

УДК 630\*658.5

UDC 630\*658.5

**МЕТОДИКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПЛАНОВ<sup>1</sup>**

**METHODOLOGY OF DECISION-MAKING FOR WOOD HARVESTING OPTIMIZATION**

Соколов Антон Павлович  
к. т. н., доцент  
*Петрозаводский государственный университет,  
Петрозаводск, Россия*

Sokolov Anton Pavlovich  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
*Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia*

Герасимов Юрий Юрьевич  
д. т. н., профессор  
*Научно-исследовательский институт леса Финляндии, Йоэнсуу, Финляндия*

Gerasimov Yury Yurievich  
Dr.Sci.Tech., professor  
*Finnish Forest Research Institute, Joensuu, Finland*

В статье приводится описание разработанной методики синтеза оптимального лесозаготовительного плана, а также алгоритма его программной реализации в составе компьютерной информационно-вычислительной системы лесозаготовительной логистики

The article describes the methodology of decision-making for optimization of wood harvesting plans. The methodology has been realized as a corresponding component of the Computer Information System developed for forestry logistics

Ключевые слова: ЛЕСОЗАГОТОВКИ, ЛОГИСТИКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЛЕСОСЕЧНЫЕ МАШИНЫ

Keywords: WOOD HARVESTING, LOGISTICS, MATHEMATICAL PROGRAMMING, SIMULATION, WOOD HARVESTING MACHINERY

**Введение**

Решение задач логистики является одной из насущных проблем, с которой в своей деятельности сталкивается подавляющее большинство промышленных предприятий в любой отрасли. В этом смысле не является исключением и лесозаготовительная отрасль. Здесь значение вопросов логистики за последнее время существенно возросло. Во многом это связано с внедрением на значительном числе лесозаготовительных предприятий России новой высокопроизводительной техники с одновременным ростом доли использования сортиментной технологии заготовки [1, 2].

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», тема НИР «Система поддержки принятия решений по стимулированию рационального использования древесной биомассы и отходов лесозаготовок в биоэнергетике» и в рамках проекта «Лесозаготовки и логистика в России», финансируемого Европейским союзом через агентство по развитию технологий и инноваций Финляндии (TEKES)

Для обеспечения эффективного решения целого ряда таких задач была разработана компьютерная информационно-вычислительная система лесной логистики, использующая ГИС-технологии в качестве базы для своего построения. Описание системы, ее интерфейс, решаемые задачи, а также применяемые методы и алгоритмы подробно описаны в работах [1-5]. Здесь приведем только список основных функций разработанной системы:

1. На оперативном уровне:
  - а. Определение оптимальных маршрутов движения автомобилей-сортиментовозов.
  - б. Составление оптимальных сменных транспортных планов для каждого автомобиля с указанием для каждого рейса мест погрузки и разгрузки, характеристик перевозимой продукции (сортиментов или древесины для нужд биоэнергетики), времени прибытия в пункты и убытия из них и т. д.
2. На тактическом уровне:
  - а. Обоснование потребных мощностей на заготовке древесины.
  - б. Обоснование потребных мощностей на вывозке древесины.
  - в. Составление оптимальных планов на заготовке и вывозке топливной древесины для нужд биоэнергетики.
3. На стратегическом уровне:
  - а. Обоснование комплексных технических и технологических решений, связанных с эксплуатацией лесосырьевых баз (вопросы выбора технологий заготовки, транспортировки, строительства дорог, использования промежуточных складов и т. д.).

Система состоит из ряда блоков и подпрограмм. Одним из основных блоков является блок имитационного моделирования процессов заготовки древесины. Для работы этого блока, в числе прочего, должен быть задан состав делянок, планируемых в рубку, и порядок их освоения лесозагото-

вительными комплексами. Здесь под лесозаготовительным комплексом подразумевается система лесосечных машин, работающая на делянке, например, харвестер – форвардер или валочно-пакетирующая машина – скиддер – процессор и т. п. До модернизации системы лесной логистики состав и порядок делянок задавался пользователем вручную в специальном диалоге (рис. 1).

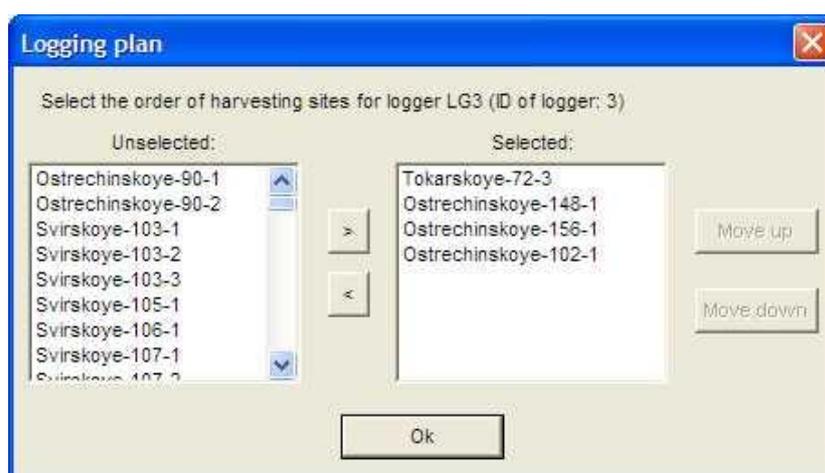


Рис. 1. Диалог задания состава делянок и порядка их освоения лесозаготовительным комплексом

При решении задач оперативного уровня, особых проблем с этим не возникает, т. к. приходится иметь дело с небольшим числом делянок, состав которых и порядок освоения, как правило, уже точно известны, т. к. на части из них заготовка уже ведется, а на остальных начнется в ближайшее время в соответствии с текущим планом освоения делянок, который формируется в соответствующих подразделениях лесозаготовительного предприятия. Таким образом, задача заключается лишь во вводе этого плана, т. е. состава делянок и порядка их освоения, в систему.

Совсем по-другому дело обстоит при необходимости решения задач тактического и стратегического уровня. Тут мы сталкиваемся с необходимостью ввода достаточно большого числа делянок (иногда более сотни)

для обеспечения моделирования лесозаготовок в течение нескольких месяцев и вплоть до одного года. При этом список потенциальных делянок известен, т. к. он заранее формируется и согласуется с органами лесного хозяйства. Этого нельзя сказать о порядке их освоения. Поэтому правильное распределение делянок на длительные периоды становится достаточно сложной и трудоемкой задачей ввиду многочисленности факторов, требующих своего учета.

Эта задача еще более усложняется ввиду ярко выраженного сезонного характера лесозаготовительных работ, что приводит к неравномерности объемов заготовки в течение года. Пик заготовок, как правило, приходится на зимний период. Наибольший спад вплоть до полной остановки наблюдается весной, преимущественно в апреле-мае. Таким образом, и число привлекаемых заготовительных комплексов отличается в различные периоды. Степень влияния сезонов не одинакова для разных предприятий и зависит в основном от почвенно-грунтовых условий на делянках, наличия и состояния лесных дорог, используемых лесосечных машин. Поэтому возникает необходимость подразделения делянок на две категории. В первую из них включаются делянки, доступные для освоения вне зависимости от сезона (всесезонные), во вторую – делянки, доступные только в зимнее время (зимние).

Данная статья посвящена описанию методики и алгоритма решения задачи обоснования порядка освоения делянок и распределения их между заготовительными комплексами, который был реализован в последней версии компьютерной информационно-вычислительной системы лесной логистики.

## **Постановка задачи**

Задача обоснования порядка освоения делянок и распределения их между заготовительными комплексами может быть решена как оптимизационная. В этом случае формулировка задачи выглядит следующим образом:

Пусть имеется  $N$  делянок потенциальных для проведения лесозаготовок и  $M$  лесозаготовительных комплексов. Для каждой делянки определено местоположение и привязка к дорожной сети, известны породный состав древостоя, запас древесины по породам, выход каждого вида продукции для каждой породы (сортиментов и древесины для нужд биоэнергетики), а также задан тип делянки: «всесезонная» или «зимняя». Для каждого комплекса известна средняя производительность для данных природно-производственных условий. Кроме того, задан расчетный период, известны среднерыночные цены франко-завод на все виды получаемой на делянках продукции, расстояние и средняя скорость перемещения комплексов между любой парой делянок. Задача заключается в определении состава делянок, назначаемых в рубку, распределении их между комплексами и задании порядка их освоения так, чтобы добиться оптимального значения заданного критерия оптимальности.

## **Метод решения**

Поставленная задача была решена путем модернизации ранее созданной компьютерной информационно-вычислительной системы лесной логистики. Структура модернизированной системы с введенным в нее новым блоком (выделен красным цветом) показана на рисунке 2.

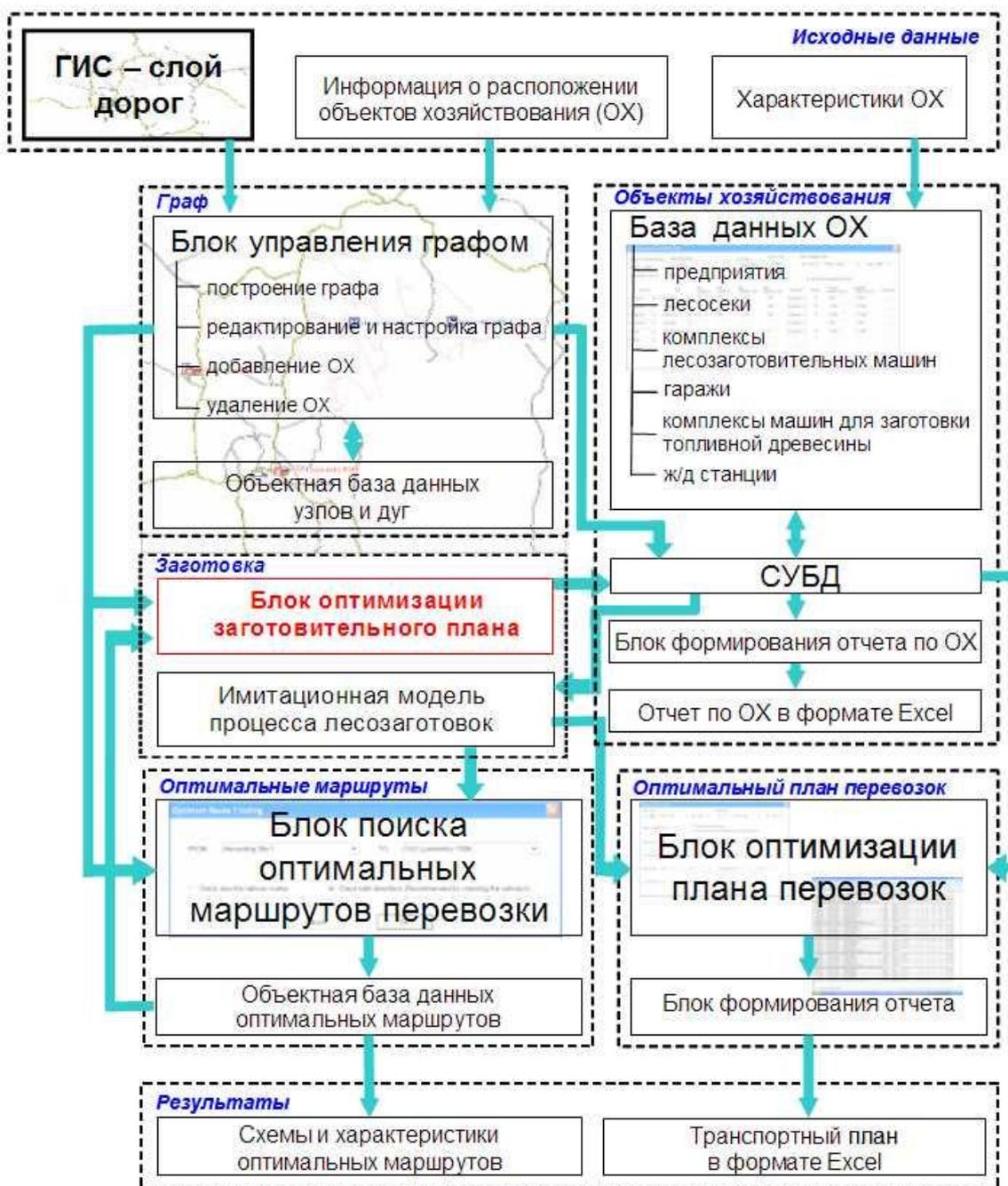


Рис. 2. Структура компьютерной информационно-вычислительной системы лесной логистики

Система позволяет задавать, хранить и обрабатывать всю необходимую информацию по делянкам и заготовительным комплексам. В системе имеется возможность рассчитывать производительность лесосечных машин (харвестеров и форвардеров) в зависимости от породного состава насаждений, среднего объема хлыста и среднего расстояния трелевки, нахо-

дальнейшим образом оптимизировать маршрут движения между делянками, расстояние, скорость и время движения, определять выход продукции по видам продукции. Перечисленные возможности используются для нужд решения поставленной задачи.

Прежде всего, необходимо определиться с критериями оптимальности. Чаще всего при решении производственных оптимизационных задач используются критерии экономического характера. В нашем случае это осуществлено путем расчета доходности освоения каждой потенциальной делянки с дальнейшим включением в план тех из них, для которых сумма доходностей будет наибольшей при заданных ограничениях по производительности используемых комплексов, сезонных ограничениях и заданном расчетном периоде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m V_{ij} h_{jk} C_{jk} \rightarrow \max; \\ \sum_{i=1}^N x_i \sum_{j=1}^n V_{ij} \leq T \sum_{r=1}^M P_r; \\ x_i = 0, \text{ при } s_i \neq S; i = 1, 2, \dots, N; \\ x_i \in \{0, 1\}; i = 1, 2, \dots, N, \end{cases} \quad (1)$$

где  $N$  – общее число рассматриваемых делянок,

$x_i$  – управляемые переменные, принимающие значение 1, если  $i$ -я делянка включается в заготовительный план, и 0 – в противном случае;

$n$  – число рассматриваемых пород деревьев;

$m$  – число видов продукции получаемых на делянках;

$V_{ij}$  – объем заготовки древесины  $j$ -й породы на  $i$ -й делянке;

$h_{jk}$  – средняя доля  $k$ -го вида продукции, получаемая из  $j$ -й породы;

$C_{jk}$  – прогнозируемая на расчетный период средняя цена франко-завод  $k$ -го вида продукции, получаемого из  $j$ -й породы;

$T$  – продолжительность расчетного периода;

$M$  – число рассматриваемых заготовительных комплексов;

$P_r$  – средняя производительность  $r$ -го заготовительного комплекса;

$s_i$  – сезонный фактор  $i$ -й делянки;

$S$  – сезонный фактор расчетного периода.

Если расчетный период содержит несколько сезонов, предлагается выполнять планирование заготовки последовательно, сначала для первого сезона, включив в рассмотрение только делянки, доступные в данном сезоне, затем для второго сезона и, если необходимо, для третьего. Продолжительность расчетного периода ограничивается одним годом, т. к. на практике необходимость детального планирования заготовок на большие периоды мало вероятна.

Таким способом можно определить состав делянок, включаемых в лесозаготовительный план, но это не позволяет определить порядок их освоения.

При известном составе делянок определить порядок их освоения можно минимизируя затраты на перемещение комплексов между делянками. В данном случае решаемая задача сводится к «задаче об  $n$  коммивояжерах». Здесь можно воспользоваться уже существующим в системе блоком определения оптимальных маршрутов перевозки и объектной базой данных этих маршрутов (см. рис. 2). Учитывая сделанное в блоке определения оптимальных маршрутов допущение, что транспортные затраты прямо пропорциональны времени движения, в качестве критерия оптимальности принято время движения от исходной точки к точке назначения. Оно определяется исходя из расстояний между этими точками по графу дорожной сети и средних скоростей движения для каждого участка дорог (ребер графа). Тогда постановка этой оптимизационной задачи будет выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \sum_{r=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{ijr} t_{ij} \rightarrow \min; \\ \frac{1}{P_r} \sum_{i=1}^N z_{ir} V_i \leq T; r = 1, 2, \dots, M; \\ z_{ir} = \begin{cases} 1, & \text{при } \sum_{j=1}^N (y_{ijr} + y_{jir}) > 0; \\ 0, & \text{при } \sum_{j=1}^N (y_{ijr} + y_{jir}) = 0 \end{cases}; i = 1, 2, \dots, N, r = 1, 2, \dots, M; \\ y_{ijr} \in \{0, 1\}; i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N, r = 1, 2, \dots, M; \\ \sum_{r=1}^M y_{ijr} = 1; i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N; \\ \sum_{r=1}^M z_{ir} = 1; i = 1, 2, \dots, N, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $y_{ijr}$  – управляемые переменные, принимающие значение 1, если в заготовительный план  $r$ -го комплекса включается перемещение с  $i$ -й делянки на  $j$ -ю, и 0 – в противном случае;

$t_{ij}$  – время перемещения с  $i$ -й делянки на  $j$ -ю;

$z_{ir}$  – управляемые переменные, принимающие значение 1, если в заготовительный план  $r$ -го комплекса включается освоение  $i$ -й делянки, и 0 – в противном случае;

$V_i$  – общий объем заготовки на  $i$ -й делянке.

Вообще существует несколько способов решения «задачи об  $n$  коммивояжерах». Например, хорошо зарекомендовал себя метод Кларка-Райта [6, 7]. В нашем случае этот метод применим только при условии, что производительность всех лесозаготовительных комплексов одинакова, т. е.  $P_r = const$  для всех  $r = 1, 2, \dots, M$ . Это существенно снижает достоверность получаемых результатов, т. к. на практике производительность разных комплексов может существенно отличаться [8, 9].

Для учета различий в производительности предлагается разбить задачу (2) на две взаимосвязанные оптимизационные задачи.

Сначала определяется порядок обхода всех делянок, включенных в заготовительный план после решения задачи (1) без привязки к конкретным лесозаготовительным комплексам. Эта задача сводится к классической «задаче коммивояжера». Решение «задачи коммивояжера» организовано с помощью алгоритма Прима для определения минимального остовного дерева [7, 10, 11] с введенным в него ограничением на число ребер, входящих в одну вершину.

На втором этапе определяется оптимальное распределение делянок по заготовительным комплексам с учетом их конкретной производительности. Т. к. число лесозаготовительных комплексов, одновременно работающих на среднестатистическом лесозаготовительном предприятии России, очень редко превышает 10, то оптимальное распределение делянок по комплексам можно организовать путем полного перебора всех возможных сочетаний с помощью одного из известных алгоритмов генерирования перестановок [12].

Обобщенный алгоритм работы блока оптимизации заготовительного плана, включающий в себя решение всех трех оптимизационных задач показан на рисунке 3. Здесь  $A_i$  – площадь  $i$ -й делянки.

### **Реализация**

Для реализации решения поставленной задачи с помощью языка программирования C++ был создан программный блок для компьютерной информационно-вычислительной системы лесной логистики.

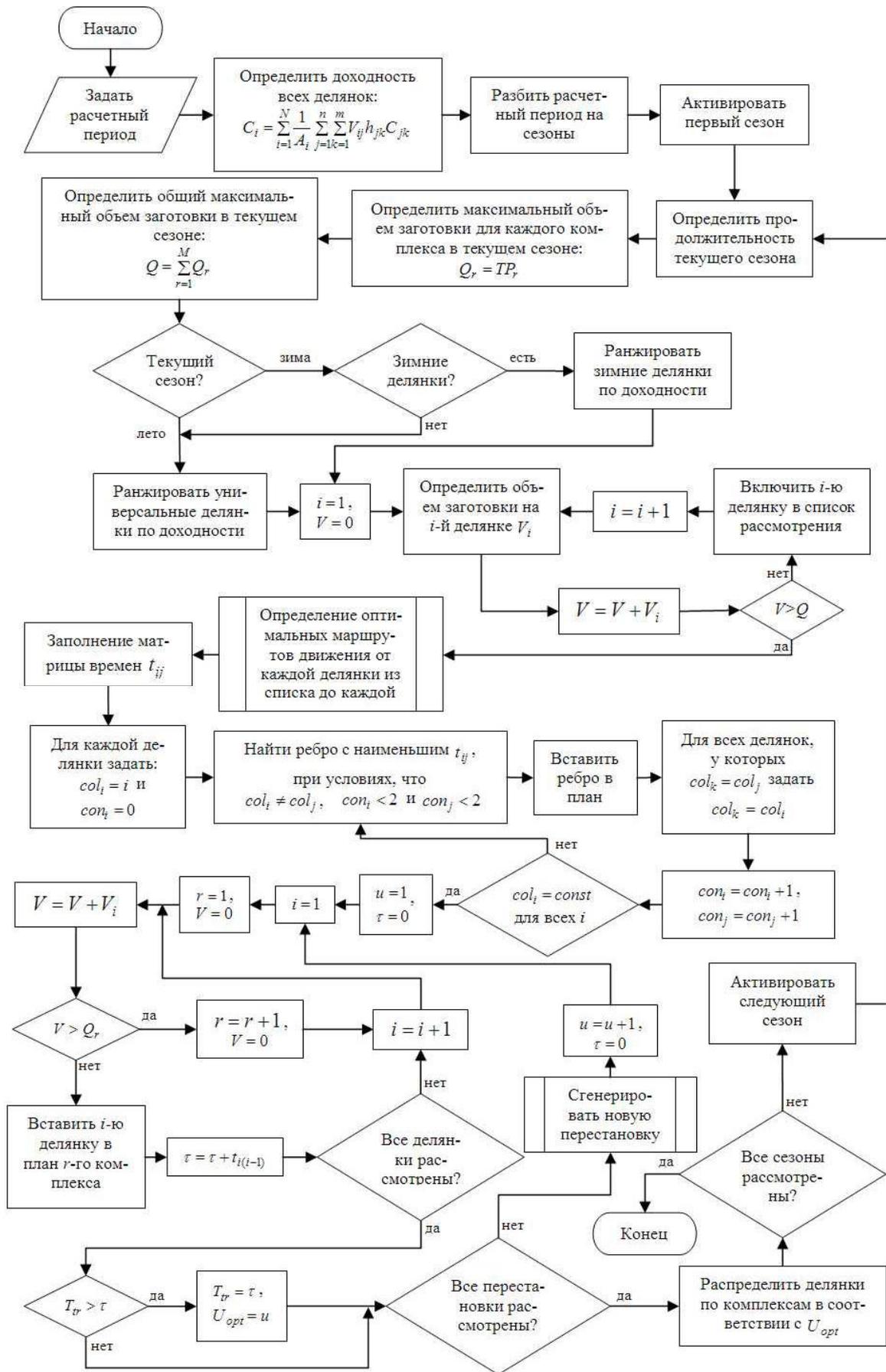


Рис. 3. Алгоритм работы блока оптимизации заготовительного плана

Для обеспечения функционирования блока были внесены изменения в некоторые диалоги интерфейса и в структуру базы данных делянок. В базу данных было внесено новое поле, в которое заносится сезонный фактор делянки. Для задания этого фактора в главный диалог ввода характеристик делянки (рис. 4) был добавлен соответствующий переключатель (обведен на рис. 4).

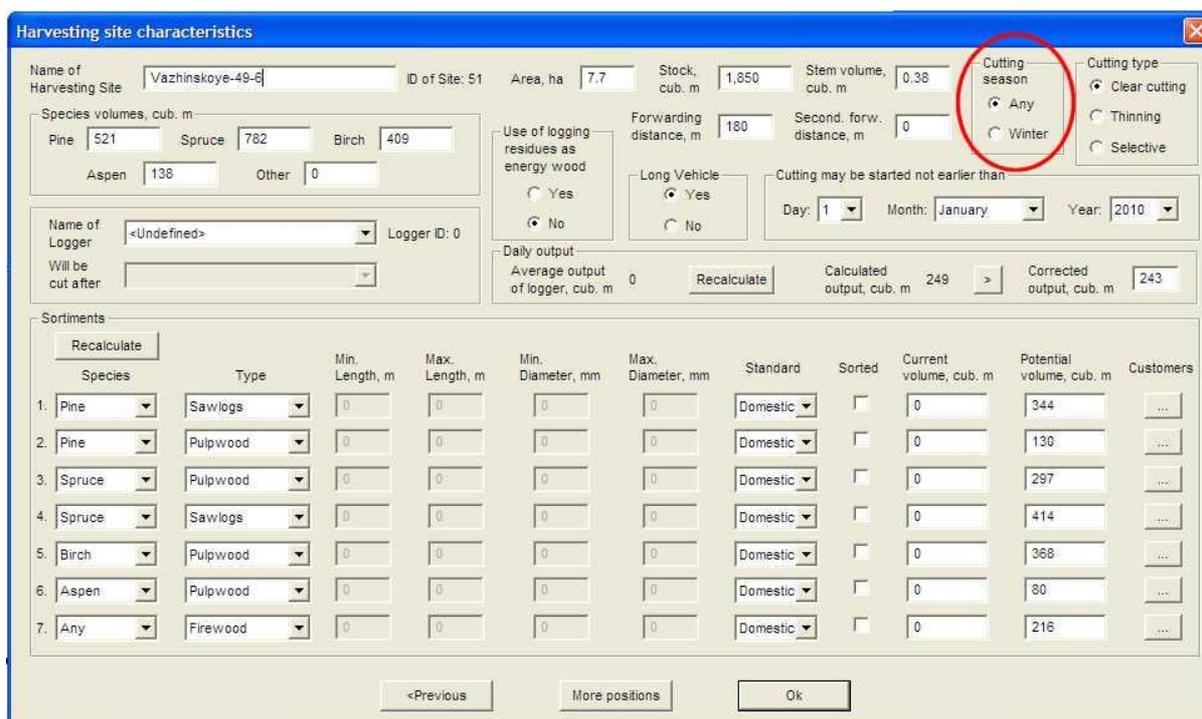


Рис. 4. Главный диалог ввода характеристик делянок

Кроме того, для расчета доходности делянок потребовался ввод среднерыночных цен франко-завод на продукцию лесозаготовок. Для этого были внесены изменения в диалог задания выхода различных типов сортиментов и отходов по породам: туда были добавлены поля для ввода цен (рис. 5).

В главный диалог ввода характеристик лесозаготовительных комплексов (рис. 6) был добавлен новый инструмент, запускающий работу блока оптимизации заготовительного плана (обведен на рис. 6).

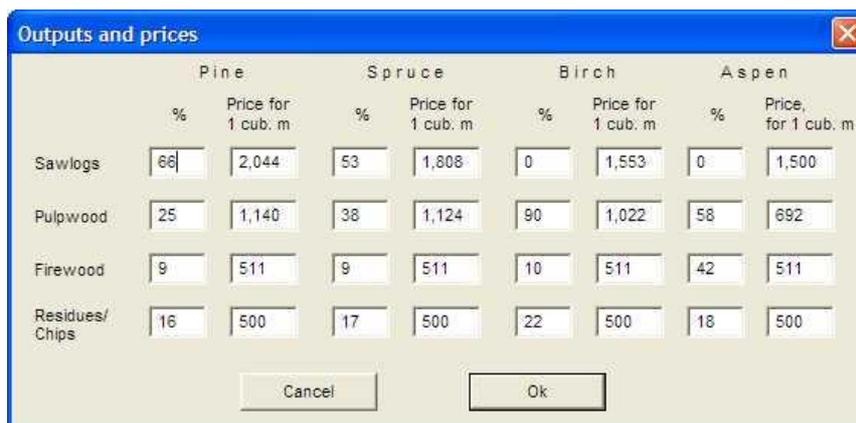


Рис. 5. Диалог ввода распределения сортиментов и цен

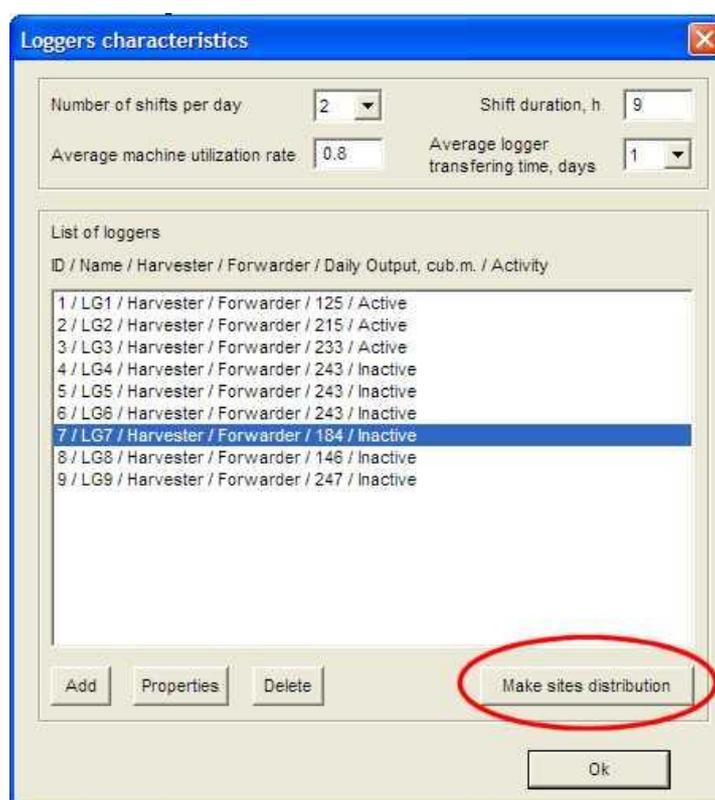


Рис. 6. Главный диалог ввода характеристик лесозаготовительных комплексов

После активизации этого инструмента, появляется вновь созданный диалог для ввода расчетного периода (рис. 7).

После ввода расчетного периода запускается блок оптимизации заготовительного плана. В результате его работы деланки, принятые к освоению в расчетном периоде, автоматически распределяются по заготови-

тельным комплексам в оптимальном порядке. Соответствующие изменения также автоматически вносятся в соответствующие базы данных и могут контролироваться пользователем в диалогах ввода характеристик делянок и лесозаготовительных комплексов.



Рис. 7. Диалог ввода расчетного периода

Работоспособность блока была проверена на примере одного из крупных лесозаготовительных предприятий северо-западного региона РФ. В результате проведенного тестирования алгоритм и программное обеспечение доказали свою эффективность. При этом фонд согласованных с органами лесного хозяйства делянок на рассматриваемом предприятии составлял 129 штук. На данном предприятии в зависимости от сезона одновременно работает от 3 до 9 лесозаготовительных комплексов. Тестирование проводилось для различного числа комплексов (от 1 до 9) и для различных расчетных периодов (от одного месяца до года), охватывающих от 1 до 3 сезонов. Например, при распределении делянок между 5-ю лесозаготовительными комплексами на полугодовой период, включающий два сезона, время работы алгоритма на персональном компьютере Intel Core 2 CPU 6300 1.86 GHz 1 Гб составило около 5 минут. При этом были назначены в рубку 88 делянок из 129 потенциальных. В ручном режиме на это потребовалось бы не менее одного рабочего дня.

Таким образом, по результатам выполненной работы можно сделать вывод, что разработанная методика и реализующий ее программный блок

позволяют достичь поставленной цели и автоматизировать синтез оптимальных лесозаготовительных планов с учетом особенностей конкретных лесных участков, лесозаготовительных комплексов и обслуживающих их операторов, наличия и состояния лесной дорожной сети, сезонных ограничений и т. д.

### Литература

1. Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П., Сюнёв В. С. Логистика лесозаготовок: программа поиска оптимального лесотранспортного плана // Лесная Россия, 2008. №5-6. С. 54-61.
2. 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.
3. 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 Петрозаводского государственного университета, 2009. №11 (105). С. 72-77.
4. Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П., Катаров В. К. Разработка системы оптимального проектирования сети лесовозных автомобильных дорог // Информационные технологии, 2011. № 1 (68). С. 39-43.
5. 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, Vol. 29, Issue 2. Zagreb: University of Zagreb, 2008. P. 163-175.
6. Clarke G., Right J. W. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points // Operations Research, 1963. Vol. 11. P. 568-581.
7. Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч. И., Ривест П. Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ, 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.
8. Gerasimov Y. Y., Sokolov A. P. Ergonomic characterization of harvesting work in Karelia // Croatian Journal of Forest Engineering, Vol. 30, Issue 2. Zagreb: University of Zagreb, 2009. P. 159-170.
9. Селиверстов А.А., Сюнёв В.С., Герасимов Ю.Ю., Соколов А. П. Повышение эффективности использования харвестеров // Системы. Методы. Технологии. БрГУ, г. Братск, 2010. №4 (8). С. 133-139.
10. Prim R. C. Shortest connection networks and some generalizations // Bell System Technical Journal, 1957. Vol. 36. P. 1389-1401.
11. Cheriton D., Tarjan R. E. Finding minimum spanning trees // SIAM Journal on Computing, 1976. Vol. 5 (Dec.). P. 724-741.
12. Липский В. Комбинаторика для программистов: Пер. с польск. М.: Мир, 1988. 213 с.