

УДК 630.6

DOI: 10.15393/j2.art.2016.3201

Статья

Оптимизационная модель синтеза транспортного плана перевозок древесины

Антон П. Соколов^{1,*} и Владимир С. Сюнёв²

¹ Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33; E-Mails: a_sokolov@psu.karelia.ru

² Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33; E-Mails: siounev@psu.karelia.ru

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: a_sokolov@psu.karelia.ru;
Tel.: +7(8142)573818; Fax: +7(8142)711000.

Получена: 04 марта 2016 / Принята: 15 апреля 2016 / Опубликовано: 24 апреля 2016

Аннотация: В статье описывается проблема управления транспортно-технологическими процессами лесозаготовительного производства в контексте принятия решений на стратегическом, тактическом и оперативном уровне. Особое внимание уделяется процессам заготовки и транспортировки древесины в условиях распределенного по обширным территориям производства и постоянно изменяющейся его пространственной структуры. Приводится обзор подходов и методов, применяемых для решения задач поддержки принятия решений в отношении оптимальной организации лесозаготовительного производства. В результате предложена оптимизационная модель синтеза транспортного плана перевозок древесины, реализованная в соответствующей системе поддержки принятия решений.

Ключевые слова: лесосечные работы; транспорт леса; системы поддержки принятия решений; математическое программирование; логистика

DOI: 10.15393/j2.art.2016.3201

Article

A optimization model for wood supply transport planning

Anton Sokolov ^{1,*} and Vladimir Syunev ²

¹ Petrozavodsk State University, Lenin st., 33, Petrozavodsk, Russia; a_sokolov@psu.karelia.ru

² Petrozavodsk State University, Lenin st., 33, Petrozavodsk, Russia; E-Mails:
siounev@psu.karelia.ru

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: a_sokolov@psu.karelia.ru;
Tel.: +7(8142)573818; Fax: +7(8142)711000.

Received: 04 March 2016 / Accepted: 15 April 2016 / Published: 24 April 2016

Abstract: The article introduces the operational-tactical-strategic context of wood supply in logging companies. In this context, the transition to cut-to-length means that multiple assortments may be transformed at multiple locations in the supply chain for numerous destinations. Harvesting-forwarding and transportation are the key activities in this context. This article gives an overview of the mathematical models implementing in decision support systems (DSS) for solving these tasks. A optimization model for wood supply transport planning was developed as a result of the work. Model was implemented in a new decision support system.

Keywords: wood harvesting; timber transport; decision support systems; mathematical programming; logistics

1. Введение

Заготовка и транспортировка древесины в России, как правило, выполняется силами арендаторов лесных участков или привлекаемых ими подрядчиков. Развитие технологий, а также возрастающие экологические требования заставляют постоянно совершенствовать цепочки поставок в направлении все более широкого использования сортиментной заготовки древесины, как наиболее совершенного метода. Сортименты, получаемые в результате применения таких технологий, классифицируются в первую очередь по назначению. Пиловочник, баланс, дровяная древесина, а также лесосечные отходы – это основные группы сортиментов. Каждая группа подразделяется на подгруппы в соответствии с породой древесины, качества, размеров бревен и т. п. После заготовки пиловочник, баланс и дровяная древесина транспортируются непосредственным потребителям автомобильным или железнодорожным транспортом. Эти же сортименты могут также отправляться на терминалы для промежуточного хранения перед отправкой потребителям. Заготовка круглого леса приводит к образованию ряда субпродуктов таких, как, например, вершины и ветви деревьев. Эта древесная биомасса подвергается сбору и концентрации на придорожных площадках для сушки и дальнейшей переработки в топливную щепу, которая поставляется предприятиям местной энергетики.

Планирование процессов сортиментной заготовки древесины часто ставит специалистов перед выбором между несколькими возможными вариантами технологических решений. Для решения этих задач могут быть с успехом использованы оптимизационные методы. При этом существует несколько уровней задач в зависимости от величины горизонта планирования, от долгосрочных, связанных с определением направлений развития компаний, до краткосрочных, таких, как оперативное планирование заготовки древесины, составление оперативных транспортных планов, маршрутов движения транспортных средств и т. д. [43]. В лесозаготовительном производстве, как правило, выделяют три уровня планирования [63, 71]. Стратегический уровень включает решения, охватывающие периоды, измеряемые годами и десятилетиями, тактический уровень, как правило, оперирует на горизонте в один год, хотя здесь могут рассматриваться и более короткие и более длинные промежутки. Оперативное планирование относится к промежуткам времени, измеряемыми месяцами, неделями и вплоть до одного дня [49]. Временные рамки для каждого уровня не задаются жестко, а зависят от характера решаемых задач. В общем виде стратегические решения включают постановку и обеспечение выполнения задач долгосрочного развития предприятия, планирование инфраструктуры и инвестиций; тактические же фокусируются на обеспечении необходимого порядка и взаимодействия элементов производственной системы, годовом планировании производства, объемов привлекаемых производственных ресурсов и мощностей и т. д.; на оперативном уровне идентифицируются производственные ресурсы и осуществляется текущее планирование их использования. Различные уровни планирования

предъявляют различные требования к системам поддержки принятия управленческих решений.

В том, что касается выработки решений в отношении планирования транспорта древесины, к стратегическому уровню относятся горизонты от одного года и более. Примеры систем поддержки принятия решений, связанных с развитием транспортных подсистем и систем поставок древесины, описаны в работах [45, 58]. На тактическом уровне рассматриваются решения на горизонтах от нескольких месяцев до нескольких недель. Примеры систем тактического уровня можно найти в работе [39]. Оперативный уровень обычно включает решение задач синтеза дневных или сменных маршрутов и транспортных планов для автомобилей. Существует большое число отечественных и зарубежных исследований, посвященных решению задач оперативного уровня [33, 52, 57, 62, 64, 67, 70].

Эффективное решение задач управления процессами лесозаготовительного производства одновременно на стратегическом, тактическом и оперативном уровне является сложной проблемой, которая во многом определяется экстремально большой размерностью целого ряда таких задач. Вместе с тем исследования показывают, что интегрированное планирование во всех звеньях цепи поставок древесины способствует значительному росту экономической эффективности на уровне компаний [1, 5, 6, 8, 16-20, 32, 48].

В соответствии с лесным законодательством РФ ведение лесного хозяйства на всех уровнях принятия решений осуществляется в соответствии с проектами освоения лесных участков [53]. Проекты освоения составляются в соответствии с региональными лесными планами, которые пересматриваются каждые 10 лет. Проекты освоения включают списки и координаты лесных участков, назначенных в рубку, с указанием вида рубки и применяемых методов в соответствии с действующими правилами. Проекты освоения разрабатываются после назначения расчетной лесосеки для арендуемого участка. Также обеспечивается соблюдение условий примыкания насаждений с учетом последующих периодов планирования. Индивидуальные характеристики каждой проектируемой делянки, а также параметры применяемых технологий очень важны для достижения хороших результатов по многим направлениям, таким как сохранение лесной экологии, охрана и защита леса, безопасность работ [53]. Таким образом, проект освоения лесов является ключевым компонентом в процессе планирования производственных процессов лесозаготовительной компании.

В настоящее время успешное выполнение проектов освоения лесных участков в большой мере зависит от индивидуальных знаний и опыта руководителей и специалистов, работающих в лесозаготовительных компаниях. Этот процесс является весьма трудоемким и может представлять собой узкое место в общем осуществлении планирования. Все более усугубляющейся проблемой является быстро изменяющаяся экономическая ситуация, которая требует внесения оперативных изменений в проекты освоения. Сложившиеся в России нормы ведения бизнеса устанавливают ряд ограничений на процесс управления цепями поставок древесины:

- Одновременное использование разных технологий и систем машин, отличающихся по производительности, качеству и номенклатуре продукции.
- Малоухоженные смешанные леса, что приводит к увеличению видов продукции, получаемых на отдельных участках.
- Ярко выраженная сезонная доступность лесных участков и неравномерное распределение лесозаготовительных операций в течение года.
- Годовые планы поставок древесины составляются в соответствии с объемами, оговоренными в контрактах с потребителями, однако, ежемесячный объем поставок может достаточно гибко изменяться в зависимости от таких факторов, как сезонные ограничения, рыночная ситуация, инфраструктура и т. п.
- Широко используется промежуточное хранение древесины на специальных лесных или нижних складах.
- Большинство лесозаготовительных компаний осуществляют работу с использованием собственных машин и оборудования.
- Ограничения максимальной нагрузки на ось автомобилей при движении по дорогам общего пользования и мостам не дают повсеместно использовать большегрузный транспорт.
- Состояние дорог и мостов может сильно отличаться в различные периоды времени и так далее.

Эти условия определяют необходимость разработки систем поддержки принятия решений в области лесозаготовительного производства, учитывающих перечисленные специфические особенности.

2. Материалы и методы

Для поддержки принятия решений в отношении планирования процессов лесозаготовительных предприятий применяется широкий спектр оптимизационных методов, однако, разные задачи обладают разной сложностью и допустимым для своего решения временем. Например, задачи оперативного планирования должны решаться как можно быстрее в течение нескольких минут, тогда как решение долгосрочных стратегических задач не так требовательно к времени своего решения. Такие задачи допускают время поиска решения, измеряемое многими часами. Поэтому для решения оперативных задач чаще используются эвристические и метаэвристические методы, а для решения тактических и стратегических задач – методы целочисленного линейного или стохастического программирования [43]. Также находят применение методы динамического программирования. В работах [55, 60] описывается применение методов динамического программирования для решения целого спектра задач планирования на уровне компании, включая определение стратегических и тактических целей на основе эффективного управления имеющимися ресурсами.

Одной из основных задач разработанной при участии авторов системы поддержки принятия решений, является отыскание эффективных оперативных, тактических и стратегических решений по организации транспортного процесса лесозаготовительного предприятия, базирующихся на рациональном распределении имеющихся транспортных ресурсов [3, 26, 28, 46, 47].

Задачи управления транспортировкой входят в сферу производственной и транспортной логистики. Транспортная логистика занимается исключительно транспортом общего пользования [15]. Специализированный транспорт, управление которым осуществляет само предприятие-производитель продукции, относится к сфере производственной логистики. Для лесозаготовительной компании в основном характерна вторая ситуация. Вообще, как правило, лесозаготовительные компании в России сами занимаются распределением и сбытом своей продукции без привлечения посреднических торговых организаций [12, 24]. Таким образом, задачи поиска потребителей, организация работы с покупателями, а также организация поставок обычно решаются ими самостоятельно. Даже в случае применения операционного аутсорсинга в сфере транспорта, управление поставками чаще всего остается зоной ответственности самой компании. В этом смысле рассматриваемые задачи выходят на макроуровень и должны согласовываться в рамках логистических цепочек внутри лесного комплекса в целом [2, 11, 22, 29, 30, 31].

К основным задачам управления транспортом лесозаготовительной компании относятся [22-24, 38]:

- Выбор типа перевозок (унимодальные или интермодальные) и применяемых видов транспорта (автомобильный, железнодорожный, водный).
- Выбор типов, марок и моделей используемых транспортных средств.
- Обеспечение технологического единства транспортно-складского процесса включая определение числа и вместимости промежуточных лесных складов.
- Определение производственных мощностей на транспорте (числа задействованных транспортных средств и т. п.).
- Определение рациональных маршрутов перевозок и составление транспортного плана.
- Совместное планирование транспортных процессов на различных видах транспорта.
- Контроль над транспортным процессом, учет выполненной работы.

Перечисленные задачи решаются на различных уровнях управления. Результаты решения всех этих задач во многом зависят от принятого на конкретном предприятии варианта организации основного материального потока. Тип транспортных средств будет зависеть от того, на какой стадии переработки материального потока осуществляется перевозка (хлысты, сортименты, щепы и т. д.). При наличии нижних складов и терминалов перевозка будет, как минимум, двухэтапной, возможно, с применением нескольких разных видов транспорта и типов транспортных средств. Наличие или отсутствие промежуточных лесных складов также

определяет применяемые маршруты и способы их оптимизации. Все эти задачи носят долгосрочный характер и относятся к стратегическому или тактическому уровню принятия решений.

Задачи по определению рациональных маршрутов перевозок, составлению транспортного плана, контролю над транспортным процессом, учету выполненной работы, напротив, имеют горизонт планирования от нескольких дней до нескольких недель. Поэтому их относят к оперативному уровню принятия решений.

Как правило, задачи стратегического, тактического и оперативного уровней имеют различные подходы к решению.

Пример решения задач *стратегического и тактического уровня* предложен в работе [45]. В соответствии с этим подходом, к задачам стратегического уровня относятся решения по использованию железнодорожного транспорта наряду с автомобильным, а также по размещению и определению необходимой мощности терминалов. Горизонт планирования на стратегическом уровне - несколько лет.

К решениям тактического уровня относятся: определение для каждой делянки потребителей, оптимальных с точки зрения перевозок, а также решения по снижению холостого пробега автомобилей. На тактическом уровне горизонт планирования составляет от нескольких месяцев до одного года.

Иллюстрация решаемой задачи показана на рис. 1.

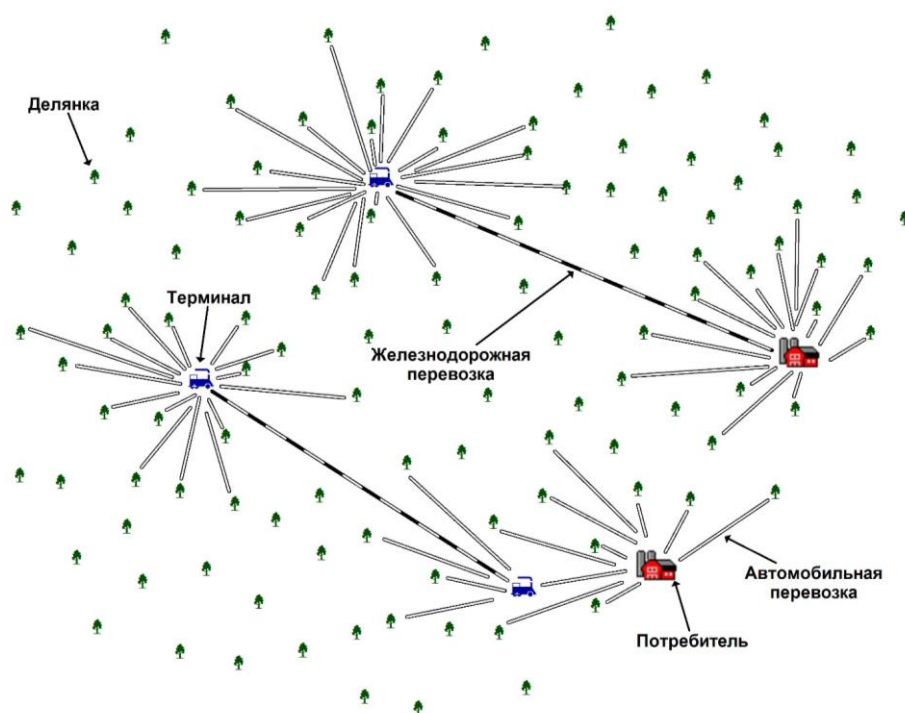


Рисунок 1. Иллюстрация задачи планирования транспорта лесозаготовительной компании на стратегическом и тактическом уровне

В этом примере имеется два потребителя и большое количество делянок, которые могут предоставить сырье для них. Поставки осуществляются либо непосредственно автомобильным транспортом, либо применяются интермодальные перевозки, когда автомобили-сортиментовозы используются для доставки к терминалам и, при необходимости, от терминалов потребителям, а между терминалами выполняется железнодорожная перевозка. В результате решения задачи необходимо ответить на следующие основные вопросы:

- Будут ли использоваться интермодальные перевозки?
- Какие из железнодорожных терминалов будут использоваться?
- Какие потребуются производственные мощности на железнодорожном транспорте, включая мощности терминалов?
- Какое распределение по видам производимой продукции необходимо применить для наилучшего удовлетворения спроса потребителей?
- Как будет распределен между потребителями объем каждого вида производимой продукции для каждой делянки?
- Как использовать обратный холостой пробег автомобилей?

Классическая транспортная задача заключается в определении объема поставок от поставщика i к потребителю j , с ограничениями на доступное количество товара у поставщиков и на потребности потребителей так, чтобы общие затраты на перевозку были наименьшими. В лесозаготовительной промышленности на одной и той же делянке всегда производится несколько видов продукции. Это сортименты, различных размеров и пород древесины, дровяная древесина, отходы лесозаготовок, топливная щепка и т. д. С другой стороны, потребители принимают только определенные виды продукции. Требования к характеристикам потребляемой продукции (в основном это касается сортиментов) могут быть сформулированы потребителями более или менее четко, поэтому обычно вводят понятие сортиментная группа, в которую включаются один или несколько видов сортиментов. Лесные участки могут представлять собой как отдельные делянки, так и группы делянок, объединенных по пространственному признаку. В качестве потребителей выступают лесопильные, деревообрабатывающие, целлюлозно-бумажные предприятия, котельные и т. п.

Поставленная задача сформулирована как задача линейного программирования. В случае крупного лесозаготовительного предприятия при планировании на 1 год необходимо учитывать 100-250 делянок, 5-15 потребителей, 7-12 видов продукции и 5-15 сортиментных групп. В этом случае максимально в задаче линейного программирования будет более 600 тысяч переменных и более 3000 ограничений. Однако обычно сортиментная группа включает в себя 1-3 вида сортиментов, каждый потребитель принимает тоже только 1-3 группы сортиментов. Поэтому после исключения из модели переменных и ограничений, невозможных в данном конкретном случае, их число будет гораздо меньшим: 20-100000

переменных и 3-1000 ограничений. Такая задача уже может быть решена с помощью стандартного программного обеспечения.

Центральной задачей эффективного распределения ресурсов транспорта на *оперативном уровне* является задача маршрутизации (VRP – vehicle routing problem). Решение классической задачи маршрутизации заключается в определении оптимальных маршрутов доставки грузов от одного поставщика многим клиентам (развозочные маршруты) или от нескольких поставщиков одному клиенту (сборные маршруты).

Общая постановка классической задачи маршрутизации (VRP) и классификация методов ее решения приведена, например, в работах [40, 41]. Пусть задан неориентированный граф $G = (V, E)$, где $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ – множество узлов, а $E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i < j\}$ – множество рёбер. Узел v_0 – представляет собой гараж (депо), в котором базируются m идентичных транспортных средств с грузоподъемностью (грузовместимостью) Q , остальные узлы представляют собой клиентов. Также задана неотрицательная матрица весов каждого ребра $C = (c_{ij})$. Веса имеют смысл расстояний, затрат или времени движения, соответствующих каждому ребру графа G . Каждому клиенту v_i соответствует неотрицательные объем продукции, подлежащий перевозке q_i и время обслуживания s_i . Определить множество из m маршрутов такое, чтобы общие затраты на транспортировку были минимальными; каждый маршрут начинался и заканчивался в гараже; каждый из клиентов входил не более чем в один из маршрутов и только один раз; суммарный объем перевозки внутри одного маршрута не превышал величину Q ; общая продолжительность выполнения маршрута не превышала предварительно заданного ограничения D . Число транспортных средств может быть заданной постоянной величиной или управляемой переменной. В последнем случае постоянные затраты на содержание транспортных средств должны быть включены в целевую функцию.

Несмотря на успехи в решении VRP, эта постановка в чистом виде не подходит для решения задачи организации перевозочного процесса лесозаготовительного предприятия на оперативном уровне. На самом деле она пригодна только для схемы «один ко многим» в случае использования развозочных (сборных или сборно-развозочных) маршрутов. Тогда как такая схема перевозок сегодня очень редко используется при транспортировке древесины.

Для решения задачи маршрутизации транспортных средств в перевозочном процессе лесозаготовительного предприятия классическая задача VRP должна быть существенно видоизменена и дополнена для учета ряда особенностей. Основные из них следующие:

- Сборные маршруты используются редко. Часто используется схема «многие ко многим», что требует разделения клиентов на две группы: делянки и потребителей с запрещением перемещения транспортного средства между клиентами одной группы (т. е. движение с делянки должно происходить в направлении потребителя, а движение от потребителя – к делянке или в гараж).
- Заранее не известно место назначения каждой партии произведенной продукции (здесь под партией подразумевается количество продукции, соответствующее

грузовместимости одного применяемого транспортного средства), т. е. обычно есть выбор из альтернативных вариантов поставки и он должен быть сделан оптимальным образом при формировании маршрута с учетом текущих потребностей клиентов.

- Оптимальными могут быть ситуации, когда одно и то же транспортное средство посещает одну и ту же делянку или одного и того же клиента несколько раз в пределах сменного или дневного маршрута, а также ситуации, когда один и тот же клиент или одна и та же делянка посещается несколькими разными транспортными средствами в зависимости от имеющихся объемов на делянках или плановых объемов потребления.
- Могут использоваться разные типы транспортных средств, отличающиеся по грузовой вместимости.
- Транспортные средства могут базироваться более чем в одном гараже (депо).
- Могут существовать ограничения на допустимое время посещения конкретной делянки или потребителя (разгрузка только в рабочее время, развозимые по графику мосты и т. п.).
- В определенных случаях может потребоваться, чтобы транспортные средства в заданный момент посещали определенные точки для осуществления пересменки, заправки и т. п.

Еще одним существенным моментом является ситуация, когда при решении классических транспортных задач считается, что транспортное средство движется от точки погрузки к точке разгрузки грузом, а в обратном направлении - порожним. Это соответствует только 50 % эффективности. Эффективность может быть повышена, если весь обратный путь или хотя бы его часть транспортное средство проделает с грузом. Для этого необходимо найти новую точку погрузки вблизи предыдущей точки разгрузки и построить маршрут так, чтобы, последовательно посещая несколько точек погрузки и разгрузки, транспортное средство как можно меньше времени двигалось порожним.

Организовать такие маршруты в лесном транспорте вполне возможно, т. к., обыкновенно, разные потребители ориентированы на разные виды продукции. Например, на рис. 2 показан маршрут, когда сначала автомобиль загружается на одной из делянок пиловочником и отвозит его на лесозавод. Затем он движется порожняком к делянке, расположенной поблизости, где загружается уже балансом и отвозит его на ЦБП. После этого он находит делянку вблизи ЦБП, откуда доставляет пиловочник на лесозавод и т. д.

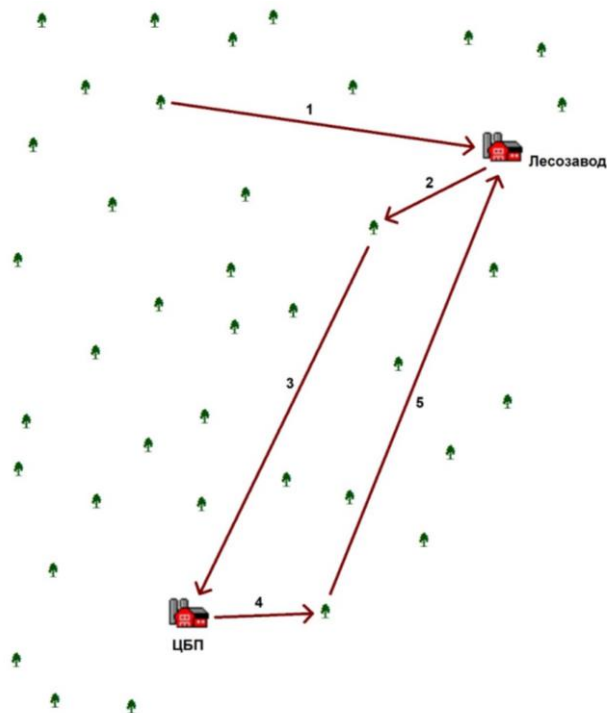


Рисунок 2. Маршрут с минимизацией порожнего пробега

Использование таких маршрутов может сократить транспортные издержки на 2-20 % [45].

Задача маршрутизации с учетом ограничений на допустимые периоды погрузки и разгрузки (VRP with Time Windows - VRPTW) рассмотрена в работах [36, 69]. Авторы работ [36, 66] предлагают использовать методы локального поиска для решения сборной задачи с учетом ограничений на допустимые периоды погрузки и разгрузки. В работе [34] используется метод поиска с запретами (tabu search) для варианта задачи маршрутизации транспортных средств, допускающего обслуживание одного и того же клиента более чем одним транспортным средством, путем включения этого клиента в маршруты нескольких транспортных средств (Split Delivery VRP - SDVRP). В работе [50] этот подход развивается в направлении учета временных ограничений (SPVRPTW). Подходы к решению задач VRP с учетом использования обратного холостого пробега предложены в работах [37, 65]. Решение этой проблемы методом поиска с запретами с учетом временных ограничений описывается в работе [44]. В работе [42] изучается подход с использованием нескольких гаражей, когда транспортным средствам разрешается делать остановки в промежуточных пунктах для заправки, пересменки и т. п. Автор работы [7] предлагает метод трехфазовой декомпозиции для учета мест размещения грузов. В работе [9] для решения задачи маршрутизации предлагается использовать алгоритм Брудно-Лурье, а в работах [14, 61] - метод генерации столбцов. Авторы работ [10, 35, 39, 45, 59] разрабатывают подходы к решению задачи организации транспортного процесса на стратегическом и тактическом уровне планирования с помощью методов линейного программирования. В работе [51] эта задача в стохастической постановке ставится как задача нелинейного программирования с квадратичной целевой

функцией. Оптимизационно-имитационные подходы к выбору транспортных схем описываются в работах [13, 54].

3. Результаты

Авторами настоящей статьи была разработана система поддержки принятия решений по организации транспортного процесса лесозаготовительного предприятия [3, 4, 21, 22, 25-28, 46, 47], которая осуществляет решение задачи синтеза транспортного плана перевозок древесины на оперативном уровне в следующей постановке. Пусть имеется A делянок, каждая из которых производит k_i видов продукции, $i = 1, 2 \dots n$. Ежедневный объем производства по каждому виду продукции на каждой делянке известен.

С другой стороны, имеется B потребителей продукции лесозаготовок, каждый из которых потребляет k_j видов продукции, $j = 1, 2 \dots m$. С каждым из потребителей подписан контракт, определяющий виды и объемы каждого вида поставляемой продукции по месяцам.

Вид продукции определяется породой, назначением, размерами (длиной и диаметром), качеством (сортом) лесоматериалов. Размеры для каждого вида продукции задаются предельными значениями (от l_{\min} до l_{\max} и от d_{\min} до d_{\max}), порода может указываться непосредственно (сосна, ель и т. д.), либо обобщенно (хвойные, лиственные, любые). Кроме того, предприятия могут принимать не сортированные по длинам и диаметрам лесоматериалы. Это обуславливает различия в составах и в общем количестве видов продукции на делянках и на предприятиях-потребителях. Два отличающихся друг от друга вида продукции на делянке могут считаться одним и тем же видом продукции на предприятии и наоборот.

Все делянки и потребители соединяются между собой сетью автомобильных и железных дорог, причем перевалка с автомобильного на железнодорожный транспорт может осуществляться в определенных точках (станциях, терминалах).

Перевозка лесоматериалов с делянок потребителям или к терминалам осуществляется заданным числом автомобилей различных марок, грузоподъемности и т. д. Каждый автомобиль привязывается к определенному пункту (к гаражу, базе и т. п.), имеющему выход в дорожную сеть. Число гаражей (баз) может быть различным.

Задача состоит в определении такого транспортного плана на заданный период времени, при котором суммарный объем вывозки был бы максимальным, а использование транспортных средств – рациональным. Здесь под транспортным планом подразумевается совокупность сменных заданий для каждого автомобиля с указанием мест погрузки, разгрузки, типа перевозимых лесоматериалов и прочей сопутствующей информации, составленных для заданного срока планирования.

Формально постановка задачи выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{d=1}^D \sum_{v=1}^V \sum_{a=1}^A \sum_{b=1}^B \sum_{c=1}^A \sum_{l=1}^L q_{vl} X_{dvabcl} \rightarrow \max \\ \sum_{c=0}^A X_{dvabcl} = \sum_{c=0}^A X_{dvcbal}, a = 1, \dots, A, b = 1, \dots, B, v = 1, \dots, V, l = 1, \dots, L \text{ и } d = 1, \dots, D \\ r_{lad} = \sum_{v=1}^V q_{vl} X_{dvabcl} \leq u_{lad}, a = 1, \dots, A, b = 1, \dots, B, c = 1, \dots, A, l = 1, \dots, L \text{ и } d = 1, \dots, D \\ r_{lbm} = \sum_{v=1}^V q_{vl} X_{mvabl} \leq u_{lbm}, a = 1, \dots, A, b = 1, \dots, B, l = 1, \dots, L \text{ и } m = 1, \dots, M \\ t_{vd} = \sum_{a=0}^A \sum_{b=0}^B \sum_{c=0}^A (t(a,b) + t(b,c)) \cdot X_{dvabcl} \leq u, l = 1, \dots, L, v = 1, \dots, V \text{ и } d = 1, \dots, D, \end{array} \right.$$

где $l = \{1, 2, \dots, L\}$ – множество видов продукции;

$v = \{1, 2, \dots, V\}$ – множество автомобилей;

$a = \{0, 1, 2, \dots, A\}$ – множество делянок (точек погрузки), 0 – соответствует гаражу;

$b = \{0, 1, 2, \dots, B\}$ – множество потребителей (точек разгрузки), 0 – соответствует гаражу;

q_{vl} – объем продукции вида l , перевозимый автомобилем v за один раз (в множество v могут входить автомобили различной грузоподъемности);

$t(a,b)$ – среднее время движения автомобиля от точки погрузки a до точки разгрузки b , час;

$t(b,c)$ – среднее время движения автомобиля от точки разгрузки b до точки погрузки c , час;

u_{lad} – максимальный объем продукции вида l , доступный в течение дня d на делянке a ;

u_{lbm} – максимальный объем продукции вида l , который может быть поставлен потребителю b в течение месяца m ;

u – продолжительность смены, час;

r_{lad} – объем продукции вида l , вывозимый в течение дня d с делянки a ;

r_{lbm} – объем продукции вида l , поставляемый потребителю b в течение месяца m ;

t_{vd} – общее время работы автомобиля v в течение дня d ;

X_{dvabcl} – число рейсов автомобиля v , на перевозке продукции вида l , с делянки a потребителю b с порожним движением на делянку c в течение дня d ;

X_{mvabl} – число рейсов автомобиля v , на перевозке продукции вида l , с делянки a потребителю b в течение месяца m .

Система поддержки принятия решения использует динамическое программирование для решения этой задачи [25]. В числе ее основных особенностей следует назвать большую размерность и дискретную постановку. Динамическое программирование является одним из

мощнейших методов построения оптимизационных алгоритмов. Существует опыт использования динамического программирования компаниями с большой лесосырьевой базой для решения задач планирования и управления [60], однако, вследствие своей сложности этот метод пока еще мало распространен. Вообще существует множество методов решения задач дискретного программирования, каждый из которых обладает своими собственными преимуществами и недостатками [56, 68]. Здесь наиболее известным альтернативным методом можно считать линейное программирование. Линейное программирование с его вариантами и расширениями широко используется для решения многих оптимизационных задач в различных областях. Это отчасти определяется доступностью программного обеспечения, применяемого для решения таких задач и обычно использующего симплекс-метод. С другой стороны, существует очень мало универсальных приложений, позволяющих использовать метод динамического программирования [56]. В данном случае размерность задачи слишком велика для использования линейного программирования, поэтому важной задачей при разработке системы поддержки принятия решений стало сделать применение метода динамического программирования одновременно универсальным и простым в использовании.

4. Обсуждение и заключение

Современные технологии лесозаготовок требуют более полного учета требований потребителей лесоматериалов уже на самых ранних этапах технологической цепи при срезании и первичной обработке дерева. В свою очередь это оказывает влияние и на процессы планирования, учета и контроля поставок продукции лесозаготовок. Поскольку при использовании сортиментной технологии практически сразу происходит разделение потоков различных видов сортиментов, это предъявляет особые требования к управлению процессами заготовки и транспортировки древесины, требуются интегрированные инструменты для поддержки принятия решений.

В России пока нет эффективных решений в этой области, а программное обеспечение, разработанное в других странах, не учитывает большого числа специфических условий. Выполненная авторами работа может рассматриваться как одна из первых попыток разработки систем поддержки принятия решений в отношении организации процессов лесозаготовительного производства для российских условий.

Система учитывает объемы заготовки и потребления древесины. Интегрированное планирование процессов заготовки и транспортировки древесины потребовало использовать различные методы оптимизации, а также имитационное моделирование. Поддержка решения задач на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях, позволяет лесозаготовительной компании получать исчерпывающую информацию о преимуществах и недостатках тех или иных технологических и технических решений. Повышение экономической эффективности производственных процессов имеет большое значение для дальнейшего развития лесной отрасли. Разработанный подход и модели должны позволить

более надежно обосновывать принимаемые решения и обеспечить наискорейшее достижение поставленных целей.

Работа выполнена в соответствии с Программой стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012-2016 г.

Литература

1. Васильев В. Н., Марков О. Б., Щеголева Л. В., Воронов Р. В., Тесля И. В. Мониторинг и прогнозирование состояния леса при помощи цепи Маркова // Resources and Technology. - 2015. - № 12. - С. 10-25.
2. Воронин А. В., Кузнецов В. А., Щеголева Л. В., Щукин П. О. Многоэтапная транспортно-производственная задача с учетом перевалки продукции ЛПК // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. - 2009. - № 4. - С. 116-118.
3. Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П. Методика принятия решений по оптимизации лесозаготовительных планов // Научный журнал КубГАУ. - 2011. - №5 (69). - С. 320-334.
4. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С., Соколов А. П. Алгоритмы определения оптимальных маршрутов на графах для решения задач управления системами транспортировки древесины для лесопромышленного комплекса и биоэнергетики // Труды лесинженерного факультета ПетрГУ. - 2010. - Вып. 8. - С. 30-33.
5. Герасимов, Ю. Ю. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия / Ю. Ю. Герасимов, В. С. Сюнёв, А. П. Соколов и др. - Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии, 2008. - 126 с.
6. Герц Э. Ф., Азаренок В. А., Силуков Ю. Д. Алгоритм выбора технологии и системы машин для выполнения рубок // Аграрный вестник Урала. - 2012. - № 1. - С. 35-36.
7. Гильманова Н. А. Метод трехфазовой декомпозиции для решения задачи построения маршрутов следования транспортных средств с учетом размещения грузов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2011. - № 133. - С. 35-42.
8. Доспехова Н. А., Васильев С. Б., Колесников Г. Н. Численное моделирование взаимодействия еловых балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане // Resources and Technology. - 2013. - №10 (1). - С. 24-33.
9. Дунаев А. А., Лихачев В. Е. Оптимизация маршрутов обслуживания заявок на базе алгоритма Брудно - Лурье // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. - 2010. - № 34. - С. 79-82.
10. Еремеева Л. Э. Некоторые проблемы автотранспортной логистики в деятельности схем лесопромышленных предприятий // Леса России и хозяйство в них. - 2012. - Т. 1-2. - № 42-43. - С. 36-37.
11. Кривов С. Транспортные перспективы лесных грузов // Целлюлоза. Бумага. Картон. - 2007. - № 8. - С. 84-87.
12. Крупко А. М., Кузнецов В. А. Задача оптимизации транспортно-производственных планов лесопромышленного предприятия // Наука и бизнес: пути развития. - 2011. - № 5. - С. 48-51.
13. Крылова О. В., Степин Ю. П. Оптимизационно-имитационный подход к выбору транспортных схем доставки грузов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. - 2011. - Т. 3. - С. 23-26.
14. Кузнецов В. А., Крупко А. М. Задача генерации столбцов наиболее эффективных замкнутых маршрутов // Глобальный научный потенциал. - 2012. - № 10. - С. 70-72.

15. Логистика автомобильного транспорта: концепция, методы, модели / В. С. Лукинский [и др.]. - Москва : Финансы и статистика, 2002. - 278 с.
16. Математическая модель задачи планирования многопередельного производства в лесопромышленном комплексе / Р. В. Воронов, Д. П. Косицын, А. И. Шабает, А. М. Воронова, Л. В. Щеголева // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. - 2013. - № 4 (133). - С. 101-104.
17. Морозов Е. В., Шегельман И. Р., Будник П. В. Вероятностно-статистический анализ процесса заготовки сортиментов // Перспективы науки. - 2011. - № 22. - С. 183-185.
18. Нахаев З. Н. К вопросу совершенствования методов управления грузовыми процессами на лесных предприятиях // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. - 2007. - № 6. - С. 91-91.
19. Нахаев З. Н., Сушков А. С. Совершенствование грузопотоков лесопродукции при рубках промежуточного пользования // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. - 2007. - № 4. - С. 94-95.
20. Нахаев З. Н., Сушков А. С. Выбор кратчайших сетевых расстояний перевозок лесоматериалов по лесовозным автодорогам // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. - 2008. - № 4. - С. 69-70.
21. Оптимизация логистики лесозаготовок / А. П. Соколов, Ю. Ю. Герасимов, В. С. Сүнөв, Т. Карьялайнен // Resources and Technology. - 2012. - №9 (2). - С. 117-128.
22. Особенности функциональной логистики лесозаготовок / А. П. Соколов, В. С. Сүнөв, А. А. Селиверстов, Ю. В. Суханов // Resources and Technology. - 2014. - Т.11, №.1. - С. 50 - 65.
23. Петровский В. С. Техническое и математическое обеспечение проектирования систем управления транспортом для лесного комплекса // Моделирование систем и процессов. - 2011. - № 3. - С. 54-60.
24. Салминен Э. О. Проблемы лесотранспорта в современных условиях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - 2003. - № 169. - С. 140-148.
25. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю. Алгоритм синтеза оптимального транспортного плана в системе поддержки принятия решений для лесопромышленного комплекса и биоэнергетики // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. - 2010. - Вып. 8. - С. 144-148.
26. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю. Геоинформационная система для решения оптимизационной задачи транспортной логистики круглых лесоматериалов // Известия высших учебных заведений «Лесной журнал». - 2009. - № 3. - С. 78-85.
27. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А. Методика оптимизации парка автомобилей на вывозке сортиментов на основе имитационного моделирования в среде ГИС // Ученые записки ПетрГУ. - 2009. - №11(105). - С. 72-77.
28. Соколов А. П., Катаров В. К., Сүнөв В. С. Логистическая поддержка лесозаготовок. - Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2015. - 160 с.
29. Шабает А. И., Кузнецов В. А., Спиричев М. В., Косицын Д. П. Подходы к разработке комплекса алгоритмов и программ оптимального планирования и управления сквозными процессами использования древесины // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. - 2012. - Т. 2. № 8. - С. 52-56.
30. 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.

31. Шегельман И. Р., Щеголева Л. В., Пономарев А. Ю. Математическая модель выбора сквозных потоков заготовки, транспортировки и переработки древесного сырья // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - 2005. - № 172. - С. 32-37.
32. Ширнин Ю. А. Комплексное освоение участков лесного фонда // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 2002. - № 4. - С. 89-96.
33. Andersson G, Flisberg P, Liden B, Rönnqvist M (2008) RuttOpt – a decision support system for routing of logging trucks // Canadian Journal of Forest Resjures. – 2008. - №38. – P. 1784-1796.
34. Archetti C, Speranza M, Hertz A. A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem // Transportation Science. - 2006. - № 40(1). - P. 64-73.
35. Beaudoin, D., LeBel, L., and Frayret, J.-M. Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis // Canadian Journal of Forest Research. - 2007. - № 37(1). - P. 128–140.
36. Bräysy O, Gendreau M. Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms // Transportation Science. - 2005. - № 39(1) . - P. 104-118.
37. Carlsson, D. and Rönnqvist, M. Backhauling in forest transportation – models, methods and practical usage // Canadian Journal of Forest Research. - 2007. - № 37. - P. 2612–2623.
38. Carlsson, D. and Rönnqvist, M. Supply chain management in forestry – case studies at Södra Cell AB // European Journal of Operational Research. - 2005. - № 163. - P. 589–616.
39. Carlsson, D., D'Amours, S., Martel, A., and Rönnqvist, M. Decisions and methodology for planning the wood fiber flow in the forest supply chain, in Koster, R. and Delfmann, W. (Eds): Recent developments in supply chain management. - Helsinki: University Press, 2008. - P. 11–39.
40. Cordeau J-F, Gendreau M, Laporte G, Potvin J-Y, Semet F. A guide to vehicle routing heuristics // Journal of the Operational Research Society. - 2002. - № 53. - P. 512-522.
41. 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.
42. Crevier B, Cordeau J-F, Laporte G. The multi-depot vehicle routing problem with interdepot routes // European Journal of Operational Research. - 2007. - № 176. - P. 756-773.
43. D'Amours S., Rönnqvist, M., Weintraub A. Supply Chain Planning of the forest product industry using operations research// CIRRELT. 2007. - Report 52.
44. Duhamel C., Potvin J-Y., Rousseau J-M. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows // Transportation Science. - 1997. - Vol. 31. No. 1. - P. 49-59
45. Forsberg, M., Frisk, M., and Rönnqvist, M. FlowOpt – a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry // International Journal of Forest Engineering. - 2005. - № 16(2). - P. 101–114.
46. Gerasimov Yu. Yu., Sokolov A. P., Fjeld D. Improving Cut-to-length Operations Management in Russian Logging Companies Using a New Decision Support System // Baltic Forestry. - 2013. - Vol. 19, №.1 (36). - P.89-105.
47. Gerasimov Y. Y., Sokolov A. P., Karjalainen T. GIS-based Decision-Support Program for Planning and Analyzing Short-Wood Transport in Russia // Croatian Journal of Forest Engineering. – 2008. – Vol. 29, Issue 2. – P. 163-175.
48. Gerasimov, Y., Sokolov, A. & Siounev, V. Optimization of industrial and fuel wood supply chain associated with cut-to-length harvesting. // Systems. Methods. Technologies – №3 (11) – 2011. – P. 118-124.
49. Gunnarsson H. Supply chain optimization in the forest industry // Linköping Studies in Science and Technology. – 2007. - No. 1105. - 25 p.

50. Ho SC, Haugland D. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries // *Computers & Operations Research*. - 2004. - № 31. - P. 1947-1964.
51. 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.
52. Karanta I., Jokinen O., Mikkola T., Savola J., Bounsaythip C. Requirements for a vehicle routing and scheduling system in timber transport // *Proceedings from 1st world symposium on logistics in the forest sector*. – 2000. – P. 235-250.
53. Karvinen S., Väliky E., Gerasimov Y., Dobrovolsky A. Northwest Russian Forest Sector in a Nutshell. - Joensuu: Finnish Forest Research Institute, 2011. - 120 p
54. 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.
55. Kok F. L., Meyer C. M., Kopfer H., Shatten J. M. J. A Dynamic Programming Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and European Community Social Legislation. // *Transportation Science*. – 2010. - №44. – P. 442-454.
56. Lew A., Mauch H. Introduction to Dynamic Programming. // *Studies in Computational Intelligence*. – 2001. - №38. – P. 3-43.
57. Linainmaa S., Savola J., Jokinen O. A knowledge base system for wood procurement management. // *Proceedings of the 7th Annual Conference on Artificial Intelligence, Montreal*. – 1994.
58. Lukka A. Materials acquisition planning models. // *Lappeenranta University of Technology Research*. – 1994. - report 72
59. Murphy G. Reducing trucks on the road through optimal route scheduling and shared log transport service // *Southern Journal of Applied Forestry*. - 2003. - № 27(3) . - P. 198-205.
60. Novoa C., Stotter R. An approximate dynamic programming approach for the vehicle routing problem with stochastic demands. // *European Journal of Operational Research*. – 2009. - №196(2). – P. 509-515.
61. Palmgren M., Rönnqvist M., Värbrand P. A near-exact method for solving the log-truck scheduling problem // *International Transactions of Operations Research*. - 2004. - № 11(4) . - P. 447-464.
62. Palmgren M., Rönnqvist M., Värbrand P. (2003) A solution approach for log truck scheduling based on composite pricing and branch and bound. // *International Transactions in Operational Research*. – 2003. - №10. – P. 433–447.
63. Rönnqvist M. Optimization in forestry. // *Mathematical Programming, Series B*. – 2003. - №97(1-2). – P. 267-284.
64. Rönnqvist M., Ryan D. Solving truck despatch problems in real time. // *Proceedings of the 31th Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand, Wellington*. – 1995. – P. 165-172.
65. Ropke S, Pisinger D. A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhaul // *European Journal of Operational Research*. - 2006. - № 171. - P. 750-775.
66. Ropke S, Pisinger D. An adaptive large neighborhood search heuristics for the pickup and delivery problem with time windows // *Transportation Science*. - 2006. - № 40(4). - P. 455-472.
67. Savola J., Rummukainen H., Jokinen O. KUORMA: A Collection of APS-algorithms for forest industry wood transport. // *ERCIM News*. – 2004. - №56. – P. 29-31.
68. Taha H. A. *Operations Research: An Introduction*. 9th edition – Prentice Hall, 2011. – 832 p.

69. Taillard E., Dadeau Ph., Gendreau M., Guertin F., Potvin J-Y. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows // *Transportation Science*. - 1997. - Vol. 31, № 2. - P. 170-186.
70. Weintraub A., Epstein R., Morales R., Serón J., Traverso P. A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries. // *Interfaces*. – 1996. - #26(4). – P. 1–12.
71. Weintraub A., Romero C. Operations research models and the management of agricultural and forestry resources: A review and comparison // *Interfaces*. – 2006. - №36(5). – P. 446-457.

References

1. Vasil`ev V. N., Markov O. B., Schegoleva L. V., Voronov R. V., Teslya I. V. Monitoring and forecasting of forest with the use of remote sensing areas // *Resources and Technology*. - 2015. - № 12. - P. 10–25.
2. Voronin A. V., Kuznetsov V. A., Schegoleva L. V., Schukin P. O. The multistage problem of process of production and transport with consideration of timber industry production reloading // *Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik*. - 2009. - № 4. - P. 116-118.
3. Gerasimov Yu. Yu., Sokolov A. P. Methodology of decision-making for wood harvesting optimization // *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. – 2011. – №5 (69). – P. 320-334.
4. Gerasimov Yu. Yu., Syunev V. S. Sokolov A. P. Optimal path finding algorithms on the graphs for the problems of wood supply management an bioenergy // *Works of forest engineering fakulty of PetrSU*. – 2010. – Vol. 8. – P. 30-33.
5. Gerasimov Yu. Yu. Comparison of wood harvesting technologies in forest companies of Karelia / Yu. Yu. Gerasimov, V. S. Syunev, A. P. Sokolov et al. - Joensuu: Finnish forest research institute, 2008. - 126 p.
6. Herz E. F., Azarenok V. A., Silukov Yu. D. A wood harvesting technology and machinery selection algorithm // *Agrarian bulletin of Ural*. - 2012. - № 1. - P. 35-36.
7. Gilmanova N. A. A three-phase decomposition method for vehicle routing problem considering product placement // *St. Petersburg State polytechnic university journal*. - 2011. - № 133. - P. 35-42.
8. Dosphehova N. A., Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N. Simulation of Unequal Diameter Spruce Pulpwood Interaction in Debarking Drum // *Resources and Technology*. – 2013. - №10 (1). – P. 24-33.
9. Dunaev A. A., Likhacev V. E. Optimizing of requests routing based on the Brudno - Lurie algorithm // *Bulletin of Razan State radiotechnic university*. - 2010. - № 34. - P. 79-82.
10. Eremeeva L. E. Some problems of transport logistics in the forest industry enterprises activity schemes // *Forests of Russia and Russian forestry*. - 2012. - V. 1-2. - № 42-43. - P. 36-37.
11. Krivov S. Prospects of timber transport // *Pulp. Paper. Cardboard*. - 2007. - № 8. - P. 84-87.
12. Krupko A. M., Kuznetsov V. A. Wood supply plans optimization at the wood harvesting companies // *Science and business: ways of development*. - 2011. - № 5. - P. 48-51.
13. Krylova O. V., Stepin Yu. P. Optimization-simulation approach to the choice of transport schemes // *Quality management in the oil and gas industry*. - 2011. - T. 3. - P. 23-26.
14. Kuznetsov V. A., Krupko A. M. Generating columns to find the most efficient closed routes // *Global scientific potential*. - 2012. - № 10. - P. 70-72.
15. Logistics of truck transport: concepts, methods, models / V. S. Lukinsky et al. - Moscow: Finance and Statistics, 2002. - 278 p.

16. Mathematical model for multistage production planning in forest industry complex / R. V. Voronov, D. P. Kositsyn, A. I. Shabaev, A. M. Voronova, L. V. Schegoleva // Proceedings of Petrozavodsk State university. - 2013. - № 4 (133). - P. 101-104.
17. Morozov E. V., Shegelman I. R., Budnik P. V. Probabilistic and statistical analysis of the CTL wood harvesting // Science perspectives. - 2011. - № 22. - P. 183-185.
18. Nakhaev Z. N. On the issue of improving transport process management on forest enterprises // Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik. - 2007. - № 6. - P. 91-91.
19. Nakhaev Z. N., Sushkov A. S. Improving of timber flow using intermediate cutting // Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik. - 2007. - № 4. - P. 94-95.
20. Nakhaev Z. N., Sushkov A. S. Choosing shortest forest road network distances of timber transportation // Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik. - 2008. - № 4. - P. 69-70.
21. Optimisation of wood logistics / A. P. Sokolov, V. S. Syuney, Y. Y. Gerasimov, T. Karjalainen // Resources and Technology. - 2012. - №9 (2). - P. 117-128.
22. Features of functional logistics for wood harvesting / A. P. Sokolov, V. S. Syuney, A. A. Seliverstov, Yu. V. Sukhanov // Resources and Technology. - 2014. - №11 (1). - P. 50-65.
23. Petrovsky V. S. Technical and mathematical support of transport management systems for forest complex // Modeling of systems and processes. - 2011. - № 3. - P. 54-60.
24. Salminen E. O. Problems of forest transport in modern conditions // Bulletin of Saint Petersburg State Forest Technical Akademy. - 2003. - № 169. - P. 140-148.
25. Sokolov A. P., Gerasimov Yu. Yu. an algorithm for finding the optimal transport plan for the delivery of round timber and energy wood // Works of forest engineering fakulty of PetrSU. – 2010. – Вып. 8. – P. 144-148.
26. Sokolov A. P., Gerasimov Yu. Yu. Geoinformation System for Solving Optimization Problem of Transport Logistics for Round Timber // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal. – 2009. – № 3. – P. 78-85.
27. Sokolov A. P., Gerasimov Yu. Yu., Seliverstov A. A. A method of short wood trucks fleet optimization based on simulation in environment of geographic information system // Proceedings of Petrozavodsk State university. – 2009. – №11(105). – P. 72-77.
28. Sokolov A. P., Katarov V. K., Syuney V. S. Logistical support of the wood harvesting. - Petrozavodsk: PetrSU, 2015. - 160 p.
29. Shabaev A. I., Kuznetsov V. A., Spirichev M. V., Kositsin D. P. Approaches to algorithm and software complex development aimed at optimal planning of end-to-end wood utilization process // Proceedings of Petrozavodsk State university. - 2012. - № 8 (1). - P. 52-56.
30. Shegelman I. R., Kuznecov A. V., Skrypnik V. I., Baklagin V. N.. The method of optimization of development transport and technological of forest resources // Engineering Journal of Don. - 2012. - T. 23., № 4-2. - P. 35.
31. Shegelman I. R., Schegoleva L. V., Ponomarev A. Yu. Mathematical model for optimal end-to-end wood utilization process selection // Bulletin of Saint Petersburg State Forest Technical Akademy. - 2005. - № 172. - P. 32-37.
32. Shirnin Yu. A. Complex Development of Forest Stock Sites // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal. - 2002. - № 4. - P. 89-96.
33. Andersson G, Flisberg P, Liden B, Rönnqvist M (2008) RuttOpt – a decision support system for routing of logging trucks // Canadian Journal of Forest Resjures. – 2008. - №38. – P. 1784-1796.
34. Archetti C, Speranza M, Hertz A. A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem // Transportation Science. - 2006. - № 40(1). - P. 64-73.

35. Beaudoin, D., LeBel, L., and Frayret, J.-M. Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis // *Canadian Journal of Forest Research*. - 2007. - № 37(1). - P. 128–140.
36. Bräysy O, Gendreau M. Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms // *Transportation Science*. - 2005. - № 39(1) . - P. 104-118.
37. Carlsson, D. and Rönnqvist, M. Backhauling in forest transportation – models, methods and practical usage // *Canadian Journal of Forest Research*. - 2007. - № 37. - P. 2612–2623.
38. Carlsson, D. and Rönnqvist, M. Supply chain management in forestry – case studies at Södra Cell AB // *European Journal of Operational Research*. - 2005. - № 163. - P. 589–616.
39. Carlsson, D., D'Amours, S., Martel, A., and Rönnqvist, M. Decisions and methodology for planning the wood fiber flow in the forest supply chain, in Koster, R. and Delfmann, W. (Eds): *Recent developments in supply chain management*. - Helsinki: University Press, 2008. - P. 11–39.
40. Cordeau J-F, Gendreau M, Laporte G, Potvin J-Y, Semet F. A guide to vehicle routing heuristics // *Journal of the Operational Research Society*. - 2002. - № 53. - P. 512-522.
41. 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.
42. Crevier B, Cordeau J-F, Laporte G. The multi-depot vehicle routing problem with interdepot routes // *European Journal of Operational Research*. - 2007. - № 176. - P. 756-773.
43. D'Amours S., Rönnqvist, M., Weintraub A. Supply Chain Planning of the forest product industry using operations research// CIRRELT. 2007. - Report 52.
44. Duhamel C., Potvin J-Y., Rousseau J-M. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows // *Transportation Science*. - 1997. - Vol. 31. No. 1. - P. 49-59
45. Forsberg, M., Frisk, M., and Rönnqvist, M. FlowOpt – a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry // *International Journal of Forest Engineering*. - 2005. - № 16(2). - P. 101–114.
46. Gerasimov Yu. Yu., Sokolov A. P., Fjeld D. Improving Cut-to-length Operations Management in Russian Logging Companies Using a New Decision Support System // *Baltic Forestry*. - 2013. - Vol. 19, №.1 (36). - P.89-105.
47. Gerasimov Y. Y., Sokolov A. P., Karjalainen T. GIS-based Decision-Support Program for Planning and Analyzing Short-Wood Transport in Russia // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2008. – Vol. 29, Issue 2. – P. 163-175.
48. Gerasimov, Y., Sokolov, A. & Siounev, V. Optimization of industrial and fuel wood supply chain associated with cut-to-length harvesting. // *Systems. Methods. Technologies* – №3 (11) – 2011. – P. 118-124.
49. Gunnarsson H. Supply chain optimization in the forest industry // *Linköping Studies in Science and Technology*. – 2007. - No. 1105. - 25 p.
50. Ho SC, Haugland D. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries // *Computers & Operations Research*. - 2004. - № 31. - P. 1947-1964.
51. 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.
52. Karanta I., Jokinen O., Mikkola T., Savola J., Bounsaythip C. Requirements for a vehicle routing and scheduling system in timber transport // *Proceedings from 1st world symposium on logistics in the forest sector*. – 2000. – P. 235-250.
53. Karvinen S., Väliky E., Gerasimov Y., Dobrovolsky A. Northwest Russian Forest Sector in a Nutshell. - Joensuu: Finnish Forest Research Institute, 2011. - 120 p

54. 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.
55. Kok F. L., Meyer C. M., Kopfer H., Shutten J. M. J. A Dynamic Programming Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and European Community Social Legislation. // *Transportation Science*. – 2010. - №44. – P. 442-454.
56. Lew A., Mauch H. Introduction to Dynamic Programming. // *Studies in Computational Intelligence*. – 2001. - №38. – P. 3-43.
57. Linainmaa S., Savola J., Jokinen O. A knowledge base system for wood procurement management. // *Proceedings of the 7th Annual Conference on Artificial Intelligence, Montreal*. – 1994.
58. Lukka A. Materials acquisition planning models. // *Lappeenranta University of Technology Research*. – 1994. - report 72
59. Murphy G. Reducing trucks on the road through optimal route scheduling and shared log transport service // *Southern Journal of Applied Forestry*. - 2003. - № 27(3) . - P. 198-205.
60. Novoa C., Stotter R. An approximate dynamic programming approach for the vehicle routing problem with stochastic demands. // *European Journal of Operational Research*. – 2009. - №196(2). – P. 509-515.
61. Palmgren M., Rönnqvist M., Värbrand P. A near-exact method for solving the log-truck scheduling problem // *International Transactions of Operations Research*. - 2004. - № 11(4) . - P. 447-464.
62. Palmgren M., Rönnqvist M., Värbrand P. (2003) A solution approach for log truck scheduling based on composite pricing and branch and bound. // *International Transactions in Operational Research*. – 2003. - №10. – P. 433–447.
63. Rönnqvist M. Optimization in forestry. // *Mathematical Programming, Series B*. – 2003. - №97(1-2). – P. 267-284.
64. Rönnqvist M., Ryan D. Solving truck despatch problems in real time. // *Proceedings of the 31th Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand, Wellington*. – 1995. – P. 165-172.
65. Ropke S, Pisinger D. A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhaul // *European Journal of Operational Research*. - 2006. - № 171. - P. 750-775.
66. Ropke S, Pisinger D. An adaptive large neighborhood search heuristics for the pickup and delivery problem with time windows // *Transportation Science*. - 2006. - № 40(4). - P. 455-472.
67. Savola J., Rummukainen H., Jokinen O. KUORMA: A Collection of APS-algorithms for forest industry wood transport. // *ERCIM News*. – 2004. - №56. – P. 29-31.
68. Taha H. A. *Operations Research: An Introduction*. 9th edition – Prentice Hall, 2011. – 832 p.
69. Taillard E., Dadeau Ph., Gendreau M., Guertin F., Potvin J-Y. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows // *Transportation Science*. - 1997. - Vol. 31, № 2. - P. 170-186.
70. Weintraub A., Epstein R., Morales R., Ser'on J., Traverso P. A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries. // *Interfaces*. – 1996. - #26(4). – P. 1–12.
71. Weintraub A., Romero C. Operations research models and the management of agricultural and forestry resources: A review and comparison // *Interfaces*. – 2006. - №36(5). – P. 446-457.