

Исследование направлений повышения эффективности автомобильного транспорта леса

А.М. Крупко

В условиях реформирования российской экономики эффективность использования лесных ресурсов оценивается исследователями как неудовлетворительная и существенно уступает зарубежной, а проводимые в лесном секторе преобразования далеки от прогрессивных и ориентированных на упрочение лесных богатств страны – они, зачастую, конъюнктурны, не системны и неудачно компилируют отдельные элементы зарубежной лесной политики [1], [2]. Для восстановления позиций российского лесопромышленного комплекса в мировой экономике и ухода от «сырьевой» ориентации экспорта требуются новые технологические и организационно-экономические исследования, важнейшую роль среди которых играют исследования в области автомобильного транспорта леса [3].

Вывозка леса лесовозными автопоездами – важнейшая часть производственного процесса лесозаготовок, во многом определяющая стоимость лесоматериалов и эффективность работы лесозаготовительных предприятия и варианты их связей с потребителями древесины. Затраты на транспорт составляют до 48 % от себестоимости ее заготовки. Доля автотранспорта в общем объеме вывозки древесины примерно 85 % и продолжает повышаться. Наряду с сохранением в нашей стране вывозки леса в хлыстах на нижние склады лесозаготовительных предприятия в настоящее время существенно возрастает объем транспортировки в сортиментах непосредственно с лесосек потребителям и на перерабатывающие предприятия [4], [5], [6].

Эффективность использования транспортных средств на вывозке леса может быть обеспечена только при рационально организованном процессе оперативного управления транспортом с использованием современных экономико-математических методов и информационных систем.

Математическое моделирование процессов управления в данный момент является одним из основных инструментов определения оптимальных параметров функционирования различных производственных систем. Модели, построенные на основании некоторых свойств исследуемого объекта, позволяют сделать вывод о дальнейшем развитии объекта и его составных подсистем, а также изменения его основных количественных характеристик. Методы и средства математического моделирования в сочетании с использованием современных компьютерных технологий позволяют весьма эффективно решать задачи эффективной организации материальных потоков и управления их деятельностью [7], [8].

Таким образом, применяя методы управления производством, учитывающие природно-климатические и почвенно-грунтовые условия, в которых работает предприятие, а также стратегию обновления, пополнения и ремонта парка машин, можно существенно повысить эффективность лесозаготовительного процесса, снизить затраты на выработку лесопродукции и увеличить рентабельность предприятия.

Целью диссертационной работы является снижение транспортных издержек на перевозку лесоматериалов между лесозаготовительными и лесоперерабатывающими предприятиями лесопромышленного региона на базе математического моделирования.

Разработана математическая модель управления производственными мощностями лесотранспортного предприятия, позволяющую предприятию получить максимальный доход от распределения инвестиций в заданный период времени.

Зависимость дохода предприятия в период t от его мощности зададим уравнением вида:

$$D_t(w_t) = \alpha_t \cdot w_t - \beta \cdot w_t^2 \quad (1)$$

где D_t - прибыль предприятия за период $t, t \in T$; w_t - мощность парка машин в период времени $t, t \in T$; α_t, β - коэффициенты зависимости дохода предприятия от мощности парка, учитывающие сезонный характер работ.

Учитывая амортизацию и инвестиции в период времени t , найдём выражение для мощности парка машин в период времени $t, t \in T$:

$$w_t = w_0 \cdot \rho^t + \sum_{i=1}^t I_i \cdot \rho^{t-i} \quad (2)$$

где w_t - мощность парка машин в период времени $t, t \in T$; I_t - инвестиции в начале периода t ; ρ^t - коэффициент амортизации парка лесовозных автомобилей.

Сформулируем задачу оптимального распределения инвестиций в заданный период времени, позволяющую предприятию получить максимальный доход:

$$\begin{cases} \sum_{t=0}^T D_t \rightarrow \max \\ \sum_{t=1}^T I_t = I_\Sigma \end{cases} \quad (3)$$

где I_Σ - суммарные инвестиции за весь период T .

Используя метод множителей Лагранжа, получаем оптимальное распределение инвестиций в различные периоды времени:

$$\begin{cases} I_1 = -w_0 \cdot \rho + \frac{\alpha_1}{2 \cdot \beta} + \frac{(1-\rho)}{2 \cdot \beta} \cdot (-\lambda) \\ I_2 = \frac{\alpha_2 - \rho \cdot \alpha_1}{2 \cdot \beta} + \frac{(1-\rho)^2}{2 \cdot \beta} \cdot (-\lambda) \\ \dots \\ I_{T-1} = \frac{\alpha_{T-1} - \rho \cdot \alpha_{T-2}}{2 \cdot \beta} + \frac{(1-\rho)^2}{2 \cdot \beta} \cdot (-\lambda) \\ I_T = \frac{\alpha_T - \rho \cdot \alpha_{T-1}}{2 \cdot \beta} + \frac{(1-\rho + \rho^2)}{2 \cdot \beta} \cdot (-\lambda) \end{cases}, \quad (4)$$

$$\text{где } -\lambda = \frac{2 \cdot \beta \cdot (I_\Sigma + w_0 \cdot \rho) - (1-\rho) \cdot \sum_{t=1}^{T-1} \alpha_t + \alpha_T}{(T-1) \cdot (1-\rho)^2 + 1}$$

Данная математическая модель учитывает сезонный характер работ, амортизацию парка лесовозных автомобилей, коэффициент которой изменяется с течением времени, а также разбиение парка машин на разные классы по маркам и возрастам.

Предложена математическая модель оптимизации парка машин лесозаготовительного предприятия, интегрированного в лесоперерабатывающий холдинг, позволяющая оптимизировать транспортные затраты путём минимизации порожнего пробега, учитывающая затраты на заготовку древесины в точках рубки при заданной

максимальной границе, штраф за недорубленную древесину, продажу другим потребителям, а также внешнюю закупку у других потребителей.

Таким образом, модель предполагает составление оптимального плана рубки для удовлетворения спроса потребителей с учётом транспортных затрат и ряда ограничений, сформулированных выше.

Для отражения экономических взаимоотношений между лесозаготовительными предприятиями и лесоперерабатывающими предприятиями строится матрица производственно-транспортных затрат, которая выглядит следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} A^1 & E & B^1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & S^1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & 0 & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ A^q & E^q & 0 & \dots & \dots & 0 & B^q & 0 & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 & S^q \\ E & E & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & D^1 & 0 & \dots & 0 & E^1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & D^q & 0 & \dots & 0 & E^q \end{pmatrix} \quad (5)$$

где $A^q = \begin{pmatrix} \alpha_{1q} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_{2q} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \alpha_{mq} \end{pmatrix}$ - матрица, показывающая затраты на заготовку

единицы продукции, $B^q = -E, q \in Q$ - матрица максимально допустимых объёмов продаж лесосырья, $D^q = E, q \in Q$ - матрица минимальных объёмов закупки лесосырья,

$S^q = \begin{pmatrix} -1 & \dots & -1 \\ 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, q \in Q$ - матрица транспортных затрат для пунктов производства.

Далее осуществляется переход от матрицы транспортно-производственных затрат к маршрутной матрице, столбцы которой являются множествами заранее сгенерированных ординарных, четных и нечетных маршрутов:

$$\begin{matrix} q=1 \\ q=2 \\ \dots \\ q=k \end{matrix} \left(\begin{array}{c|c|c} & & \\ \hline A_{single} & A_{odd} & A_{even} \\ \hline & & \end{array} \right) \quad (6)$$

где A_{single} - множество ординарных маршрутов (маршрутов, соединяющих один пункт производства и один пункт потребления); A_{odd} - множество нечётных маршрутов (маршрутов, соединяющих два пункта производства с двумя пунктами потребления, при этом осуществляя нечётное количество перевозок); A_{even} - множество чётных маршрутов (маршрутов, соединяющих два пункта производства с двумя пунктами потребления, при этом осуществляя чётное количество перевозок).

Для каждого типа маршрута опишем правила построения столбца маршрутной матрицы A . Ординарный маршрут ($r \in A_{single}$) характеризуется следующей спецификацией:

$$A_r = A_{i_1, j_1}^{s, q} [p] = \begin{cases} -s, & \text{для } \rho = i_1 \\ +s, & \text{для } \rho = j_1 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

где S — количество повторений циклов типа:

$$(i_1, j_1) \rightarrow (j_1, i_1); i_1, j_1 \in E_q, q \in Q$$

Для чётного маршрута $r \in A_{even}$ используем следующую спецификацию столбца маршрутной матрицы:

$$A_r = A_{i_1, j_1, i_2, j_2}^{s, q_1, q_2} [p] = \begin{cases} -s, & \text{для } \rho = i_1, i_2 \\ +s, & \text{для } \rho = j_1, j_2 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (8)$$

где S — количество повторений циклов типа

$$(i_1, j_1) \rightarrow (j_1, i_2) \rightarrow (i_2, j_2) \rightarrow (j_2, i_1); \\ i_1, j_1 \in E_{q_1}, i_2, j_2 \in E_{q_2}, q_1, q_2 \in Q, q_1 \neq q_2$$

Для нечётного маршрута $r \in A_{odd}$ столбцы матрицы выглядят следующим образом:

$$A_r = A_{i_1, j_1, i_2, j_2}^{s, q_1, q_2} [p] = \begin{cases} -s, & \text{для } \rho = i_1 \\ -s + 1, & \text{для } \rho = i_2 \\ +s, & \text{для } \rho = j_1 \\ -s + 1, & \text{для } \rho = j_2 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (9)$$

где S — количество повторений циклов типа

$$(i_1, j_1) \rightarrow (j_1, i_2) \rightarrow (i_2, j_2) \rightarrow (j_2, i_1);$$

$$i_1, j_1 \in E_{q_1}, i_2, j_2 \in E_{q_2}, q_1, q_2 \in Q, q_1 \neq q_2.$$

Исходя из предложенной классификации маршрутов, вычисляем ряд их параметров, таких как длина, время передвижения лесовозного автомобиля и затраты на реализацию данного типа маршрута. Покажем параметры для нечетного маршрута (остальные параметры для других типов маршрутов вычисляются аналогичным образом)

Длина нечётного маршрута $r \in A_{odd}$ определяется следующим образом:

$$p(r) = l^0(0, i_1) + l^0(j_1, 0) + sl^{q_1}(i_1, j_1) + (s-1)l^{q_2}(i_2, j_2) + sl^0(j_1, i_2) + (s-1)l^0(j_2, i_1) \quad (10)$$

где $l^0(0, i_1)$ — длина дуги, соединяющей гараж с пунктом производства i_1 ; $l^0(j_1, 0)$ — длина дуги, которая связывает пункт потребления j_1 и гараж;

$l^{q_1}(i_1, j_1)$ — длина дуги, по которой осуществляется перевозка продукции вида q_1 от производителя i_1 к потребителю j_1 ; $l^{q_2}(i_2, j_2)$ — длина дуги, по которой осуществляется перевозка продукции вида q_2 от производителя i_2 к потребителю j_2 ; $l^0(j_1, i_2), l^0(j_2, i_1)$ — длины дуг, по которым осуществляется порожний пробег лесовозного автомобиля; s — количество перевозок.

Время передвижения лесовозного автомобиля по нечетному маршруту $r \in A_{odd}$ вычисляется по формуле:

$$\Theta(r) = t^0(0, i_1) + t^0(j_1, 0) + st^{q_1}(i_1, j_1) + (s-1)t^{q_2}(i_2, j_2) + st^0(j_1, i_2) + (s-1)t^0(j_2, i_1) \quad (11)$$

где $t^0(0, i_1)$ — время передвижения по дуге, которая соединяет гараж с пунктом производства i_1 , $t^0(j_1, 0)$ — время передвижения автомобиля из пункта потребления j_1 в гараж; $t^{q_1}(i_1, j_1)$ — время передвижения по дуге, связывающей производителя i_1 продукции вида q_1 с потребителем j_1 ; $t^{q_2}(i_2, j_2)$ — время передвижения лесовозного автомобиля из пункта производства i_2 продукции вида q_2 с потребителем j_2 ; $t^0(j_1, i_2), t^0(j_2, i_1)$ — время, затраченное на порожний пробег лесовозного автомобиля; s — количество перевозок.

Затраты на реализацию нечётного маршрута $r \in A_{odd}$ представляются следующим образом:

$$C(r) = c^0(0, i_1) + c^0(j_1, 0) + sc^{q_1}(i_1, j_1) + (s-1)c^{q_2}(i_2, j_2) + sc^0(j_1, i_2) + (s-1)c^0(j_2, i_1) \quad (12)$$

где $c^0(0, i_1)$ — затраты на передвижение по дуге, соединяющей гараж с пунктом производства i_1 , $c^0(j_1, 0)$ — затраты на передвижение автомобиля из пункта потребления j_1 в гараж; $c^{q_1}(i_1, j_1)$ — затраты на передвижение по дуге, связывающей

производителя продукции вида q_1 с потребителем j_1 ; $c^{q_2}(i_2, j_2)$ — затраты на передвижение лесовозного автомобиля из пункта производства i_2 продукции вида q_2 в пункт потребления j_2 ;

$c^0(j_1, i_2), t^0(j_2, i_1)$ — затраты на порожний пробег лесовозного автомобиля; s — количество перевозок.

Анализируя параметры маршрута можно сделать выводы о допустимости маршрута. Далее введём критерии допустимости маршрута, которые необходимы для определения оптимальности текущего решения. Зададим множество критериев допустимости маршрутов:

$$\Lambda = \{time, dist, cost\} \quad (13)$$

где $time$ — критерий времени движения по маршруту $r \in R$; $dist$ — критерий длины маршрута $r \in R$; $cost$ — критерий затрат на реализацию маршрута $r \in R$.

Критерии допустимости маршрута соответствуют определённым ранее параметрам маршрута. Для каждого типа маршрутов определим множество допустимых маршрутов. Множество допустимых ординарных маршрутов задаётся следующим образом:

$$\Omega_{single} = \{r \in R_{single} \mid x_\lambda(r) \leq b_r, \lambda \in \Lambda\}, \quad (14)$$

где $x_\lambda(r) \leq b_r$ — ограничение на реализацию ординарного маршрута $r \in A_{single}$ по критерию $\lambda \in \Lambda$. Аналогичным образом определяются множества допустимости четных и нечетных маршрутов.

Для нахождения оптимального маршрута перевозки продукции каждого вида необходимо определить функции цели, причём для каждого типа маршрутов целевые функции выглядят по-разному. Для ординарных маршрутов $r \in A_{single}$ функция цели примет вид:

$$Z_\lambda^q(r) = -x_\lambda(r) - s(v_{i_1}^q - v_{j_1}^q) \rightarrow \max \quad (15)$$

где $-x_\lambda(r)$ — ограничение, соответствующее критерию $\lambda \in \Lambda$; s — количество перевозок; q — вид продукции, $v_{i_1}^q, v_{j_1}^q$ — двойственные переменные задачи. Для нечётных маршрутов $r \in A_{odd}$ целевая функция определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_\lambda^{q_1, q_2}(r) = & -x_\lambda(r) - s(v_{i_1}^{q_1} - v_{j_1}^{q_1}) - (s-1)(v_{i_2}^{q_2} - v_{j_2}^{q_2}) - \\ & -s(v_{j_1}^{q_1} - v_{i_2}^{q_2}) - (s-1)(v_{j_2}^{q_2} - v_{i_1}^{q_1}) \rightarrow \max \end{aligned} \quad (16)$$

где $-x_\lambda(r)$ — ограничение, соответствующее критерию $\lambda \in \Lambda$; s — количество перевозок; q — вид продукции, $v_{i_1}^{q_1}, v_{j_1}^{q_1}, v_{i_2}^{q_2}, v_{j_2}^{q_2}$ — двойственные переменные задачи. Для чётных маршрутов $r \in A_{even}$ целевая функция задаётся следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_\lambda^{q_1, q_2}(r) = & -x_\lambda(r) - s(v_{i_1}^{q_1} - v_{j_1}^{q_1}) - (v_{i_2}^{q_2} - v_{j_2}^{q_2}) - \\ & - (v_{j_1}^{q_1} - v_{i_2}^{q_2}) - (v_{j_2}^{q_2} - v_{i_1}^{q_1}) \rightarrow \max \end{aligned} \quad (17)$$

где $x_\lambda(r)$ — ограничение, соответствующее критерию $\lambda \in \Lambda$; s — количество перевозок; q — вид продукции, $V_i^{q_1}, V_{j_1}^{q_1}, V_{i_2}^{q_2}, V_{j_2}^{q_2}$ — двойственные переменные задачи.

Таким образом, благодаря методу генерации маршрутов столбцов каждого типа возможен переход от громоздкой производственно-транспортной матрицы к матрице, состоящей из столбцов ординарных, четных и нечетных маршрутов. После чего возможно использование модифицированного симплексного метода, который приводит к решению производственно-транспортной задачи.

Разработана математическая модель генерации столбцов наиболее эффективных замкнутых маршрутов для перевозки лесоматериалов от лесозаготовительных предприятий к лесоперерабатывающим, оптимизирующая грузопотоки с помощью разбиения лесотранспортной сети на множество графов, в каждом из которых производится перевозка лишь одного вида продукции.

В данной модели маршрут u характеризуется списком, состоящим из пунктов рубки ($i \in U$), пунктов потребления ($j \in U$), вида лесосырья ($k \in K$), а также эффективностью и временем, затраченным на перевозку:

$$u \leftrightarrow (i, j, k) c_u, t_u; k \in K, c_u \in R, t_u \in R \quad (18)$$

Таким образом, множество всевозможных маршрутов U определяется следующим образом:

$$u \in U = \{ (i_u^r, j_u^r, k_u^r), c_u^r, t_u^r \}; k \in K, r \in N \quad (19)$$

Пусть x_u — количество транспортных средств, выполняющих работу по маршруту $u, u \in U$; β_i^k — максимальный объём производства продукции вида $k, k \in K$ в пункте производства i ; α_j^k — минимальный объём потребления продукции вида $k, k \in K$ в пункте потребления j . Тогда суммарный объём вывезенной из узла i продукции вида $k, k \in K$ не должен превышать максимального значения:

$$\sum_{u \in U} \{ c_u^r x_u / i_u^r = i, k_u^r = k \} \leq \beta_i^k \quad (20)$$

Объём ввезённой в узел j продукции вида $k, k \in K$ не должен превосходить минимально допустимый:

$$\sum_{u \in U} \{ c_u^r x_u / j_u^r = j, k_u^r = k \} \geq \alpha_j^k \quad (21)$$

Тогда задача генерации маршрутов примет вид:

$$\begin{cases} \frac{\sum_{u \in L} c_u x_u}{\sum_{u \in L} t_u x_u} \rightarrow \max \\ Ax = 0 \\ \sum_{u \in U} x_u = T \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

Транспортная сеть задачи, представленная графом $G = \langle V, E \rangle$, может быть разбита на множество транспортных сетей перевозок продукции:

$$\begin{aligned} G &= G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_k, G_q = \langle V, E_q \rangle, q \in 1..k \\ V &\rightarrow V_k = \{(k, i), i \in V\} \\ u \in G_k : u &= \{(k, i), (k, j)\} \end{aligned} \quad (23)$$

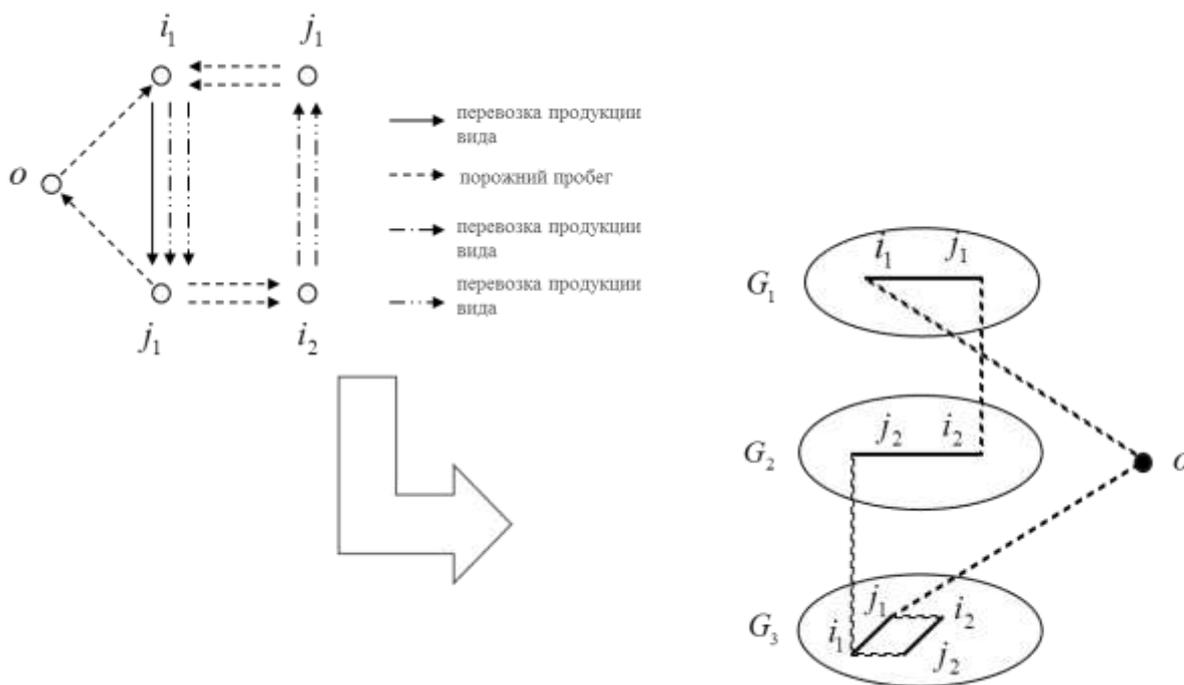


Рис.1 Маршрут перевозки продукции k_1, k_2, k_3 , изображенный в виде цилиндра.

Таким образом, оптимизация грузопотоков происходит с помощью разбиения лесотранспортной сети на множество графов, в каждом из которых рассматривается и производится перевозка лишь одного вида продукции.

В результате исследований разработаны и апробированы три взаимосвязанные математические модели, оптимизирующие процесс транспортировки лесоматериалов в рамках территориально распределённых лесозаготовительных и лесоперерабатывающих предприятий лесопромышленного региона:

- 1) математическая модель управления производственными мощностями лесотранспортного предприятия;

- 2) математическая модель оптимизации парка машин лесозаготовительного предприятия, интегрированного в лесоперерабатывающий холдинг;
- 3) математическая модель генерации столбцов наиболее эффективных замкнутых маршрутов для перевозки лесоматериалов от лесозаготовительных предприятий к лесоперерабатывающим.

Результаты исследований являются научной основой для принятия стратегических и тактических решений по формированию грузопотоков в лесопромышленном регионе. Разработанный программный комплекс, являющийся реализацией разработанных математических моделей по оптимизации перевозок лесоматериалов, применим для решения прикладных производственно-транспортных задач лесопромышленных предприятий, интегрированных в лесоперерабатывающий холдинг.

Литература:

- 1.Воронин А. В., Шегельман И. Р. Лесопромышленная интеграция: теория и практика. Петрозаводск, Изд-во ПетрГУ, 2009. 464 с.
- 2.Шегельман И. Р. К вопросу формирования отечественной технологической платформы развития лесного сектора России / И. Р. Шегельман, М. Н. Рудаков // Глобальный научный потенциал. – 2011. – № 9. – С. 104-107.
- 3.Вывозка леса автопоездами / И. Р. Шегельман, Скрыпник В. И., Кузнецов А. В., Пладов А. В.; СПб: ПРОФИКС, 2008. 304 с.
- 4.Моделирование движения лесовозных автопоездов на ПЭВМ / Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Пладов А. В., Кочанов А. Н., Кузнецов В. А.. Петрозаводск: ПетрГУ, 2003. 234 с.
- 5.Шегельман И. Р. Лесная промышленность и лесное хозяйство: Словарь / авт.-сост. И. Р. Шегельман. 5-е изд., перереб. и доп. Петрозаводск, Изд-во ПетрГУ, 2011. – 328 с.
- 6.Шегельман И. Р. Эффективная организация автомобильного транспорта леса: / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, А. В. Кузнецов. Петрозаводск, Изд-во ПетрГУ, 2007. 288 с.
- 7.Оптимизация в планировании и управлении предприятиями регионального лесопромышленного комплекса / Булатов А. Ф., Воронин А. В., Кузнецов В. А., Пладов В. А., Шегельман И. Р. Петрозаводск: ПетрГУ, 2001. 228 с.
- 8.Теория и практика принятия оптимальных решений для предприятий лесопромышленного комплекса/ А. В. Воронин, В. А. Кузнецов, И. Р. Шегельман, Л. В. Щеголева. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. – 180.