность и другие параметры. Каждая машина имеет заданное максимальное возможное время ее работы (в часах) в каждом сезоне. Для обеспечения непрерывной работы машин, вводится т. н. допустимое время перекрытия сезонов. Обычно оно принимается равным одной неделе. Все операторы машин имеют заданные места дислокации (проживания) и выезжают к местам работ автомобильным транспортом. По завершении смены они возвращаются домой. На каждой

машине может работать несколько операторов в несколько смен. В случае недостатка производственных мощностей для заготовки всех запланированных делянок в течение года, остающиеся делянки помещаются в т. н. резерв. Для того, чтобы обеспечить определение оптимального решения с минимальными числом делянок и потенциальным объемом древесины в резерве, в модель вводятся штрафы за помещение делянки в резерв.

В целом это интегральная задача размещения и маршрутизации, которая является трудно решаемой даже для простых случаев. В работе [28] предлагается двухстадийный подход для ее решения. На первой стадии все делянки распределяются между имеющимися комплексами машин. При этом во внимание принимаются только затраты на заготовку и транспортировку операторов. Затраты на перемещение комплексов между делянками учитываются лишь приблизительно в усредненном виде. На второй стадии выполняется определение последовательности обхода комплексами тех делянок, которые были привязаны к ним при выполнении расчетов первой стадии. Эта подзадача представляет собой вариант задачи коммивояжера [29], для решения которой известно множество эвристических алгоритмов.

Главным недостатком этого подхода является то, что при решении первой подзадачи никак не учитываются затраты на перемещение машин. Поэтому при решении второй подзадачи уже невозможно достичь результатов близких к оптимальным, т. к. делянки, привязанные к одной машине, распределены неудачно, а именно сосредоточены вокруг мест проживания операторов. Затраты на перемещение машин в данном случае оказываются завышенными, т. к. делянки обычно располагаются на некотором расстоянии от мест проживания операторов (населенных пунктов) в любом направлении (см. рис. 1).



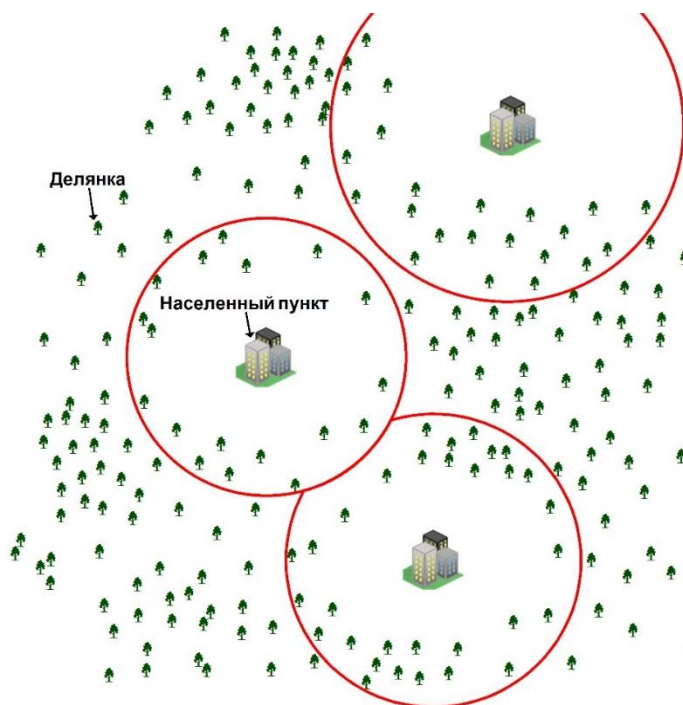


Рис. 1. Делянки, привязанные к машинам после выполнения первой стадии решения без учета затрат на перемещение машин между делянками

Лучшим вариантом было бы привязать к одной машине делянки, образующие компактную группу на некотором расстоянии от места проживания операторов (рис. 2).

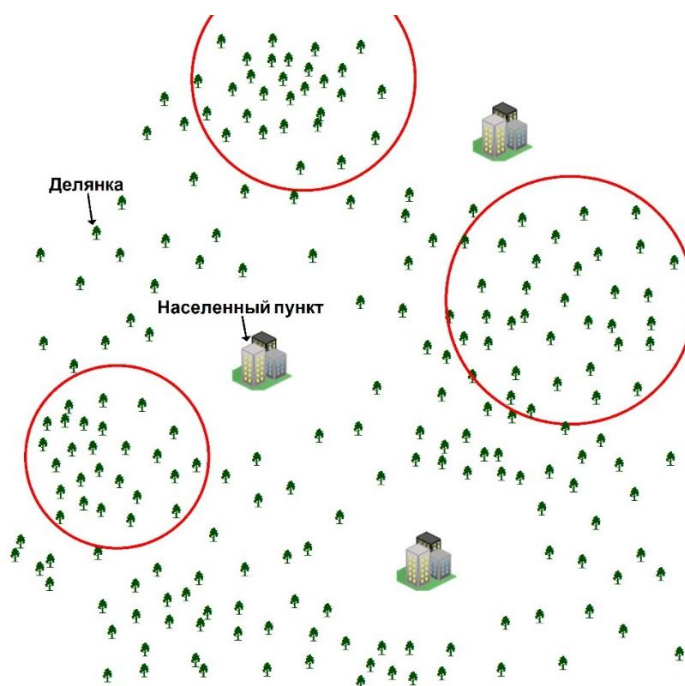


Рис. 2. Эффективное распределение делянок между машинами

Для того, чтобы добиться этого, необходимо каким-то образом включить в модель первой оптимизационной подзадачи элемент, связанный с затратами на перемещение машин, т. е. попробовать связать две стадии задачи. Это выполняется путем назначения каждой машине т. н. «центральной» делянки  $a$ , вокруг которой желательнее расположить зону ответственности этой машины, как это показано на рис. 2.

### **Выводы**

Методы логистики позволяют эффективно решать задачи управления лесосырьевой базой ЛЗП как на тактическом, так и на стратегическом уровнях.

Решение задач стратегического управления лесосырьевой базой ЛЗП дает возможность:

- обосновывать решения по заготовке, строительству дорог и транспортировке;
- выполнять анализ чувствительности логистической системы к изменению закупочных цен;
- оценивать возможный дефицит определенных видов круглых лесоматериалов в пределах горизонта планирования;
- сравнивать различные сценарии развития ситуации в отношении цен, затрат, наличия дополнительных лесных участков и т. д.

Решение задач тактического управления лесосырьевой базой ЛЗП дает возможность определить план работы каждого комплекса лесозаготовительных машин на год при условии минимизации затрат с учетом особенностей размещения делянок, мест дислокации операторов, характеристик машин, а также сезонности.

## Литература

1. Асламов С.В. Отдельные аспекты системного анализа развития лесного комплекса // Известия Иркутской государственной экономической академии. - 2007. - № 5. - С. 62-65.
2. Борисов Г.А., Герасимов Б.С., Сюкияйнен Р.А. Оптимизация схемы транспортного освоения лесосырьевой базы методами линейного программирования // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 1969. - № 2. - С. 123.
3. Борисов Г.А., Земляченко В.Н. Итеративный метод улучшения транспортных сетей лесозаготовительных предприятий // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 1971. - № 5. С. 51.
4. Борисов Г.А., Земляченко В.Н. Определение очередности транспортного освоения лесных массивов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 1973. - № 1. - С. 145.
5. Борисов Г.А., Земляченко В.Н., Сидоренко Г.И. Оптимальное трассирование лесовозных дорог // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 2001. - № 2. - С. 40-44.
6. Борисов Г.А., Кукин В.Д. Об оптимизации параметров лесотранспортных сетей в современных условиях // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 2009. - № 1. - С. 60-66.
7. Борисов Г.А., Кукин В.Д., Кузина В.И. Методы поиска наиболее выгодного варианта сети лесовозных дорог // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 2001. - № 3. - С. 63-70.
8. Венценосцев Ю.Н. Основы теории лесопромышленных производств. - М.: Лесн. пром-сть, 1966. - 158 с.
9. Герасимов Ю.Ю. Разработка системы оптимального проектирования сети лесовозных автомобильных дорог / Ю.Ю. Герасимов, А.П. Соколов, В.К. Катаров // Информационные технологии. - 2011. - №1 (68). - С.39-43.
10. Герасимов, Ю.Ю. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия [Текст] / Ю.Ю. Герасимов, В.С. Сюнёв, А.П. Соколов и др. - Йёнсуу: НИИ леса Финляндии, 2008. - 126 с.
11. Давыдков Д.Г. Система оптимального проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом динамики лесосырьевой базы / Д.Г. Давыдков, Д.В. Рожин, А.П. Соколов, В.С. Сюнёв // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. - 2013. - №4 (133). - С.69-74.
12. Ельдештейн Ю.М., Болотов О.В. Решение задач макрологистики в лесном комплексе // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. - 2007. - № 1. - С. 21-25.
13. Ильин Б.А. Проектирование и организация лесозаготовительных предприятий. - М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. - 428 с.
14. Ильин Б.А., Кувалдин Б.И. Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог. - М.: Лесн. пром-сть, 1982. - 384 с.
15. Кукин В.Д. Генетические операторы эволюционной модели для потоковой задачи Штейнера // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 2010. - № 2. - С. 61-67.
16. Кукин В.Д. Эволюционная модель для евклидовой задачи Штейнера с потоками и зависящими от них весами // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 2008. - № 3. - С. 125-132.

17. Кукин В.Д., Кузина В.И. Методика решения задачи штейнера с потоками и весами // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. - 2000. - № 2. - С. 143.
18. Развитие транспортной инфраструктуры лесной отрасли - опыт Финляндии / Ю.Ю. Герасимов, С. Карвинен, В. С. Сюнёв, А. П. Соколов, В. К. Катаров // Транспортное дело России. - 2009. - № 77. - С. 99-102.
19. Расчет стоимости строительства альтернативных участков лесовозных дорог / В.К. Катаров, Д.В. Рожин, М.В. Туунен, И.В. Редозубов // Транспортное дело России. - 2010. - № 2. - С. 106-111.
20. Совершенствование системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог / Ю.Ю. Герасимов, А.П. Соколов, В.К. Катаров, В.С. Сюнёв, Д.В. Рожин, Н.В. Ковалева // Ученые записки ПетрГУ. - 2013. - №8 (137). - С.70-76.
21. Суриков В.Т. Экономико-математическая модель оптимальных схем лесотранспорта // Лесной журнал. - 1988. - №3. - С. 27-31.
22. Суханов Ю.В., Пеккоев А.Н., Лукашевич В.М., Катаров В.К. МОТТИ — компьютерная система поддержки принятия решений в лесном хозяйстве // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. - 2012. - Вып. 9. - С. 55-57.
23. Шегельман И.Р., Кузнецов А.В., Скрыпник В.И., Баклагин В.Н. Методика оптимизаций транспортно-технологического освоения лесосырьевой базы с минимизацией затрат на заготовку и вывозку древесины // Инженерный вестник Дона. - 2012. - Т. 23., № 4-2. - С. 35.
24. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Кузнецов А.В. Минимизация затрат при строительстве усов с покрытием из древесных отходов // Перспективы науки. - 2012. - № 28. - С. 103-106.
25. Шегельман И.Р., Щукин П.О., Петухов Р.А. Ресурсный подход к развитию региональной сети лесовозных дорог // Перспективы науки. - 2011. - № 26. - С. 188-191.
26. Ahtikoski, A., Päätaalo, M.-L., Niemistö, P., Karhu, J., Poutiainen, E. Effect of Alternative Thinning Intensities on the Financial Outcome in Silver Birch (Betula pendula Roth) Stands: A Case Study Based on Long-Term Experiments and MOТTI Stand Simulations // Baltic Forestry. - 2004. - №10(2). - P. 46–55.
27. Andalaft, N., Andalaft, P., Guignard, M., Magendzo, A., Wainer, A., and Weintraub, A. A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation // Operations Research. - 2003. - № 51(4). - P. 613–628.
28. Bredstrom D., Jonsson P., Ronnqvist M. Annual planning of harvesting resources in the forest industry // International transactions in operational research. - 2010. - № 17. - P. 155-177.
29. Cordeau J-F, Laporte G, Mercier A. A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows // Journal of the Operational Research Society. - 2001. - № 52. - P. 928-936.
30. Frisk, M., Karlsson, J., and Rönnqvist, M. RoadOpt – A decision support system for road upgrading in forestry // Scandinavian Journal of Forest Research. - 2006. - № 21. - P. 5–15.
31. Henningsson, M., Karlsson, J., and Rönnqvist, M. Optimization models for forest road upgrade planning // Journal of Mathematical Models and Algorithms. - 2007. - № 6(1). - P. 3–23.

32. Hultqvist D., Olsson L. Demand based tactical planning of the roundwood supply chain with respect to stochastic disturbances. FSCN rapport R-03-44. - Sundsvall: Mid Sweden University, 2004. - 59 p.
33. Hynynen, J., Ahtikoski, A., Siitonen, J., Sievänen, R., Liski, J. Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and non-timber production // *Forest Ecology and Management*. - 2005. - №207. - P. 5–18.
34. Karlsson, J., Rönnqvist, M., and Bergström, J. An optimization model for annual harvest planning // *Canadian Journal of Forest Research*. - 2004. - № 34. - P. 1747–1754.
35. Karlsson, J., Rönnqvist, M., and Bergström, J. Short-term harvest planning including scheduling of harvest crews // *International Transactions of Operations Research*. - 2003. - № 10. - P. 413–431.
36. Kirby, M. W., Hager, W. A., and Wong, P. Simultaneous planning of wildland management and transportation alterations // *TIMS Studies in the Management Sciences*. - 1986. - № 21. - P. 371–387.
37. Kukin M.B. Genetic operators of an evolutionary model for the steiner flow problem // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. - 2010. - T. 49. № 2. - P. 227-233.
38. Salminen, H., Lehtonen, M., Hynynen, J. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator // *Computers and Electronics in Agriculture*. - 2005. - №49(1). - P. 103–113.

## References

1. Aslamov S.V. Otdel'nye aspekty sistemnogo analiza razvitija lesnogo kompleksa // *Izvestija Irkutskoj gosudarstvennoj jekonomicheskoy akademii*. - 2007. - № 5. - S. 62-65.
2. Borisov G.A., Gerasimov B.S., Sjukijajnen R.A. Optimizacija shemy transportnogo osvoenija lesosyr'evoy bazy metodami linejnogo programmirovaniya // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. - 1969. - № 2. - S. 123.
3. Borisov G.A., Zemljachenko V.N. Iterativnyj metod uluchshenija transportnyh setej lesozagotovitel'nyh predpriyatij // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. - 1971. - № 5. S. 51.
4. Borisov G.A., Zemljachenko V.N. Opredelenie ocherednosti transportnogo osvoenija lesnyh massivov // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. - 1973. - № 1. - S. 145.
5. Borisov G.A., Zemljachenko V.N., Sidorenko G.I. Optimal'noe trassirovanie lesovoznyh dorog // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. - 2001. - № 2. - S. 40-44.
6. Borisov G.A., Kukin V.D. Ob optimizacii parametrov lesotransportnyh setej v sovremennyh uslovijah // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. - 2009. - № 1. - S. 60-66.
7. Borisov G.A., Kukin V.D., Kuzina V.I. Metody poiska naivyygodnejshogo varianta seti lesovoznyh dorog // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. - 2001. - № 3. - S. 63-70.
8. Vencenoscev Ju.N. Osnovy teorii lesopromyshlennyh proizvodstv. - M.: Lesn. promst', 1966. - 158 s.
9. Gerasimov Ju.Ju. Razrabotka sistemy optimal'nogo proektirovaniya seti lesovoznnyh avtomobil'nyh dorog / Ju.Ju. Gerasimov, A.P. Sokolov, V.K. Kata-rov // *Informacionnye tehnologii*. - 2011. - №1 (68). - S.39-43.

10. Gerasimov, Ju.Ju. Sravnenie tehnologij lesosechnyh rabot v lesozagotovi-tel'nyh kompanijah Respubliki Karelija [Tekst] / Ju.Ju. Gerasimov, V.S. Sju-njov, A.P. Sokolov i dr. - Joensuu: NII lesa Finljandii, 2008. - 126 s.
11. Davydkov D.G. Sistema optimal'nogo proektirovanija lesovoznyh avtomobil'nyh dorog s uchetom dinamiki lesosyr'evoy bazy / D.G. Davydkov, D.V. Rozhin, A.P. Sokolov, V.S. Sjunjov // Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. - 2013. - №4 (133). - S.69-74.
12. El'deshtejn Ju.M., Bolotov O.V. Reshenie zadach makrologistiki v lesnom komplekse // Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. - 2007. - № 1. - S. 21-25.
13. Il'in B.A. Proektirovanie i organizacija lesozagotovitel'nyh predpriyatij. - M.; L.: Goslesbumizdat, 1955. - 428 s.
14. Il'in B.A., Kuvaldin B.I. Proektirovanie, stroitel'stvo i jekspluatacija le-sovoznnyh dorog. - M.: Lesn. prom-st', 1982. - 384 s.
15. Kukin V.D. Geneticheskie operatory jevoljucionnoj modeli dlja potokovoj zadachi Shtejnera // Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Teorija i sistemy upravlenija. - 2010. - № 2. - S. 61-67.
16. Kukin V.D. Jevojljucionnaja model' dlja evklidovoj zadachi Shtejnera s potokami i zavisjashimi ot nih vesami // Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Teorija i sistemy upravlenija. - 2008. - № 3. - S. 125-132.
17. Kukin V.D., Kuzina V.I. Metodika reshenija zadachi shtejnera s potokami i vesami // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. - 2000. - № 2. - S. 143.
18. Razvitie transportnoj infrastruktury lesnoj otrasli - opyt Finljandii / Ju.Ju. Gerasimov, S. Karvinen, V. S. Sjunjov, A. P. Sokolov, V. K. Katarov // Transportnoe delo Rossii. - 2009. - № 77. - S. 99-102.
19. Raschet stoimosti stroitel'stva al'ternativnyh uchastkov lesovoznyh dorog / V.K. Katarov, D.V. Rozhin, M.V. Tujunen, I.V. Redozubov // Transportnoe delo Rossii. - 2010. - № 2. - S. 106-111.
20. Sovershenstvovanie sistemy optimal'nogo proektirovanija seti lesnyh avtomobil'nyh dorog / Ju.Ju. Gerasimov, A.P. Sokolov, V.K. Katarov, V.S. Sju-njov, D.V. Rozhin, N.V. Kovaleva // Uchenye zapiski PetrGU. - 2013. - №8 (137). - S.70-76.
21. Surikov V.T. Jekonomiko-matematicheskaja model' optimal'nyh shem leso-transporta // Lesnoj zhurnal. - 1988. - №3. - S. 27-31.
22. Suhanov Ju.V., Pekkoev A.N., Lukashevich V.M., Katarov V.K. MOTTI — komp'juternaja sistema podderzhki prinjatija reshenij v lesnom hozjajstve // Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU. - 2012. - Vyp. 9. - S. 55-57.
23. Shegel'man I.R., Kuznecov A.V., Skrypnik V.I., Baklagin V.N. Metodika optimizacij transportno-tehnologicheskogo osvoenija lesosyr'evoy bazy s minimizaciej zatrat na zagotovku i vyvozku drevesiny // Inzhenernyj vestnik Dona. - 2012. - T. 23., № 4-2. - S. 35.
24. Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Kuznecov A.V. Minimizacija zatrat pri stroitel'stve usov s pokrytiem iz drevesnyh othodov // Perspektivy nauki. - 2012. - № 28. - S. 103-106.
25. Shegel'man I.R., Shhukin P.O., Petuhov R.A. Resursnyj podhod k razvitiju regional'noj seti lesovoznyh dorog // Perspektivy nauki. - 2011. - № 26. - S. 188-191.
26. Ahtikoski, A., Päätaalo, M.-L., Niemistö, P., Karhu, J., Poutiainen, E. Effect of Alternative Thinning Intensities on the Financial Outcome in Silver Birch (Betulapendula Roth) Stands: A Case Study Based on Long-Term Experiments and MOTTI Stand Simulations // Baltic Forestry. - 2004. - №10(2). - P. 46–55.
27. Andalaft, N., Andalaft, P., Guignard, M., Magendzo, A., Wainer, A., and Weintraub, A. A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation // Operations Research. - 2003. - № 51(4). - P. 613–628.

28. Bredstrom D., Jonsson P., Ronnqvist M. Annual planning of harvesting resources in the forest industry // *International transactions in operational research*. - 2010. - № 17. - P. 155-177.
29. Cordeau J-F, Laporte G, Mercier A. A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows // *Journal of the Operational Research Society*. - 2001. - № 52. - P. 928-936.
30. Frisk, M., Karlsson, J., and Rönnqvist, M. RoadOpt – A decision support system for road upgrading in forestry // *Scandinavian Journal of Forest Research*. - 2006. - № 21. - P. 5–15.
31. Henningsson, M., Karlsson, J., and Rönnqvist, M. Optimization models for forest road upgrade planning // *Journal of Mathematical Models and Algorithms*. - 2007. - № 6(1). - P. 3–23.
32. Hultqvist D., Olsson L. Demand based tactical planning of the roundwood supply chain with respect to stochastic disturbances. FSCN rapport R-03-44. - Sundsvall: Mid Sweden University, 2004. - 59 p.
33. Hynynen, J., Ahtikoski, A., Siitonen, J., Sievänen, R., Liski, J. Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and non-timber production // *Forest Ecology and Management*. - 2005. - №207. - P. 5–18.
34. Karlsson, J., Rönnqvist, M., and Bergström, J. An optimization model for annual harvest planning // *Canadian Journal of Forest Research*. - 2004. - № 34. - P. 1747–1754.
35. Karlsson, J., Rönnqvist, M., and Bergström, J. Short-term harvest planning including scheduling of harvest crews // *International Transactions of Operations Research*. - 2003. - № 10. - P. 413–431.
36. Kirby, M. W., Hager, W. A., and Wong, P. Simultaneous planning of wildland management and transportation alterations // *TIMS Studies in the Management Sciences*. - 1986. - № 21. - P. 371–387.
37. Kukin M.V. Genetic operators of an evolutionary model for the steiner flow problem // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. - 2010. - T. 49. № 2. - P. 227-233.
38. Salminen, H., Lehtonen, M., Hynynen, J. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator // *Computers and Electronics in Agriculture*. - 2005. - №49(1). - P. 103–113.