

УДК 519.873

DOI: 10.15393/j2.art.2016.3381

Статья

Оптимизация ежемесячного планирования лесных грузопотоков

Мстислав В. Симоненков *, Эро О. Салминен и Иван В. Бачериков

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия; E-Mails: zumanew@yandex.ru (М. В. С.); salminen.lta@mail.ru (Э. О. С.); ivashka512@gmail.com (И. В. Б.)

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: zumanew@yandex.ru (М. В. С.); Tel.: +79522127563.

Получена: 04 Июля 2016 / Принята: 05 Августа 2016 / Опубликовано: 30 Августа 2016

Аннотация: в данной статье рассматривается проблема ежемесячного планирования лесных грузопотоков применительно к предприятиям лесной промышленности Российской Федерации. Основной задачей ежемесячного планирования лесных грузопотоков является распределение делянок, запланированных в рубку в рассматриваемом году, по месяцам, таким образом, чтобы потребители получили необходимый, объем круглых лесоматериалов. Делянки имеют различные таксационные характеристики, а значит их распределение по месяцам напрямую влияет на выход сортиментов. В процессе планирования необходимо решить, как распределить делянки между имеющимися лесозаготовительными комплексами с указанием оптимального порядка их освоения, учитывая характеристики лесозаготовительных машин. Минимизировать объемы хранения лесоматериалов, решить задачу распределения - с каких делянок везти какие сортименты каким потребителям, учитывая ограничения, накладываемые существующим лесовозным флотом, сезонностью работ, проходимостью и максимальным грузооборотом элементов дорожной сети. В статье представлена математическая модель обозначенной проблемы в формулировке смешанного целочисленного линейного программирования. Модель предназначена для обоснования решений, связанных с логистическими процессами заготовки, хранения и транспортировки круглых лесоматериалов. Модель реализована в системе математического моделирования AIMMS, решения находились напрямую с помощью коммерческого решателя CPLEX v12.6.3. Представлены результаты вычислительного эксперимента по данным, предоставленным ООО "Мется Форест Подпорожье".

Ключевые слова: исследования операций; оперативное планирование; смешанное целочисленное линейное программирование

Article

DOI: 10.15393/j2.art.2016.3381

An optimization model for monthly timber flow planning

Mstislav Simonenkov *, Ero Salminen and Ivan Bacherikov

Saint-Petersburg State Forest Technical University, 194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia; E-Mails: zumanew@yandex.ru (M. S.); salminen.lta@mail.ru (E. S.); ivashka512@gmail.com (I. B.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: zumanew@yandex.ru (M. S.); Tel.: +79522127563.

Received: 04 July 2016 / Accepted: 05 August 2016 / Published: 30 August 2016

Abstract: the problem we consider is monthly timber flow planning from the perspective of Russian forest companies. The main decisions deal with which areas to harvest during an annual period so that the wood-processing facilities receive the required amount of assortments. Each area has a different size and composition of assortments, and the choice of harvesting areas affects the production level of different assortments. We need to decide how to allocate sites among existing logging crews, while taking into account that each crew has different characteristics. We need create optimal schedule for each crew. Also storage volumes should be minimized. In addition, we need to solve timber flow problem, considering transportation restrictions, weather conditions, accessibility and maximum turnover of elements of road network. In this paper, we develop a mixed integer programming model for the problem. Model created in modeling system AIMMS and solved directly by using commercial solver CPLEX v12.6.3. Computational results from a major Leningrad Region logging company are presented.

Keywords: operations research; operational planning; mixed integer linear programming; wood procurement problem

1. Введение

Российская Федерация является мировым лидером по площади лесов – 809 090 тыс. га, или 20,1% общей площади лесов мира. По данным ежегодника лесной продукции ФАО объем заготовки древесины предприятиями лесной промышленности по итогам 2014 г. составил 203 млн м³. При таком объеме лесосечных работ логистические издержки исчисляются в миллиардах рублей. Следовательно, сокращение издержек, связанных с хранением и транспортировкой лесоматериалов на несколько процентов приведет к многомиллионной экономии. Таким образом, большое значение имеет разработка оптимизационных моделей и систем поддержки принятия решений (далее СППР) по обоснованию параметров лесных грузопотоков.

В статье рассматривается проблема оперативного планирования грузопотоков актуальная для предприятий лесной промышленности РФ, осуществляющих заготовку круглых лесоматериалов своими силами либо с привлечением подрядных организаций. В контексте данной проблемы под термином оперативное планирование понимается ежемесячное планирование на срок до одного года. На таком уровне планирования лесных грузопотоков обычно принимаются следующие решения: распределение делянок, запланированных в рубку в рассматриваемом году, по месяцам; графики работы многооперационных лесных машин; объемы хранения сортиментов на верхних, промежуточных, сезонных, зимних, нижних складах, терминалах и в портах; распределение и количественные характеристики потоков лесоматериалов. В процессе планирования необходимо учитывать ряд технологических и экологических ограничений: почвогрунтовые условия лесосек, позволяющие проводить лесосечные работы в определенные периоды; производительность лесозаготовительной техники; максимальный объем хранения лесоматериалов на складах; и др. Задачей планирования является обеспечение заданного уровня потребления при минимальных затратах.

Данная проблема рассмотрена в ряде научно исследовательских работ, к тому же для ее решения на рынке предложен ряд СППР. Однако на данный момент не предложено моделей, одновременно дополняющих обозначенную проблему ограничениями накладываемыми дорожной сетью и предлагающую решения по использованию лесовозного флота. Эти дополнения необходимы для обеспечения реалистичности получаемых планов. Лесная промышленность РФ характеризуется ярко выраженной сезонностью работ вызванной отсутствием необходимой густоты лесных дорог круглогодичного действия и климатическими условиями. Отсутствие ограничений по проходимости элементов дорожной сети и их максимального грузооборота могут привести к нереалистичным решениям, например, когда лесоматериалы с зимних делянок запланированы к вывозке в период распутицы. Обычно решения по использованию лесовозного флота принимаются на недельном уровне, однако отсутствие обобщенных решений при ежемесячном планировании может привести, например, к завышенным объемам перевозки в месяц, что приведет к необходимости привлечения дополнительных лесовозных автопоездов, а как следствие к увеличению издержек.

Несмотря на значительные трудозатраты планирование на отечественных предприятиях лесной промышленности в большинстве случаев выполняется вручную квалифицированными специалистами. Более того, неожиданные события могут потребовать пересмотра планов. Следовательно, нашей целью было создание СППР по обоснованию параметров реалистичных ежемесячных планов лесных грузопотоков, выполняющую расчет за адекватный промежуток времени, допускающую простое изменение входных данных, сравнение различных сценариев. Выходные данные системы должны быть представлены в виде детализированных отчетов в

формате электронных таблиц, включая графики работы лесозаготовительных комплексов; объемы: хранения на складах и транспортировки лесоматериалов по элементам дорожной сети; маршруты и необходимое время работы для осуществления транспортировки сортиментов с помощью доступного флота по периодам.

Основной вклад данной статьи заключается в оптимизационной математической модели ежемесячного планирования лесных грузопотоков отличающейся тем, что она включает: проблему распределения делянок, запланированных в рубку, между имеющимися лесозаготовительными комплексами с указанием оптимального порядка их освоения; учитывает: как лесохозяйственные мероприятия, требующее более одного месяца на выполнение, так и те, которые требуют не более месяца на выполнение; равномерность распределения объемов заготовки различных групп сортиментов между комплексами по их типам; пропускную способность и максимальный грузооборот всех элементов лесной дорожной сети; транспортные ограничения, накладываемые существующим лесовозным флотом; различные типы складов; вывозку железнодорожным и водным транспортом; выходными данными являются не только решения по использованию лесозаготовительных комплексов, но и лесовозных автопоездов.

Модель представлена в формулировке смешанного целочисленного линейного программирования (далее СЦП) и реализована в системе математического моделирования Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software (AIMMS) производства Aimms B.V, решения находились напрямую с помощью коммерческого решателя CPLEX v12.6.3. Вычислительный результат проводился по данным, предоставленным ООО “Метса Форест Подпорожье”. Для участка арендной базы с 59 лесосеками и общим объемом заготовки в 192000 м³ время расчета с заданным расхождением от оптимальности в 6% составило 10-60 минут в зависимости от рассматриваемых ограничений.

Остальная часть этой статьи организована следующим образом. Раздел 2 представляет обзор литературы, а в разделе 3 представлено описание рассматриваемой проблемы. В разделе 4 представлена математическая формулировка. Исходные данные и результаты проведения вычислительного эксперимента приведены в разделе 5. Наконец, в разделе 6 представлены выводы, пути улучшения модели и исследовательские перспективы.

2. Обзор литературы

Проблеме оптимизации ежемесячного планирования лесных грузопотоков посвящен целый ряд зарубежных и отечественных работ, различающихся формулировкой, методом поиска решения, факторами, учитываемыми при планировании. В работе D'Amours и др. [3] представлен обзор различных проблем планирования применительно к лесной промышленности, а также анализ их вклада в исследование операций.

В работе Epstein и др. [6] представлена модель в формулировке линейного программирования (далее ЛП) проблемы ежемесячного планирования лесозаготовок, на которой основа СППР OPTICORT, используемая на предприятиях лесной промышленности Чили. В которой учитываются: распределение делянок по периодам, решения по раскряжке, хранению и распределению заготовленных лесоматериалов по направлениям. Метод основан на технике разъединения, когда схемы раскряжки создаются в дополнительной проблеме, а затем включаются в основную проблему в процессе оптимизации.

В своей диссертации Mitchell [8] приводит подробную СЦП модель описывающую проблему распределения делянок, запланированных в рубку, между имеющимися лесозаготовительными комплексами с указанием оптимального порядка их освоения в контексте лесной промышленности Новой Зеландии и Австралии. В модель включены

решения по раскряжке хлыстов, хранению и свежести лесоматериалов, распределению объемов к транспортировке продукции потребителям. В работе приведены два типа формулировки модели оперативного планирования лесозаготовок: Модель I – комбинация каждого комплекса, делянки (технологическая схема заготовки), и периода обозначена отдельной булевой переменной. Распределение делянок между комплексами и порядок освоения обозначаются отдельными переменными; Модель II – булева переменная обозначает назначение комплексу заранее составленного графика заготовки и перемещения между делянками.

В работе Karlsson и др. [7] представлена СЦП модель проблемы ежемесячного планирования лесозаготовок, актуальная для шведской лесной промышленности. В модели учитывается распределения делянок между комплексами (Модель I), объемы хранения и планируемой перевозки круглых лесоматериалов. Отличительная особенность модели заключается в учете стоимости содержания и открытия элементов дорожной сети, а также необходимость наличия открытых дорог, соединяющих делянку и потребителя для осуществления вывозки.

Beaudoin и др. [1] разработали СЦП модель оптимизации цепочки поставок лесных ресурсов для интегрированных предприятий лесной промышленности Канады, потенциально имеющих ряд перерабатывающих производств, учитывающую обмен ресурсами между предприятиями, с горизонтом планирования равным одному году, разбитому на 28 периодов различной продолжительности. Целевая функция оптимизации – максимизация прибыли с продаж готовой продукции и щепы. В модели учитывается “свежесть” лесоматериалов – ухудшение их качества, связанное с временем хранения на складе в не зимние периоды.

В работе Bredstrom и др. [2] представлена СЦП модель проблемы распределения делянок, запланированных в рубку, между имеющимися лесозаготовительными комплексами с указанием оптимального порядка их освоения (Модель I), актуальная для шведской лесной промышленности. В статье предлагается двух стадийный подход для ее решения. На первой стадии решения решается задача распределения делянок между комплексами, тогда как на второй – маршрутизации между назначенными делянками.

В работе Dems и др. [5] представлена СЦП модель проблемы ежемесячного снабжения потребителей круглыми лесоматериалами, актуальная для лесной промышленности Канады, учитывающая кроме классических решений также и назначение схем раскряжки каждой ступени толщины каждой породы, произрастающих на лесосеках деревьев. Схемы раскряжки определяются путем создания приоритетных листов. В работе впервые учитывалось влияние числа и характеристик заготавливаемых сортиментов на делянке на стоимость заготовки комплексами харвестер плюс форвардер. В последующей работе Dems и др. [4] представлена гибридная модель, объединяющая формулировки программирования в ограничениях (далее ПвО) и СЦП той же проблемы. Модуль ПвО используется для: распределения делянок и определения оптимального порядка их освоения комплексами (Модель II) с учетом изменяющейся производительности; назначения схем раскряжки.

В работе Rix и др. [9] представлена СЦП модель ежемесячного планирования лесозаготовок, актуальная для лесной промышленности Канады. Представленная модель кроме классических решений по распределению делянок и определению графиков движения комплексов между ними (Модель II), определению выхода сортиментов и распределению объемов по направлениям потребления, учету хранения и свежести лесоматериалов дополнительно включает в себя решения по маршрутизации лесовозного флота. Относя её к классу проблем производства-маршрутизации. Характеристики дорожной сети не учитываются. Для поиска решений используются два метода: эвристика ветвей и цены; двух стадийный подход, в котором на первой стадии при назначении объемов по направлениям

перевозки учитывается только производительность лесовозов, в то время как на втором этапе определяется необходимое число повторений маршрутов лесовозами для перевозки заданного объема.

В своей диссертации Коваленко Т.В. [11] представил ЛП модель решающую проблему рациональной организации лесных грузопотоков при освоении годового лесосечного фонда лесозаготовительного предприятия, актуальную для лесной промышленности РФ. В которой учитываются: распределение делянок по периодам, определение объемов хранения и распределение заготовленных лесоматериалов по направлениям, а также определение оптимальной конструкции усов и технологической схемы разработки лесосек.

В диссертации Соколова А.П [12] представлены СППР транспортировки и заготовки деловой древесины. Разработанные модели, сформулированные средствами динамического программирования (далее ДП) предназначены для определения распределения делянок, запланированных в рубку, между имеющимися лесозаготовительными комплексами с указанием порядка их освоения; совокупности сменных заданий для каждого автомобиля, составленных для заданного срока планирования. Распределения делянок по сезонам основано на максимизации потенциальной прибыли от продаж заготавливаемой продукции. Хранение, спрос, распределение объемов продукции по направлениям перевозки не рассматривается. Порядок освоения делянок рассчитывается исходя из минимизации транспортных затрат на рекогносцировку комплексов. Оптимальное распределение делянок по заготовительным комплексам организовано путем полного перебора возможных вариантов с помощью алгоритма генерации перестановок.

В работе Rönngqvist и др. [10] обозначены 33 открытых проблемы исследования операций применительно к лесной промышленности. Одна из них задает вопрос: “Как мы можем реализовать последовательную модель принятия решений для проблем планирования имеющих иерархическую структуру”? Одним из вариантов решения является подход моделирования ожиданий. При таком подходе, модель включает в себя переменные и ограничения, описывающие поведение проблемы планирования нижнего уровня. Например, учет производительности лесовозов в ежемесячном планировании и их маршрутизация на недельном уровне.

Исходя из текущей практики планирования на предприятиях лесной промышленности РФ решения по определению схем раскряжевки и выходу сортиментов на делянках мы отнесли к проблеме ежегодного планирования грузопотоков, тогда как определение времени хранения лесоматериалов на складах и определение маршрутов лесовозов на недельный уровень. Модель ежемесячного планирования должна включать следующие факторы: проблему распределения делянок, запланированных в рубку, между имеющимися лесозаготовительными комплексами с указанием оптимального порядка их освоения; учитывать: как лесохозяйственные мероприятия, требующее более одного месяца на выполнение, так и те, которые требуют не более месяца на выполнение; равномерность распределения объемов заготовки различных групп сортиментов между комплексами по их типам; пропускную способность и максимальный грузооборот всех элементов лесной дорожной сети; транспортные ограничения, накладываемые существующим лесовозным флотом; различные типы складов; вывозку железнодорожным и водным транспортом. Причем выходными данными должны быть не только решения по использованию лесозаготовительных комплексов, но и лесовозных автопоездов.

3. Описание проблемы

Мы рассматриваем следующие мероприятия цепочки создания стоимости: лесозаготовку харвестерами и трелевку форвардерами; хранение лесоматериалов на верхних, промежуточных, сезонных, зимних, нижних складах, терминалах и в портах; перевозку лесоматериалов лесовозными автопоездами; вывозку железнодорожным и водным транспортом. Горизонт планирования равен одному году, период планирования – одному месяцу.

3.1. Лесосечные работы

Существует известный набор делянок, отведенных в рубку в течении года. Каждая из них имеет уникальные характеристики. Варьируется: площадь, заготавливаемые сортименты и их объемы, время на заготовку, средний объем хлыста, тип лесохозяйственного мероприятия (сплошные либо выборочные рубки), сезон рубки. Делянка всегда заготавливается полностью как максимум в два смежных периода планирования. Все делянки соединены с соответствующими элементами дорожной сети. Существует известный набор лесозаготовительных комплексов (систем машин харвестер плюс форвардер), разного класса и марки, а как следствие имеющих разную производительность в зависимости от среднего объема хлыста, расстояния трелевки и типа лесохозяйственного мероприятия. Средняя производительность равна 120 м³/см. Все комплексы работают в две смены в течении всего года. Так как комплексы принадлежат подрядчикам необходимо учитывать периоды их доступности для найма. Число необходимых комплексов для заготовки определялось исходя из технологической схемы и общего объема к заготовке и задавалось вручную. Работа в выходные возможна, но требует увеличенной оплаты. Необходимо поддерживать примерно равные уровни заготовки между комплексами одного класса. Время на перемещение между делянками рассчитывалось исходя из расстояния: при небольшом расстоянии перебазировка своим ходом, в противном случае с использованием тягачей. Среднее время на перемещение между делянками – один день. Учитываются только прямые затраты на привлечение подрядчиков на заготовке. Гараж для всех комплексов принят одинаковым, с него же идет развозка операторов.

3.2. Хранение на складах

Лесосечные работы имеют ярко выраженную сезонность, в то время как потребление лесоматериалов на производствах равномерное, что требует создания запасов лесоматериалов. Сортименты могут храниться на верхних складах делянок объем хранения неограничен, однако в не зимние периоды накладывается стоимость, связанная с ухудшением качества сортиментов. Учитываются промежуточные, сезонные, зимние, нижние склады, терминалы и в порты. На зимних складах затраты связанные с потерей качества незначительны и не учитываются, в отличие от затрат на формирование склада. На промежуточных и сезонных учитываются затраты связанные с потерей качества. Погрузка и выгрузка на верхних, промежуточных, сезонных и зимних складах осуществляется гидроманипуляторами лесовозных автопоездов, на нижних складах, терминалах и портах передвижными либо стационарными кранами. Учитываются мощности складов, ограничения по погрузке, выгрузке и максимальный объем хранения. Некоторые сортименты нельзя хранить на некоторых складах. Стоимость хранения на нижних складах, терминалах и в портах учитывается. Терминалы и порты потребляют определенный объем лесоматериалов для удовлетворения контрактов по отгрузке продукции.

3.3. *Хранение во дворе потребителя*

Часть поступающих лесоматериалов может храниться во дворе потребителя. Потребитель не может использоваться как перевалочный пункт. Хранение во дворе производства связано с расходами на инвентаризацию, разгрузку в случае использования кранов. Потребление на производствах – равномерное в течении года.

3.4. *Лесные грузопотоки*

Разрешены четыре типа связей: делянка – склад; делянка – потребитель; промежуточный, сезонный, зимний склад – нижний склад, терминал порт; склад – потребитель. Суммарный объем грузопотоков за период ограничен средневзвешенной производительностью доступного лесовозного флота. При назначении грузопотоков учитываются маршруты. Маршруты состоят из последовательности элементов дорожной сети соответствующего класса, соединяющих пункты начала и окончания маршрута. Разрешены переменные потока меньше чем полезная нагрузка на лесовоз.

3.5. *Дорожная сеть*

Каждой категории дорог присвоен свой индекс (усы летние - a , зимники - $winter$, дороги круглогодичного действия - u , дороги общего пользования с грунтовым покрытием - p , дороги общего пользования с асфальтобетонным покрытием – s). Учитываются расстояния по категориям дорог: от лесосек до потребителя; от лесосек до складов; от складов до складов; от складов до потребителя. Последовательно записанные индексы дорог, соединяющих пункт начала и пункт окончания движения, являются записью маршрута (например, для связи делянка – потребитель: TOKARS-3-2-15 – Месяц Свирь ООО маршрут начинается с движения по зимнику, затем по дороге круглогодичного действия, затем по дороге общего пользования с грунтовым покрытием и заканчивается движением по дороге общего пользования с асфальтобетонным покрытием, обозначается как $wups$). Учитываются списки маршрутов доступных для движения с пункта на пункт и дорог, входящих в маршруты. Каждому элементу дорожной сети присвоен свой уникальный идентификатор (далее ID). Дорогам в соответствии с их категориями был назначен годовой грузооборот по *Своду Правил дороги лесные проектирование и строительство* (далее СП): s – 700000 м³, p – 350000 м³, u – 350000 м³, $winter$ – 140000 м³, a – 140000 м³. Средние скорости по типам дорог были определены по СП и составили (лето/зима) км/ч: усы летние – 15/1, зимники – 1/50, дороги круглогодичного действия – 40/40, дороги общего пользования с грунтовым покрытием – 60/60, дороги общего пользования с асфальтобетонным покрытием – 70/70. Грузооборот дорожной сети не может быть превышен; сезонные дороги доступны только в соответствующие периоды.

3.6. *Транспортировка лесовозными автопоездами*

Учитывается собственный флот лесовозных автопоездов и ряд машин подрядных организаций. В соответствии с тарифами были определены прямые затраты на вывозку включая погрузку и разгрузку для всех возможных пунктов начала и пунктов окончания движения, дифференцированные по лесовозам и сортаментам. Производительность на вывозке определяется по формуле (отдельно для зимних и летних периодов):

$$P_{cm} = \frac{(T_{cm} - t_{п.з.})k_b Q_{пол}}{2 * \sum_i \frac{L_i}{v_i} + \sum t_{пр}} \quad (1)$$

где T_{cm} – продолжительность смены, 8,5 ч; $t_{п.з.}$ – время на подготовительно заключительные работы, 0,5 ч; k_b – коэффициент использования рабочего времени, 0,9; L_i – расстояние вывозки по i -ой дороге, км; v_i – среднетехническая скорость автопоезда по i -ой дороге, км/ч; $Q_{пол}$ – полезная нагрузка, т; $\sum t_{пр}$ – сумма простоев за один рейс на погрузке, разгрузке и на разъездах, ч. Вывозка ведется в две смены. Для уменьшения числа переменных лесовозы были заменены классами в соответствии с прицепным составом, с указанием числа доступных лесовозов в периоде для каждого класса. Допускается возможность нехватки мощностей на перевозке за период.

3.7. Вывозка железнодорожным и водным транспортом

Учитываются объемы поставок сортиментов за год, максимальное число доступных составов, судов за период. Минимальные объемы составов дифференцированы по перевозимым грузам. Учитываются различные типы сухогрузов.

4. Математическая формулировка

4.1. Множества

T – множество периодов планирования t . T^{winter} – подмножество зимних периодов планирования t . $T^{winter} \subset T$. FA – множество объектов хозяйствования n_{in}, n_{out} . $O, J, H, Q \subset FA$. $O^{plusdepotso}$ – множество лесосек o, ob , на которых заготовка выполняется подрядчиками, плюс гараж базирования многооперационных лесных машин. $O^{origindepoto}$ – подмножество $O^{plusdepotso}$, включающее лесосеки o, ob и гараж $origindepoto$. $O^{destinationdepoto}$ – подмножество $O^{plusdepotso}$, включающее лесосеки o, ob и гараж $destinationdepoto$. O – подмножество $O^{plusdepotso}$, включающее лесосеки o, ob . O^{winter} – подмножество O , включающее лесосеки o, ob доступные для заготовки только в зимние периоды. CO – множество лесозаготовительных комплексов $c \in CO$ подрядных организаций. J – множество потребителей j . H – множество потребителей сортиментов h , перевозимых по ж/д, водным транспортом. Q – множество промежуточных, сезонных, нижних складов и терминалов q . Q_w – подмножество промежуточных, сезонных, нижних складов qw . $Q_w \subset Q$. Q_{train} – подмножество терминалов q_{train} . $Q_{train} \subset Q$. A – ассортимент заготавливаемой продукции a ; $a \in A$ – элемент ассортимента (КЛМ). $A^{aspenplusfirewood}$ – подмножество сортиментов a , осинового балансов и дров. $A^{spruceplusbirchpulp}$ – подмножество сортиментов a , еловых и березовых балансов. A^{veneer} – подмножество сортиментов a , фанерных кряжей. A^{pine} – подмножество сортиментов a , сосновых сортиментов. A – множество летних усов α . B – множество зимников β . Γ – множество лесных дорог круглогодочного действия γ . P – множество дорог общего пользования с грунтовым покрытием p . S – множество дорог общего пользования с асфальтобетонным покрытием s . F – множество маршрутов f . R – множество классов лесовозных автопоездов с гидроманипуляторами r .

4.2. Параметры

$days_t$ – число дней в периоде t . $workingdays_t$ – число рабочих дней в периоде t . $daysoutsourse_{ct}$ – плановое число рабочих дней комплекса $c \in CO$ в периоде t . $extradaysoutsourse_{ct}$ – максимальное число сверхурочных рабочих дней комплекса $c \in CO$ в периоде t . nco_o – плановое число работающих комплексов при проведении лесохозяйственного мероприятия на лесосеке o . $availabilityoutsourse_{ct}$ – плановое число работающих комплексов при проведении лесохозяйственного мероприятия на лесосеке $o \in O$. to_{cib}^m – число дней необходимое комплексу $c \in CO$ для перемещения с лесосеки o на лесосеку $ob, o \neq ob$. co_{coob}^m – стоимость перемещения комплекса $c \in CO$ с лесосеки o на лесосеку $ob, o \neq ob$ в период t . to_{co}^l – число дней необходимое для полного проведения лесохозяйственного мероприятия комплексом $c \in CO$ на части лесосеки o . c_{cot}^l – стоимость использования комплекса $c \in CO$ на части лесосеки o для проведения лесохозяйственного мероприятия в период t . c_{cot}^{base} – стоимость перевозки операторов комплекса $c \in CO$ с места проживания до лесосеки o в период t . $V^{equalco}$ – необходимый для обеспечения равномерности объем заготовки комплексами $c \in CO$. tdo_{coob} – параметр, отображающий необходимое число дней для заготовки части лесосеки o комплексом $c \in CO$ и перемещения на лесосеку ob . $lbtw_{co}^{origindepoto}$ – параметр, обозначающий левую границу периода начала маршрута комплекса $c \in CO$ с гаража $o = origindepoto$. $rbtw_{co}^{origindepoto}$ – параметр, обозначающий правую границу периода начала маршрута комплекса $c \in CO$ с гаража $o = origindepoto$. $lbtw_{co}^{destinationdepoto}$ – параметр, обозначающий левую границу периода окончания маршрута комплекса $c \in CO$ на гараж $o = destinationdepoto$. $rbtw_{co}^{destinationdepoto}$ – параметр, обозначающий правую границу периода окончания маршрута комплекса $c \in CO$ на гараж $o = destinationdepoto$. $lbtimewindow_{cot}$ – параметр равный номеру периода t , в котором комплекс $c \in CO$ начинает проведение лесохозяйственного мероприятия на лесосеке $o \in O$. $lbtw_{co}$ – параметр, обозначающий левую границу периода прибытия комплекса $c \in CO$ на лесосеку $o \in O$. $rbtw_{co}$ – параметр, обозначающий правую границу периода прибытия комплекса $c \in CO$ на лесосеку $o \in O$. $yoparameter_{cit}$ – параметр, принимающий значения переменной yo_{cot} , полученные в результате решения основной проблемы. $V_{oa}^{loggedo}$ – объем сортимента a доступного к заготовке на лесосеке o . $PenaltyI$ – штраф за лесосеку в резерве. $PenaltyII$ – штраф за дни в работе сверх нормы. $PenaltyIII$ – штраф за заготовку лесосеки в два смежных периода. M – большое число. V_o^{umax} – максимальный объем хранения лесоматериалов на верхнем складе лесосеки $o \in O$. V_{qw}^{wmax} – максимальный объем хранения лесоматериалов на складе qw . $V_{qw}^{woutflow}$ – ограничение по погрузке на складе qw . V_{qwat}^{wmax} – максимальный объем хранения лесоматериалов a на складе qw в периоде t . V_{qwa}^{wend} – требуемый объем хранения лесоматериалов a на складе qw в периоде $t = 12$. $V_{qtrain}^{wtrainunload}$ – ограничение по разгрузке на терминале $qtrain$. $V_{qtrain}^{wtrainmax}$ – максимальный объем хранения лесоматериалов на терминале $qtrain$. $V_{qtrainat}^{wtrainmax}$ – максимальный объем хранения лесоматериалов a на терминале $qtrain$ в периоде t . $V_{qtrain}^{woutflow}$ – ограничение по погрузке на терминале $qtrain$. V_j^{mmax} – максимальный объем хранения лесоматериалов во дворе потребителя j . V_{jat}^{mmax} – максимальный объем хранения лесоматериалов a во дворе потребителя j в периоде t . ξ_{jat} – общий объем потребления КЛМ a на пункте производства j за период планирования t . c_{at}^u – потеря качества одного м³ КЛМ a при хранении на верхнем складе лесосеки в периоде планирования t . c_{qwt}^w – стоимость хранения одного м³ КЛМ на складе qw в периоде планирования t . c_{qtrain}^w – стоимость хранения одного м³ КЛМ на складе $qtrain$ в периоде

планирования t . c_{jt}^m – стоимость хранения одного м³ КЛМ во дворе потребителя j в периоде планирования t . $V_{oa}^{initial}$, $V_{qwa}^{winitial}$, $V_{qtraina}^{winitial}$, $V_{ja}^{mininitial}$ – объем хранения лесоматериалов a на верхнем складе лесосеки o , на складе qw , на терминале $qtrain$, во дворе потребителя j соответственно на начало первого периода планирования. V_{qa}^{wend} – планируемый объем хранения лесоматериалов a на складе q на конец двенадцатого периода планирования. d_{oj} – расстояние между лесосекой o и потребителем j . d_{oq} – расстояние между лесосекой o и складом q . d_{qw} – расстояние между складом q и потребителем j . d_{qj} – расстояние между складом q и складом w ¹. $demand_{qtraina}^{yearly}$ – планируемый годовой объем отгрузок по железной дороге и водным транспортом сортиментов a со складов $qtrain$. $V_{qtrainh}^{ship}$ – объем лесовоза сухогруза, курсирующего по маршруту порт $qtrain$ – потребитель h . $nships_{qtraint}$ – доступное число судов в порту $qtrain$ за период планирования t . $V_{qtrainh}^{trainSP}$ – объем состава на маршруте терминал $qtrain$ – потребитель h , перевозящего баланс еловый, березовый. $V_{qtrainh}^{trainV}$ – объем состава на маршруте терминал $qtrain$ – потребитель h , перевозящего фанкряжи. $V_{qtrainh}^{trainP}$ – объем состава на маршруте терминал $qtrain$ – потребитель h , перевозящего сосновый сортименты. $ntrains_{qtraint}$ – доступное составов на терминале $qtrain$ за период планирования t . c_{oja}^{mov} – прямые затраты на перевозку сортиментов a с лесосеки o потребителю j . c_{oqa}^{mov} – прямые затраты на перевозку сортиментов a с лесосеки o на склад q . c_{qja}^{mov} – прямые затраты на перевозку сортиментов a со склада q потребителю j . c_{qwa}^{mov} – прямые затраты на перевозку сортиментов a со склада q на склад w . $\Pi_t^{averageweighted}$ – средневзвешенная производительность лесовозного флота в периоде t . $routein_{ojf}$, $routein_{oqf}$, $routein_{qjf}$, $routein_{qwf}$ – параметры равные 1, если транспортировка с лесосеки o потребителю j , с лесосеки o на склад q , со склада q потребителю j , со склада q на склад w соответственно может осуществляться по маршруту f , 0 в противном случае². $access_{ojf\alpha}$, $access_{oqf\alpha}$, $access_{qjf\alpha}$, $access_{qwf\alpha}$, $winter_{ojf\beta}$, $winter_{oqf\beta}$, $winter_{qjf\beta}$, $winter_{qwf\beta}$, $allyear_{ojf\gamma}$, $allyear_{oqf\gamma}$, $allyear_{qjf\gamma}$, $allyear_{qwf\gamma}$, $paved_{ojfp}$, $paved_{oqfp}$, $paved_{qjfp}$, $state_{ojfs}$, $state_{oqfs}$, $state_{qjfs}$, $state_{qwfs}$ – параметры равные 1, если дорога $\alpha, \beta, \gamma, p, s$ соответственно присутствует в маршруте f используемом при перевозке лесоматериалов с лесосеки o потребителю j , с лесосеки o на склад q , со склада q потребителю j , со склада q на склад w соответственно. V_{α}^{year} – нормативный годовой грузооборот для дороги α . V_{β}^{year} – нормативный годовой грузооборот для дороги β . V_{γ}^{year} – нормативный годовой грузооборот для дороги γ . V_p^{year} – нормативный годовой грузооборот для дороги p . V_s^{year} – нормативный годовой грузооборот для дороги s . $ntrucks_{rt}$ – число лесовозных автопоездов класса r , находящихся в рабочем состоянии в периоде t . $\Pi_{rt}^{average}$ – средневзвешенная по сортиментам производительность лесовозных автопоездов класса r в периоде планирования t . $days_{rt}$ – планируемое число дней работы лесовоза категории r в периоде t . $extradays_{rt}$ – максимальное число сверхурочных дней работы лесовоза категории

¹ Группа параметров, обозначающих расстояния между объектами хозяйствования используется для устранения заведомо неэффективных решений (перевозка лесоматериалов по связям с минимальным расстоянием между пунктами, превышающим заданное значение).

² Группа параметров $routein$ используется для исключения переменных заведомо равных нулю из расчета (движению по маршруту не доступному для связи пункт начала маршрута - пункт окончания маршрута)

r в периоде t . $P_{fojra}, P_{foqra}, P_{fqjra}, P_{fqwra}$ – производительность лесовоза категории r , перевозящего КЛМ a с лесосеки o на предприятие j , с лесосеки o на склад q , со склада q на предприятие j , со склада q на склад w соответственно по маршруту f . $P_{fojra}^{winter}, P_{foqra}^{winter}, P_{fqjra}^{winter}, P_{fqwra}^{winter}$ – производительность лесовоза категории r , перевозящего КЛМ a с лесосеки o на предприятие j , с лесосеки o на склад q , со склада q на предприятие j , со склада q на склад w соответственно по маршруту f в зимние периоды планирования. $C_{fojr}^{truck}, C_{foqr}^{truck}, C_{fqjr}^{truck}, C_{fqwr}^{truck}$ – прямые затраты на перевозку лесовозом категории r лесоматериалов с лесосеки o на предприятие j , с лесосеки o на склад q , со склада q на предприятие j , со склада q на склад w соответственно по маршруту f . $PenaltyIV$ – штраф за дни в работе сверх нормы. $PenaltyV$ – штраф за не вывезенный объем лесоматериалов. $OJParameter_{fojat}$ – параметр, принимающий значения переменной x_{fojat}^f , полученные в результате решения основной проблемы. $OQParameter_{foqat}$ – параметр, принимающий значения переменной x_{foqat}^f , полученные в результате решения основной проблемы. $QJParameter_{fqjat}$ – параметр, принимающий значения переменной x_{fqjat}^o , полученные в результате решения основной проблемы. $QWParameter_{fqwat}$ – параметр, принимающий значения переменной x_{fqwat}^o , полученные в результате решения основной проблемы.

4.3. Переменные

$u_{cot} = 1$ – если комплекс $c \in CO$ начинает проведение лесохозяйственного мероприятия (рубки ухода, выборочной рубки, сплошной рубки), на лесосеке $o \in O$ в период t , 0 в противоположном случае. $\rho_{o} = 1$ – если запланированное лесохозяйственное мероприятие на лесосеке $o \in O$ не проводится в течении года, 0 в противном случае. $\rho'_{ot} = 1$ – если запланированное лесохозяйственное мероприятие на лесосеке i не проводится в периоде t , 0 в противном случае. $lo1_{cot}$ – переменная обозначающая сколько десятых долей части лесосеки $o \in O$ было заготовлено комплексом $c \in CO$ в периоде t . $lo2_{cot}$ – переменная обозначающая сколько десятых долей части лесосеки $o \in O$ было заготовлено комплексом $c \in CO$ в периоде t , следующем за периодом начала заготовки. $extrao_{ct}$ – число дней в работе комплекса $c \in CO$, назначаемое сверх планируемого. $xo_{cob} = 1$ – если комплекс $c \in CO$ перемещается с лесосеки $o \in O$ на лесосеку $ob \in O$ в период t . $to_{co}^{arrival}$ – дата прибытия комплекса $c \in CO$ на лесосеку либо гараж планирования $o \in O^{plusdepots}$. u_{oat} – объем хранения лесоматериалов a на верхнем складе лесосеки o в периоде t . w_{qwat} – объем хранения лесоматериалов a на складе qw в периоде t . $w_{qtrainat}$ – объем хранения лесоматериалов a на терминале $qtrain$ в периоде t . m_{jat} – объем хранения лесоматериалов a во дворе потребителя j в периоде t . $x_{fojat}^f, x_{foqat}^f, x_{fqjat}^o, x_{fqwat}^o$ – объем транспортировки КЛМ a с лесосеки o потребителю j , с лесосеки o на склад q , со склада q на предприятие j , со склада q на склад w соответственно по маршруту f в периоде планирования t . $demand_{qtrainhat}^{calc}$ – рассчитанный объем сортиментов a со складов $qtrain$ потребителям h в периоде t для выполнения запланированных годовых отгрузок по железной дороге и водным транспортом. $s_{qtrainht}^{spruce}$ – число судов, перевозящих еловый баланс из порта $qtrain$ потребителю h в периоде t . $s_{qtrainht}^{aspen}$ – число судов, перевозящих осиновый баланс и дрова из порта $qtrain$ потребителю h в периоде t . $trains_{qtrainht}^{spruce}$ – число составов, перевозящих еловый и березовый баланс с терминала $qtrain$ потребителю h в периоде t . $trains_{qtrainht}^{veneer}$ – число составов, перевозящих осиновый баланс и дрова с терминала $qtrain$ потребителю h в периоде t . $trains_{qtrainht}^{pine}$ – число составов,

перевозящих осинового баланса и дрова с терминала q потребителю h в периоде t . $t_{fojrat}^{mov}, t_{foqrat}^{mov}, t_{fqjrat}^{mov}, t_{fqwrat}^{mov}$ – суммарное число дней, затрачиваемое лесовозами класса r на перевозку КЛМ a с лесосеки o потребителю j , с лесосеки o на склад q , со склада q на предприятие j , со склада q на склад w соответственно по маршруту f в период t . $extra_{rt}$ – число сверхурочных дней в работе лесовоза класса r в периоде t . $V_{fojat}^{untransported}, V_{foqat}^{untransported}, V_{fqjat}^{untransported}, V_{fqwat}^{untransported}$ – не вывезенный объем лесоматериалов a с лесосеки o потребителю j , с лесосеки o на склад q , со склада q на предприятие j , со склада q на склад w соответственно по маршруту f в период t .

4.4. Ограничения

На лесосеке либо проводится лесохозяйственное мероприятие, либо она отправляется в резерв.

$$\sum_{c \in CO} \sum_{t \notin T^{winter}} y_{cot} + \rho_{o_o} * n_{co_o} = n_{co_o} \quad \forall o \notin O^{winter} \quad (2)$$

$$\sum_{c \in CO} \sum_{t=1}^{T^{winter}} y_{cot} + \rho_{o_o} * n_{co_o} = n_{co_o} \quad \forall o \in O^{winter} \quad (3)$$

Ограничение по количеству комплексов необходимых для проведения лесохозяйственного мероприятия в установленные сроки.

$$\sum_{c \in CO} y_{cot} + \rho'_{ot} * n_{co_o} = n_{co_o} \quad \forall o \notin O^{winter}, t \notin T^{winter} \quad (4)$$

$$\sum_{c \in CO} y_{cot} + \rho'_{ot} * n_{co_o} = n_{co_o} \quad \forall o \in O^{winter}, t \in T^{winter} \quad (5)$$

Лесохозяйственное мероприятие проводится только один раз.

$$\sum_{t=1}^T y_{cot} \leq 1 \quad \forall c \in CO, o \in O \quad (6)$$

Лесохозяйственное мероприятие на лесосеке в период начала заготовки либо проводится целиком, либо частично.

$$lo1_{cot} \leq y_{cot} * 10 \quad \forall c \in CO, o \in O, t \in T \quad (7)$$

Заготовка на лесосеке ведется максимум в двух смежных периодах.

$$lo1_{cot} + lo2_{cot+1} = y_{cot} * 10 \quad \forall c \in CO, o \in O, 1 \leq t < 12 \quad (8)$$

Определение части лесосеки, заготовленной в смежный с периодом начала заготовки период.

$$lo2_{cot} \leq y_{cot-1} * 10 - lo1_{cot-1} \quad \forall c \in CO, o \in O, t \geq 2 \quad (9)$$

Максимальное время на заготовку лесосеки равняется двум периодам.

$$\sum_{t=1}^T lo1_{cot} + \sum_{t=1}^T lo2_{cot} = \sum_{t=1}^T yo_{cot} * 10 \quad \forall c \in CO, o \in O \quad (10)$$

Заготовка в смежном периоде равна нулю для первого периода планирования.

$$lo2_{cot} = 0 \quad \forall c \in CO, o \in O, t = 1 \quad (11)$$

Равномерность заготовки комплексами.

$$V^{equalco} - 2000 [M^3] \leq \sum_{o=1}^O \sum_{a=1}^A \sum_{t=1}^T yo_{cot} * V_{oa}^{loggedo} / nco_o \leq V^{equalco} + 2000 [M^3] \quad (12)$$

Не более планируемого числа дней в работе.

$$\sum_{o=1}^O lo1_{cot} * to_{co}^l / 10 + \sum_{o=1}^O lo2_{cot} * to_{co}^l / 10 + \sum_{o=1}^O yo_{cot} * 1 [day] \leq daysoutsource_{ct} + extradaysoutsource_{ct} \quad \forall c \in CO, t \in T \quad (13)$$

Работа сверхурочно ограничена числом выходных дней за период.

$$extrao_{ct} \leq extradaysoutsource_{ct} \quad \forall c \in CO, t \in T \quad (14)$$

Ограничения по маршрутизации комплексов (расширенная для многих комплексов задача коммивояжера с временными окнами).

$$\sum_{ob=1}^{O^{destinationdepot}} x_{coob} = \sum_{t=1}^T yoparameter_{cot} \quad \forall c \in CO, o \in O \quad (15)$$

$$\sum_{ob=1}^O x_{coob} = 1 \quad \forall c \in CO, o = origindepoto \quad (16)$$

$$\sum_{o=1}^{O^{origindepot}} x_{coob} - \sum_{o=1}^{O^{destinationdepot}} x_{cobo} = 0 \quad \forall c \in CO, ob \in O \quad (17)$$

$$\sum_{o=1}^O x_{coob} = 1 \quad \forall c \in CO, ob = destinationdepoto \quad (18)$$

$$to_{co}^{arrival} + tdo_{coob} - to_{cob}^{arrival} \leq M * (1 - x_{coob}) \quad \forall c \in CO, o \in O^{origindepot}, ob \in O^{destinationdepot} \quad (19)$$

$$to_{co}^{arrival} \geq lbtw_{co} \quad \forall c \in CO, o \in O \quad (20)$$

$$to_{co}^{arrival} \leq rbtw_{co} \quad \forall c \in CO, o \in O \quad (21)$$

$$lbtw_{co}^{origindepoto} \leq to_{co}^{arrival} \leq rbtw_{co}^{origindepoto} \quad \forall c \in CO, o = origindepoto \quad (22)$$

$$lbtw_{co}^{destinationdepoto} \leq to_{co}^{arrival} \leq rbtw_{co}^{destinationdepoto} \forall c \in CO, o$$

$$= destinationdepoto \quad (23)$$

Объем хранения лесоматериалов на верхнем складе лесосеки, заготавливаемой подрядчиками в периодах планирования $1 < t \leq 12$.

$$u_{oat} = u_{oat-1} + \sum_{c=1}^C lo1_{cot} V_{oa}^{loggedo} / nco_o / 10 + \sum_{c=1}^C lo2_{cot} V_{oa}^{loggedo} / nco_o / 10$$

$$- \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J x_{fojat}^f - \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q x_{foqat}^f \forall 1 < t \leq 12, o \in O, a \in A \quad (24)$$

Объем хранения лесоматериалов на верхнем складе лесосеки, заготавливаемой подрядчиками в период планирования

$$u_{oat} = V_{oa}^{uinitial} + \sum_{c=1}^C lo1_{cot} V_{oa}^{loggedo} / nco_o / 10 + \sum_{c=1}^C lo2_{cot} V_{oa}^{loggedo} / nco_o / 10$$

$$- \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J x_{fojat}^f - \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q x_{foqat}^f \forall t = 1, o \in O, a \in A \quad (25)$$

Максимальный объем хранения на верхнем складе.

$$\sum_{a=1}^A u_{oat} \leq V_o^{umax} \forall t \in T, i \in I \quad (26)$$

Объем вывозки не может превышать наличие КЛМ на складе в периодах планирования $1 < t \leq 12$.

$$\sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J x_{fojat}^f + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q x_{foqat}^f$$

$$\leq u_{oat-1} + \sum_{c=1}^C lo1_{cot} V_{oa}^{loggedo} / 10 nco_o$$

$$+ \sum_{c=1}^C lo2_{cot} V_{oa}^{loggedo} / nco_o / 10 \forall 1 < t \leq 12, o \in O, a \in A \quad (27)$$

Объем вывозки не может превышать наличие КЛМ на складе в периоде планирования $t = 1$.

$$\begin{aligned} \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J x_{fojat}^f + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q x_{foqat}^f \\ \leq V_{oa}^{uinitial} + \sum_{c=1}^C lo1_{cot} V_{oa}^{loggedo} / nco_o / 10 \\ + \sum_{c=1}^C lo2_{cot} V_{oa}^{loggedo} / nco_o / 10 \quad \forall t = 1, o \in O, a \in A \end{aligned} \quad (28)$$

Объем вывозки за год не превышает заготовки + начального объема хранения.

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J x_{fojat}^f + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q x_{foqat}^f \\ \leq V_{oa}^{uinitial} + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C lo1_{cot} V_{oa}^{loggedo} / nco_o / 10 \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C lo2_{cot} V_{oa}^{loggedo} / nco_o / 10 \quad \forall i \in I, a \in A \end{aligned} \quad (29)$$

Объем хранения лесоматериалов на промежуточных, нижних складах в периодах планирования $1 < t \leq 12$.

$$\begin{aligned} w_{qwat} = w_{qwat-1} + \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{foqwat}^f - \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F x_{fqwjat}^o - \sum_{qtrain=1}^{Qtrain} \sum_{f=1}^F x_{fqwqtrainat}^o \quad \forall 1 < t \\ \leq 12, qw \in Q_w, a \in A \end{aligned} \quad (30)$$

Объем хранения лесоматериалов на промежуточных, нижних складах в периоде планирования $t = 1$.

$$\begin{aligned} w_{qwat} = V_{qwa}^{winitial} + \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{foqwat}^f - \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F x_{fqwjat}^o - \sum_{qtrain=1}^{Qtrain} \sum_{f=1}^F x_{fqwqtrainat}^o \quad \forall t \\ = 1, qw \in Q_w, a \in A \end{aligned} \quad (31)$$

Ограничение по мощности склада.

$$\sum_{a=1}^A w_{qwat} \leq V_{qw}^{wmax} \quad \forall t \in T, qw \in Q_w \quad (32)$$

Ограничение по мощности склада отдельно по каждому сортименту a .

$$w_{qwat} \leq V_{qwa}^{wmax} \quad \forall t \in T, qw \in Q_w, a \in A \quad (33)$$

Объем вывозки не может превышать наличие КЛМ на складе в периодах планирования $1 < t \leq 12$.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F x_{fqwjat}^o + \sum_{qtrain=1}^{Q_{train}} \sum_{f=1}^F x_{fqwqtrainat}^o \leq w_{qat-1} + \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{foqwat}^f \quad \forall 1 < t \leq 12, qw \in Q_w, a \in A \quad (34)$$

Объем вывозки не может превышать наличие КЛМ на складе в периоде планирования $t = 1$.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F x_{fqwjat}^o + \sum_{qtrain=1}^{Q_{train}} \sum_{f=1}^F x_{fqwqtrainat}^o \leq V_{qwa}^{winitial} + \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{foqwat}^f \quad \forall t = 1, qw \in Q_w, a \in A \quad (35)$$

Ограничение по пропускной способности склада.

$$\sum_{a=1}^A \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F x_{fqwjat}^o + \sum_{a=1}^A \sum_{qtrain=1}^{Q_{train}} \sum_{f=1}^F x_{fqwqtrainat}^o \leq V_{qw}^{wflow} \quad \forall t \in T, qw \in Q_w, a \in A \quad (36)$$

Требуемый объем хранения лесоматериалов на складе в последнем периоде планирования.

$$w_{qwat} = V_{qwa}^{wend} \quad \forall t = 12, qw \in Q_w, a \in A \quad (37)$$

Объем хранения лесоматериалов на терминалах в периодах планирования $1 < t \leq 12$.

$$w_{qtrainat}^{train} = w_{qtrainat-1}^{train} + \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{foqtrainat}^f + \sum_{qw=1}^{Q_w} \sum_{f=1}^F x_{fqwqtrainat}^o - \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F x_{fqtrainjat}^o - \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F demand_{qtrainhat}^{calc} \quad \forall 1 < t \leq 12, qtrain \in Q_{train}, a \in A \quad (38)$$

Объем хранения лесоматериалов на терминалах в периоде планирования $t = 1$.

$$w_{qtrainat}^{train} = V_{qtraina}^{winitial} + \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{foqtrainat}^f + \sum_{qw=1}^{Q_w} \sum_{f=1}^F x_{fqwqtrainat}^o - \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F x_{fqtrainjat}^o - \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F demand_{qtrainhat}^{calc} \quad \forall t = 1, qtrain \in Q_{train}, a \in A \quad (39)$$

Ограничение по мощности терминала.

$$\sum_{a=1}^A w_{qat}^{train} \leq V_{qtrain}^{wtrainmax} \quad \forall t \in T, qtrain \in Q_{train} \quad (40)$$

Ограничение по мощности склада отдельно по каждому сортименту a .

$$w_{qwat} \leq V_{qtrainat}^{wtrainmax} \quad \forall t \in T, qtrain \in Q_{train}, a \in A \quad (41)$$

Ограничение по разгрузке на терминале.

$$\sum_{a=1}^A \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{foqtrainat}^f + \sum_{qw=1}^{Q_w} \sum_{f=1}^F x_{fqwqtrainat}^o \leq V_{qtrain}^{wtrainunload} \forall t \in T, q \in Q_{train} \quad (42)$$

Объем вывозки не может превышать наличие КЛМ на терминале в периодах планирования $1 < t \leq 12$.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F x_{fqtrainjat}^o + \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F demand_{qtrainhat}^{calc} \\ \leq w_{qtrainat-1}^{train} + \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{foqtrainat}^f + \sum_{qw=1}^{Q_w} \sum_{f=1}^F x_{fqwqtrainat}^o \forall 1 < t \\ \leq 12, qtrain \in Q_{train}, a \in A \end{aligned} \quad (43)$$

Объем вывозки не может превышать наличие КЛМ на терминале в периоде планирования $t = 1$.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F x_{fqtrainjat}^o + \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F demand_{qtrainhat}^{calc} \\ \leq V_{qtraina}^{winitial} + \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{foqtrainat}^f + \sum_{qw=1}^{Q_w} \sum_{f=1}^F x_{fqwqtrainat}^o \forall t = 1, qtrain \\ \in Q_{train}, a \in A \end{aligned} \quad (44)$$

Ограничение по пропускной способности терминала.

$$\sum_{a=1}^A \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F x_{fqtrainjat}^o + \sum_{a=1}^A \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F demand_{qtrainhat}^{calc} \leq V_{qtrain}^{woutflow} \forall t \in T, q \in Q_{train} \quad (45)$$

Объем хранения лесоматериалов во дворе потребителя в периодах планирования $1 < t \leq 1$.

$$m_{jat} = m_{jat-1} + \sum_{q=1}^Q \sum_{f=1}^F x_{fqjat}^o + \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{fojat}^f - \xi_{jat} \forall 1 < t \leq 12, j \in J, a \in A \quad (46)$$

Объем хранения лесоматериалов во дворе потребителя в периоде планирования $t = 1$.

$$m_{jat} = V_{ja}^{minitial} + \sum_{q=1}^Q \sum_{f=1}^F x_{fqjat}^o + \sum_{o=1}^O \sum_{f=1}^F x_{fojat}^f - \xi_{jat} \forall t = 1, j \in J, a \in A \quad (47)$$

Максимальный объем хранения во дворе потребителя.

$$\sum_{a=1}^A m_{jat} \leq V_j^{mmax} \forall t \in T, j \in J \quad (48)$$

Максимальный объем хранения во дворе потребителя отдельно по каждому сортименту a .

$$m_{jat} \leq V_{jat}^{mmax} \forall t \in T, j \in J, a \in A \quad (49)$$

Объем перевозки за год равен запланированному.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H demand_{qtrainhat}^{calc} = demand_{qtraina}^{yearly} \forall qtrain \in Q_{train}, a \in A \quad (50)$$

Период навигации.

$$demand_{qtrainhat}^{calc} = 0 [m^3] \forall qtrain = port, h \in H, a \in A \quad (51)$$

Определение необходимого числа лесовозов-сухогрузов за период для транспортировки баланса елового.

$$demand_{qtrainhat}^{calc} = s_{qtrainht}^{spuce} V_{qtrainh}^{ship} \forall qtrain = port, h \in H, a = BE, t \in T \quad (52)$$

Определение необходимого числа лесовозов-сухогрузов за период для транспортировки дров и баланса березового.

$$\sum_{a=1}^{A^{aspenplusfirewood}} demand_{qtrainhat}^{calc} = s_{qtrainht}^{aspen} V_{qtrainh}^{ship} \forall qtrain = port, h \in H, t \in T \quad (53)$$

Ограничение по доступному числу судов за период.

$$\sum_{h=1}^H (s_{qtrainht}^{spuce} + s_{qtrainht}^{aspen}) \leq nships_{qtraint} \forall qtrain = port, t \in T \quad (54)$$

Определение необходимого подвижного состава за период для транспортировки балансов березовых и еловых.

$$\sum_{a=1}^{A^{spruceplusbirchpulp}} demand_{qtrainhat}^{calc} = trains_{qtrainht}^{spruce} V_{qtrainh}^{trainSP} \forall qtrain \neq port, h \in H, t \in T \quad (55)$$

Определение необходимого подвижного состава за период для транспортировки фанерных кражей.

$$\sum_{a=1}^{A^{veneer}} demand_{qtrainhat}^{calc} = trains_{qtrainht}^{veneer} V_{qtrainh}^{trainV} \forall qtrain \neq port, h \in H, t \in T \quad (56)$$

Определение необходимого подвижного состава за период для транспортировки сосновых сортиментов.

$$\sum_{a=1}^{A^{pine}} demand_{qtrainhat}^{calc} = trains_{qtrainht}^{pine} V_{qtrainh}^{trainP} \forall qtrain \neq port, h \in H, t \in T \quad (57)$$

Ограничение по доступному за период подвижному составу.

$$trains_{qtrainht}^{spruce} + trains_{qtrainht}^{veneer} + trains_{qtrainht}^{pine} \leq ntrains_{qtraint} \forall qtrain \neq port, h \in H, t \in T \quad (58)$$

Ограничение по годовому грузообороту по летнему усу за период.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A access_{ojf\alpha} x_{fojat}^f + \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A access_{oqf\alpha} x_{foqat}^f \\
 & + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A access_{qjf\alpha} x_{fqjat}^o + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A access_{qw f\alpha} x_{fqwat}^o \\
 & \leq V_{\alpha}^{year} \quad \forall \alpha \in A, t \in T
 \end{aligned} \tag{59}$$

Ограничение по годовому грузообороту по летнему усу за год.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A access_{ojf\alpha} x_{fojat}^f + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A access_{oqf\alpha} x_{foqat}^f \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A access_{qjf\alpha} x_{fqjat}^o \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A access_{qw f\alpha} x_{fqwat}^o \leq V_{\alpha}^{year} \quad \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{60}$$

Ограничение по годовому грузообороту по зимнику за период.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A winter_{ojf\beta} x_{fojat}^f + \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A winter_{oqf\beta} x_{foqat}^f \\
 & + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A winter_{qjf\beta} x_{fqjat}^o + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A winter_{qw f\beta} x_{fqwat}^o \\
 & \leq V_{\beta}^{year} \quad \forall \alpha \in A, t \in T
 \end{aligned} \tag{61}$$

Ограничение по годовому грузообороту по зимнику за год.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A winter_{ojf\beta} x_{fojat}^f + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A winter_{oqf\beta} x_{foqat}^f \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A winter_{qjf\beta} x_{fqjat}^o \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A winter_{qw f\beta} x_{fqwat}^o \leq V_{\beta}^{year} \quad \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{62}$$

Ограничение по годовому грузообороту по дороге круглогодичного действия за период.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A \text{allyear}_{ojf\gamma} x_{fojat}^f + \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A \text{allyear}_{oqf\gamma} x_{foqat}^f \\
 & + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A \text{allyear}_{qjfy} x_{fqjat}^o + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A \text{allyear}_{qwfy} x_{fqwat}^o \\
 & \leq V_{\gamma}^{\text{year}} \quad \forall \alpha \in A, t \in T
 \end{aligned} \tag{63}$$

Ограничение по годовому грузообороту по дороге круглогодичного действия за год.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A \text{allyear}_{ojf\gamma} x_{fojat}^f + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A \text{allyear}_{oqf\gamma} x_{foqat}^f \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A \text{allyear}_{qjfy} x_{fqjat}^o \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A \text{allyear}_{qwfy} x_{fqwat}^o \leq V_{\gamma}^{\text{year}} \quad \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{64}$$

Ограничение по годовому грузообороту по дороге общего пользования с грунтовым покрытием за период.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A \text{paved}_{ojfp} x_{fojat}^f + \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A \text{paved}_{oqfp} x_{foqat}^f \\
 & + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A \text{paved}_{qjfp} x_{fqjat}^o + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A \text{paved}_{qwfp} x_{fqwat}^o \\
 & \leq V_p^{\text{year}} \quad \forall \alpha \in A, t \in T
 \end{aligned} \tag{65}$$

Ограничение по годовому грузообороту по дороге общего пользования с грунтовым покрытием за год.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A \text{paved}_{ojfp} x_{fojat}^f + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A \text{paved}_{oqfp} x_{foqat}^f \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A \text{paved}_{qjfp} x_{fqjat}^o \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A \text{paved}_{qwfp} x_{fqwat}^o \leq V_p^{\text{year}} \quad \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{66}$$

Ограничение по годовому грузообороту по дороге общего пользования с асфальтобетонным покрытием за период.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A state_{ojfs} x_{fojat}^f + \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A state_{oqfs} x_{foqat}^f \\
 & + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A state_{qjfs} x_{fqjat}^o + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A state_{qwfs} x_{fqwat}^o \\
 & \leq V_s^{year} \quad \forall \alpha \in A, t \in T
 \end{aligned} \tag{67}$$

Ограничение по годовому грузообороту по дороге общего пользования с асфальтобетонным покрытием за год.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A state_{ojfs} x_{fojat}^f + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A state_{oqfs} x_{foqat}^f \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A state_{qjfs} x_{fqjat}^o \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A state_{qwfs} x_{fqwat}^o \leq V_s^{year} \quad \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{68}$$

Ограничение по производительности лесовозного флота.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{r=1}^R ntrucks_{rt} \Pi_{rt}^{average} days_t \\
 & \geq \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A x_{fojat}^f + \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A x_{foqat}^f + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A x_{fqjat}^o \\
 & + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A x_{fqwat}^o \quad \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{69}$$

Суммарное число дней в работе за период t для лесовозных автопоездов одного класса r не может превышать произведения числа календарных рабочих дней плюс планируемого числа сверхурочных рабочих дней за период и доступного числа лесовозов рассматриваемого класса в текущем периоде.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A t_{fojrat}^{mov} + \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A t_{foqrat}^{mov} + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A t_{fqjrat}^{mov} \\
 & + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A t_{fqwrat}^{mov} \leq days_{rt} ntrucks_{rt} + extra_{rt} ntrucks_{rt} \quad \forall r \\
 & \in R, t \in T
 \end{aligned} \tag{70}$$

Суммарное число дней в работе за период t для лесовозных автопоездов одного класса r не может превышать произведения числа календарных дней за период и доступного числа лесовозов рассматриваемого класса в текущем периоде.

$$\begin{aligned} & \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A t_{fojrat}^{mov} + \sum_{f=1}^F \sum_{o=1}^O \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A t_{foqrat}^{mov} + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A t_{fqjrat}^{mov} \\ & + \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{w=1}^Q \sum_{a=1}^A t_{fqwrat}^{mov} \leq days_t ntrucks_{rt} \quad \forall r \in R, t \in T \end{aligned} \quad (71)$$

Назначенное число сверхурочных дней в работе лесовозов класса r не может превышать календарного.

$$extra_{rt} \leq extradays_{rt} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (72)$$

Определение числа дней на вывозке лесовозов класса r в летние периоды t .

$$\sum_{r=1}^R \Pi_{fojra} t_{fojrat}^{mov} \geq OJParameter_{fojat} \quad \forall f \in F, o \in O, j \in J, a \in A, t \notin T^{winter} \quad (73)$$

$$\sum_{r=1}^R \Pi_{foqra} t_{foqrat}^{mov} \geq OQParameter_{foqat} \quad \forall f \in F, o \in O, q \in Q, a \in A, t \notin T^{winter} \quad (74)$$

$$\sum_{r=1}^R \Pi_{fqjra} t_{fqjrat}^{mov} \geq QJParameter_{fqjat} \quad \forall f \in F, q \in Q, j \in J, a \in A, t \notin T^{winter} \quad (75)$$

$$\sum_{r=1}^R \Pi_{fqwra} t_{fqwrat}^{mov} \geq QWParameter_{fqwat} \quad \forall f \in F, q \in Q, w \in Q, a \in A, t \notin T^{winter} \quad (76)$$

Определение числа дней на вывозке лесовозов класса r в зимние периоды t .

$$\sum_{r=1}^R \Pi_{fojra}^{winter} t_{fojrat}^{mov} \geq OJParameter_{fojat} \quad \forall f \in F, o \in O, j \in J, a \in A, t \in T^{winter} \quad (77)$$

$$\sum_{r=1}^R \Pi_{foqra}^{winter} t_{foqrat}^{mov} \geq OQParameter_{foqat} \quad \forall f \in F, o \in O, q \in Q, a \in A, t \in T^{winter} \quad (78)$$

$$\sum_{r=1}^R \Pi_{fqjra}^{winter} t_{fqjrat}^{mov} \geq QJParameter_{fqjat} \quad \forall f \in F, q \in Q, j \in J, a \in A, t \in T^{winter} \quad (79)$$

$$\sum_{r=1}^R \Pi_{fqwra}^{winter} t_{fqwrat}^{mov} \geq QWParameter_{fqwat} \quad \forall f \in F, q \in Q, w \in Q, a \in A, t \in T^{winter} \quad (80)$$

4.5. Формулировка основной задачи

$$\begin{aligned}
 & \sum_{c=1}^C \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T y_{cot} c_{cot}^l + \sum_{c=1}^C \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T lo1_{cot} to_{co}^l c_{cot}^{base}/10 + \sum_{c=1}^C \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T lo2_{cot} to_{co}^l c_{cot}^{base}/10 \\
 & + \sum_{i=1}^I \rho o_i PenaltyI + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C extrao_{ct} PenaltyII \\
 & + \sum_{c=1}^C \sum_{o=1}^O \sum_{b=1}^I lo2_{cot} PenaltyIII + \sum_{t=1}^T \sum_{o=1}^O \sum_{a=1}^A c_{at}^u u_{oat} \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A c_{qt}^w w_{qat} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A c_{jt}^m m_{jat} + \sum_{a,o,j,f,t} c_{oja}^{mov} x_{fojat}^f \\
 & + \sum_{a,o,q,f,t} c_{oqa}^{mov} x_{foqat}^f + \sum_{a,q,j,f,t} c_{qja}^{mov} x_{fqjat}^o + \sum_{a,q,w,f,t} c_{qwa}^{mov} x_{fqwat}^o \rightarrow \min
 \end{aligned} \tag{81}$$

Первый элемент отображает стоимость привлечения подрядчиков на заготовку, учитываются различные стоимости в зависимости от среднего размера хлыста, расстояния трелевки и планируемых сортиментов. Второй и третий элемент отображает стоимость транспортировки водителей с базы. Четвертый - штраф за лесосеку в резерве (лесосеку на которой не проводится лесохозяйственное мероприятие). Пятый - штраф за дни комплекса в работе сверх нормы. Шестой - штраф за заготовку в два периода. Седьмой, восьмой и девятый - стоимости хранения на верхних складах лесосек o , на складах q и во дворах потребителей j . Связанные со свежестью сортиментов, стоимостью погрузочно-разгрузочных работ, стоимостью инвенторизации и др. Десятый, одиннадцатый, двенадцатый и тринадцатый прямые затраты на перевозку, дифференцированные по лесовозам, сортиментам, расстоянию вывозки и включающие стоимость погрузочно-разгрузочных работ, если они выполняются гидроманипулятором лесовозного автопоезда.

Для поиска решений напрямую с помощью коммерческих решателей за адекватное время (около одного часа) модель была представлена в иерархическом виде, с использованием подхода ожидания. В ограничение "Не более планируемого числа дней в работе" включен элемент $\sum_{o=1}^O y_{o_{cot}} * 1[day]$ отображающий ожидаемое число дней на перемещение между делянками. Ограничение по производительности лесовозного флота используется для отображения ожидаемой перевозки лесовозными автопоездами.

4.6. Формулировка дополнительной задачи минимизации стоимости маршрутизации комплексов

Стоимость перемещение комплексов с лесосеки на лесосеку.

$$Z_{moving} = \sum_{c=1}^C \sum_{o=1}^O \sum_{ob=1}^O x_{coob} c_{coob}^m \tag{82}$$

$$Z_{moving} \rightarrow \min \tag{83}$$

4.7. Формулировка дополнительной задачи минимизации стоимости маршрутизации комплексов

Стоимость транспортировки лесоматериалов лесовозными автопоездами.

$$+ \sum_{f,o,j,r,a,t \in T^{winter}} \Pi_{fojrat} t_{fojrat}^{mov} C_{fojr}^{truck} + \sum_{f,o,q,r,a,t \in T^{winter}} \Pi_{foqra} t_{foqrat}^{mov} C_{foqr}^{truck} + \sum_{f,q,j,r,a,t \in T^{winter}} \Pi_{fqjra} t_{fqjrat}^{mov} C_{fqjr}^{truck} \quad (84)$$

$$+ \sum_{f,q,w,r,a,t \in T^{winter}} \Pi_{fqwra} t_{fqwrat}^{mov} C_{fqwr}^{truck} = Z_{transportationsummer} \quad (85)$$

$$\sum_{f,o,j,r,a,t \in T^{winter}} \Pi_{fojra}^{winter} t_{fojrat}^{mov} C_{fojr}^{truck} + \sum_{f,o,q,r,a,t \in T^{winter}} \Pi_{foqra}^{winter} t_{foqrat}^{mov} C_{foqr}^{truck} + \sum_{f,q,j,r,a,t \in T^{winter}} \Pi_{fqjra}^{winter} t_{fqjrat}^{mov} C_{fqjr}^{truck} + \sum_{f,q,w,r,a,t \in T^{winter}} \Pi_{fqwra}^{winter} t_{fqwrat}^{mov} C_{fqwr}^{truck} = Z_{transportationwinter}$$

$$Z_{transportationsummer} + Z_{transportationwinter} = Z_{transportation} \quad (86)$$

Штраф за вывозку в выходные и праздничные дни.

$$Z_{extradaysr} = \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R extra_{rt} PenaltyIV \quad (87)$$

Штраф за не вывезенные лесоматериалы.

$$Z_{untransported} = \left(\sum_{f,o,j,a,t} V_{fojat}^{untransported} + \sum_{f,o,q,a,t} V_{foqat}^{untransported} + \sum_{f,q,j,a,t} V_{fqjat}^{untransported} + \sum_{f,q,w,a,t} V_{fqwat}^{untransported} \right) PenaltyV$$

$$Z_{transportation} + Z_{extradaysr} + Z_{untransported} \rightarrow \min \quad (89)$$

5. Вычислительный эксперимент

Модель реализована в системе математического моделирования AIMMS v4.20, решения находились напрямую с помощью коммерческого решателя CPLEX v12.6.3. Для расчетов использовался моноблок ASUS ET2231IUK-B002R.

Эксперимент проведен по данным за 2015 год участка арендной базы крупнейшего лесозаготовителя в Ленинградской Области – ООО “Мется Форест Подпорожье”. Рассматривалось Важинское направление включающее: 59 лесосек с максимум 9 сортаментами, 1 потребитель, 9 промежуточных, 2 зимних склада, 2 терминала и 1 порт, 8

лесозаготовительных комплексов, 50 дорог, 12 периодов планирования, 20 лесовозов, разбитых на 3 класса из которых 6 приписаны к Важинскому направлению. Общий объем заготовки составил 192000 м³. Объемы заготовки превышают объемы потребления 26747 м³.

Для сравнения адекватности получаемых решений были сгруппированы данные по вывозке отдельно по подрядчикам и собственным лесовозам исходя из расстояния перемещения и типа сортимента в соответствии с тарифами были определены прямые затраты на вывозку включая погрузку и разгрузку (551000 евро). Сравнение проводилось только по прямым транспортным затратам. Дополнительно сравнивались объемы хранения, грузопотоки, маршруты вывозки и общая реалистичность полученных решений.

Были рассмотрены четыре сценария (далее кейс):

1. 5 комплексов на заготовке, готовая выработка на комплекс – 38000 м³, Важинские лесовозы, минимальный объем отгрузки по ж/д – 2500 м³, водным транспортом – 4000 м³,

2. 8 комплексов на заготовке, готовая выработка на комплекс – 24000 м³, Важинские лесовозы, минимальный объем отгрузки по ж/д – 2500 м³, водным транспортом – 4000 м³, основной вариант объемы хранения на промежуточных, сезонных складах минимальны, не учитывая одинаковые во всех сценариях объемы хранения пиловочника елового на зимнем складе.

3. 8 комплексов на заготовке, готовая выработка на комплекс – 24000 м³, Важинские лесовозы, минимальный объем отгрузки по ж/д – 5000 м³, водным транспортом – 4000 м³, увеличенные по сравнению с первым и вторым кейсами объемы хранения на промежуточных, сезонных складах

4. “Идеальный кейс”: объемы отправок по ж/д и водным транспортом – без ограничений, 8 комплексов на заготовке, готовая выработка на комплекс – 24000 м³.

В табл. 1. приведены размерности кейсов и значение целевой функции. Во всех случаях время расчёта основной проблемы составило менее одного часа. Расхождение от оптимальности было задано - 6%.

Таблица 1. Размерности рассмотренных кейсов и значение целевой функции.

Кейс	1	2	3	4
Ограничения	132611	138122	138122	137961
Переменные	131320	144644	144644	144484
Булевы переменные	23013	36447	36447	36267
Расхождение от оптимальности, %	5,27	5,76	5,94	2,41
Время расчета, с	3020,2	3115,33	3268,34	22,45
Значение целевой функции, euro	3027393	2826429	2957438	2692870

В табл. 2. Приведено сравнение кейсов по фактору прямых транспортных затрат.

Таблица 2. Сравнение прямых транспортных затрат.

Кейс	Значение прямых транспортных расходов, euro	Отличие от факта, %
1	505900	8,19
2	506055	8,16
3	507406	7,9
4	483000	12,3

Сокращение прямых транспортных затрат связано с более оптимальным распределением сортиментов по потребителям (с каких лесосек на какие пункты спроса вести какие сортименты).

Возможность вывозки с использованием лишь Важинских лесовозов связана с завышенными (нормативными) по сравнению с реальными скоростями движения по категориям дорог, работе в две смены в течении всего года, отсутствии в модели простоев, связанных с ремонтом.

6. Заключение

В работе была представлена оптимизационная математическая модели ежемесячного планирования лесных грузопотоков, которая помимо классических решений одновременно учитывает детальную характеристику элементов лесной дорожной сети и их максимальный грузооборот, и решения по использованию лесовозного флота. Модель сформулирована как иерархическая, в которой на втором этапе находится график движения комплексов между делянками и потребное число дней в работе по классам лесовозов за период для осуществления перевозки.

Модель представлена в формулировке смешанного целочисленного линейного программирования и реализована в системе математического моделирования AIMMS, решения находились напрямую с помощью коммерческого решателя CPLEX v12.6.3. Вычислительный результат проводился по данным, предоставленным ООО “Мется Форест Подпорожье”. Для участка арендной базы с 59 лесосеками и общим объемом заготовки в 192000 м³ время расчета с заданным расхождением от оптимальности в 6% составило 1-60 минут в зависимости от рассматриваемого кейса.

Возможности для улучшения модели: учет порядка заготовки лесосек, примыкающих к одной дороге; определение оптимального числа комплексов для заготовки лесосеки; учет различных типов комплексов (по классу и производительности); более детальное влияние нулевого пробега на производительность, в настоящее время учитывается через коэффициент использования рабочего времени; создание набора возможных рейсов с последующим определением числа повторений по классам лесовозов в сутки; более детальное определение скоростей по классам дорог в порожнем и грузовом направлениях по сезонам; равномерность распределения лесовозной работы между классами лесовозов; более детальное планирование ж/д и водного транспорта (объемы, стоимости, ограничения); учет косвенных затрат на технику (ремонт, ГСМ, ЗП и др.) при планировании вывозки и заготовки.

Благодарности

Авторы благодарят компанию Aimms B.V за предоставление академической лицензии к системе моделирования AIMMS (Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software). Авторы благодарят компанию ООО “Мется Форест Подпорожье” и лично Шорохова А.А. за предоставленную информацию.

Литература

1. Beaudoin, D., LeBel, L., Frayret, J. 2007. Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Canadian Journal Of Forest Research*. 37(1): 128-140.
2. Bredstroom, D., Jonssona, P., Ronnqvist, M. 2010. Annual planning of harvesting resources in the forest industry. *Intl. Trans. in Op. Res.*, 17: 155-177.

3. D'Amours, S., Ronnqvist, M., Weintraub, A. 2008. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. *INFOR*, 46(4): 47-64.
4. Dems, A., Rousseau, L.-M., Frayret, J.-M. 2016. A hybrid constraint programming approach to a wood procurement problem with bucking decisions. *Constraints*, 21(2): 303-317.
5. Dems, A., Rousseau, L.-M., Frayret, J.-M. 2014. Annual timber procurement planning with bucking decisions. Technical Report CIRRELT-2014-20: CIRRELT.
6. Epstein, R., Nieto, E., Weintraub, A., Chevalier, P., Gabarro, J. 1999. A system for the design of short term harvesting strategy. *European Journal Of Operational Research*. 119(2): 427-439.
7. Karlsson, J., Ronnqvist, M., Bergstrom J. 2004. An optimization model for annual harvest planning. *Canadian Journal of Forest Research* 34(8): 1747-1754.
8. Mitchell S.A. 2004. Operational forest harvest scheduling optimisation: A mathematical model and solution strategy. PhD thesis. University of Auckland. Auckland. 252 pp.
9. Rix, G., Rousseau, L.-M., Pesant, G. 2014. A Transportation-Driven Approach to Annual Harvest Planning. Technical Report CIRRELT-2014-24: CIRRELT.
10. Rönnqvist, M., D'Amours, S., Weintraub, A., Jofre, A., Gunn, E., Haight, R., Martell, D., Murray, A., Romero, C. 2015. Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. *Annals Of Operations Research*. 232(1): 11-40.
11. Коваленко Т.В. 2005. Рациональная организация лесных грузопотоков при освоении годового лесосечного фонда лесозаготовительного предприятия. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербургская Государственная Лесотехническая Академия.
12. Соколов А.П. 2016. Обоснование технологий и параметров процессов комплексного освоения лесосырьевых баз на основе логистического подхода. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Петрозаводский Государственный Университет.

References

1. Beaudoin, D., LeBel, L., Frayret, J. 2007. Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Canadian Journal Of Forest Research*. 37(1): 128-140.
2. Bredstrom, D., Jonssona, P., Ronnqvist, M. 2010. Annual planning of harvesting resources in the forest industry. *Intl. Trans. in Op. Res.*, 17: 155-177.
3. D'Amours, S., Ronnqvist, M., Weintraub, A. 2008. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. *INFOR*, 46(4): 47-64.
4. Dems, A., Rousseau, L.-M., Frayret, J.-M. 2016. A hybrid constraint programming approach to a wood procurement problem with bucking decisions. *Constraints*, 21(2): 303-317.
5. Dems, A., Rousseau, L.-M., Frayret, J.-M. 2014. Annual timber procurement planning with bucking decisions. Technical Report CIRRELT-2014-20: CIRRELT.
6. Epstein, R., Nieto, E., Weintraub, A., Chevalier, P., Gabarro, J. 1999. A system for the design of short term harvesting strategy. *European Journal Of Operational Research*. 119(2): 427-439.
7. Karlsson, J., Ronnqvist, M., Bergstrom J. 2004. An optimization model for annual harvest planning. *Canadian Journal of Forest Research* 34(8): 1747-1754.
8. Mitchell S.A. 2004. Operational forest harvest scheduling optimisation: A mathematical model and solution strategy. PhD thesis. University of Auckland. Auckland. 252 pp.
9. Rix, G., Rousseau, L.-M., Pesant, G. 2014. A Transportation-Driven Approach to Annual Harvest Planning. Technical Report CIRRELT-2014-24: CIRRELT.

10. Rönnqvist, M., D'Amours, S., Weintraub, A., Jofre, A., Gunn, E., Haight, R., Martell, D., Murray, A., Romero, C. 2015. Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. *Annals Of Operations Research*. 232(1): 11-40.
11. Kovalenko T.V. 2005. Racionalnaya organizaciya lesnyh gruzopotokov pri osvoenii godovogo lesosechnogo fonda lesozagotovitel'nogo predpriyatiya. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Sankt-Peterburgskaya Gosudarstvennaya Lesotekhnicheskaya Akademiya.
12. Sokolov A.P. 2016. Obosnovanie tekhnologij i parametrov processov kompleksnogo osvoeniya lesosyrevykh baz na osnove logisticheskogo podhoda. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Petrozavodskij Gosudarstvennyj Universitet.

© 2016 Симоненков М.В., Салминен Э.О., Бачериков И.В.