

УДК 630\*383

*Е.Г. Гладков<sup>1</sup>, О.Г. Плехов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>С.-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова

<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Гладков Евгений Георгиевич родился в 1944 г., окончил в 1969 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат технических наук, доцент кафедры сухопутного транспорта леса С.-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова. Имеет 3 монографии, более 50 научных и учебно-методических работ в области математического моделирования процессов и объектов лесного комплекса. E-mail: gladkov2807@yandex.ru



Плехов Олег Георгиевич родился в 1934 г., окончил в 1958 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет более 60 научных трудов в области промышленного транспорта. Тел.: 8-911-563-86-20



## **УСЫХАЮЩИЕ ЛЕСА: МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНОГО ЛЕСОУПРАВЛЕНИЯ\***

Разработана экономика-математическая модель для обоснования региональных планово-проектных решений освоения усыхающих лесов Архангельской области, позволяющая обосновать распределение инвестиций в элементы региональной структуры и обеспечивающая максимальную прибыль на рассматриваемых лесозаготовительных производствах за период планирования.

*Ключевые слова:* усыхающие леса, региональное лесопользование, математическая модель, лесотранспортная сеть, обоснование решений.

Проблема освоения усыхающих лесов Архангельской области имеет много аспектов. Комплексный взвешенный системный подход к ее решению в части транспортного освоения лесных массивов в современных условиях предполагает разработку математических инструментов, рассматривающих всю полноту экономических, производственных, лесоводственных, социальных и иных связей и ограничений. Методы обработки космических снимков

---

\*Исследования проведены в соответствии с планом-графиком работ по проекту «Создание высокотехнологичного производства щепы из сухостойной древесины для получения сульфатной целлюлозы», победившему в конкурсе на право получения субсидии для выполнения НИОКР на основании постановления Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г. (государственный контракт №13.G25/31/0036 от 07.09.2010 г. ОАО «Соломбальский ЦБК»).

©Гладков Е.Г., Плехов О.Г., 2013

лесных территорий в последние годы интенсивно разрабатываются в Институте информационных и космических технологий САФУ и позволяют выявить ареалы биологического повреждения и усыхания лесов на ранней стадии [1, 2]. Это дает возможность своевременно проектировать комплекс работ по освоению усыхающих еловых лесов с биоповреждениями.

Нами предложена экономико-математическая модель, предназначенная для обоснования управленческих решений по освоению территорий усыхающих лесов. Для детального решения производственно-транспортных проблем, связанных с переработкой вырубаемой древесины, могут использоваться иные модели, взаимосвязанные с предлагаемой [3, 4]. Детальная методика проектирования транспортной сети с использованием средств ГИС и оптимизационных моделей изложена в [3].

Модель предназначена для обоснования перспектив развития лесного региона в интервале планирования 3–4 года\*. Рассматривается следующая ситуация. В регионе заготавливается древесина различных категорий качества (порода и товарность) в лесном фонде, состоящем из площадей спелого и неспелого леса, а также закупается и продается древесина различного качества за пределами региона. Спелый лес вырубается в объеме, не превышающем объем расчетной лесосеки. В технологию интенсивного (плантационного) лесовыращивания на площадях неспелого леса могут быть сделаны дополнительные инвестиции к существующим на начало планирования. Полагается, что инвестиции вкладываются в технологии лесовыращивания, обеспечивающие на этих площадях гарантированное повышение среднего прироста с момента начала реализации вложений, что позволяет выполнить корректировку расчетной лесосеки. Отдача инвестиций в интенсивное лесовыращивание дифференцирована по лесным площадям. Помимо интенсивного (плантационного) лесовыращивания в регионе ведется лесовосстановление по традиционным экстенсивным технологиям, не позволяющим выполнить немедленный перерасчет объема лесопользования. Затраты на лесовосстановление дифференцированы по типам этих вырубок.

За пределами региона возможны закупки древесины из числа партий леса с известной ценой, качеством и ограниченным\*\*объемом для обеспечения спроса, превышающего объем расчетной лесосеки.

Полагается известным перечень лесных площадей, где выполняется специализированная охрана и защита леса. При этом объем вырубемого за

---

\*В современных условиях – это дальность до горизонта экономического планирования.

\*\*Речь идет о больших партиях леса. Полагается, что увеличение размера партии связано с вовлечением в рубку менее эффективных лесных площадей. Поэтому партию  $Y$  древесины можно купить по цене  $C$ , но партию  $Y_1 > Y$  можно купить по цене  $C_1 > C$ . В этой связи возможный объем каждой закупаемой партии обусловлен ее ценой и является ограниченным.

паса с охраняемой площади, ассоциируемой с  $i$ -м пунктом, описывается линейным уравнением вида

$$V = \begin{cases} V_0 + cW; \\ V \leq Q, \end{cases}$$

где  $V$  – вырубаемый запас;

$V_0$  – ожидаемый объем древесины, который может быть заготовлен без привлечения затрат на охрану и защиту леса;

$c$  – ожидаемый объем древесины, сохраняемый при выделении единицы затрат;

$W$  – затраты, выделяемые на охрану и защиту леса;

$Q$  – существующий ликвидный запас на рассматриваемой площади\*.

Совокупный вырубаемый лесной запас и ввозимый объем древесины потребляются в конечном множестве пунктов. Часть из них – это предприятия по его переработке и потреблению, остальные являются пунктами, через которые древесину экспортируют за пределы региона. Затраты перерабатывающих предприятий зависят от объемов переработки древесины и ее качества, а доходы определяются объемами переработки и договорными ценами на продукцию. Пункты потребления связаны с лесными площадями и пунктами ввоза древесины транспортной сетью, часть элементов которой построена, а часть задана избыточными связями, возможными к строительству. (На этом множестве существующих и возможных к строительству связей будет найден оптимальный план строительства и реконструкции дорог.) В транзитных пунктах сети возможна перегрузка древесины на иной вид транспорта, что сопряжено с затратами. Транспортная сеть требует затрат на содержание, ремонт, реконструкцию существующих и строительство новых элементов сети для обеспечения транспортной доступности вновь вовлекаемых в эксплуатацию лесных площадей.

Задан желаемый объем внутреннего и внешнего (на экспорт) потребления леса в регионе, дифференцированный по группам качества и который необходимо достичь в результате распределения инвестиций. Необходимо найти структуру и параметры лесозаготовительных производств региона, включая размещение, строительство и реконструкцию региональной транспортной сети и адекватное распределение инвестиций в элементы региональной структуры, обеспечивающее максимальную прибыль по рассматриваемому кругу лесозаготовительных производств за период планирования (ввоз, собственные заготовки древесины, охрана и защита леса, переработка и экспорт, внутрирегиональная транспортировка, содержание и реконструкция

---

\*Полагается, что без охраны и защиты с данной площади можно снять запас в размере лишь  $V_0$ , а при максимальном уровне охраны – не более существующего ликвидного запаса  $Q$ .

существующих и строительство новых дорог). Для формализации задачи введем следующие обозначения:

$I$  – список всевозможных пунктов на избыточной транспортной сети региона и список партий древесины, возможных для закупки за пределами региона;

$I_1 \in I$  – список пунктов сети, ассоциируемых с лесосеками главного и промежуточного пользования и транзитными пунктами;

$I_2 \in I$  – список пунктов потребления (включая экспорт древесины);

$I_3 \in I$  – список пунктов сети, ассоциируемых с площадями интенсивного (плантационного) лесовыращивания;

$I_4 \in I$  – список партий древесины, возможных к закупке за пределами региона; каждая партия этого списка характеризуется объемом, породой, товарностью и удельными затратами  $r_{ij}$  ( $i \in I_4, j \in J$ ) на закупку;

$I_5 \in I$  – список пунктов ввоза древесины в регион;

$I_6 \in I$  – список пунктов с охраняемыми лесными площадями;

$I_7 \in I$  – список пунктов сети, ассоциируемых с площадями традиционного лесовосстановления;

$J$  – список удельных затрат на закупку древесины, соответствующий закупаемым партиям;

$L$  – список рассматриваемых всевозможных транспортных связей избыточной транспортной сети региона;

$P$  – список категорий качества растущего леса (порода и товарность);

$[M_{il}]_p$  – матрица инцидентий графа связей избыточной транспортной сети ( $i \in I, l \in L; p \in P$ );

$V_{ip}$  – объем древесины  $p$ -й категории качества, сопоставляемый  $i$ -му пункту сети;

$r_{ip}$  – доходы (либо затраты) на обработку  $1 \text{ м}^3$  древесины, сопоставленного с  $i$ -м пунктом сети:  $i \in I_1$  – затраты на лесосечные работы либо затраты на перегрузку древесины на транзитном пункте;  $i \in I_2$  – доходы от обработки и продажи леса в конечном пункте сети;  $i \in I_4$  – затраты на закупку древесины из партий списка  $I_4$ ;

$a_l$  – суммарные удельные затраты на  $1 \text{ м}^3$  грузопотока древесины, перемещаемой по  $l$ -й ( $l \in L$ ) транспортной связи, включая, при необходимости, затраты на ее строительство или реконструкцию, содержание и собственно транспортировку;

$X_l$  – грузопоток по  $l$ -й транспортной связи ( $l \in L$ );

$z_{ip}$  – затраты на плантационное выращивание древесины  $p$ -го качества, сопоставленные  $i$ -му пункту ( $i \in I_3$ );

$e_i$  – затраты на традиционное лесовосстановление, сопоставленные единице площади  $i$ -го пункта ( $i \in I_7$ );

$S_i$  – площадь традиционного лесовосстановления, ассоциируемая с  $i$ -м пунктом ( $i \in I_7$ );

$q_i$  – запас ликвидной древесины, вырубаемый с единицы площади  $i$ -го пункта ( $i \in I_7$ );

$w_i$  – затраты на охрану и защиту леса, сопоставленные  $i$ -й площади ( $i \in I_6$ );

$V_{0i}$  – ожидаемый объем древесины на площадях, ассоциируемых с  $i$ -м пунктом, который может быть заготовлен без привлечения затрат на охрану и защиту леса;

$V_{ij\rho}$  – объем партии древесины  $\rho$ -й категории качества, купленной по  $j$ -й ( $j \in J$ ) цене за  $1 \text{ м}^3$  и ввозимой в регион через  $i$ -й пункт ( $i \in I_5$ );

$c_i$  – запас древесины на площадях, ассоциируемых с  $i$ -м пунктом ( $i \in I_6$ ), сохраняемый при выделении единицы затрат на охрану и защиту;

$b_{i\rho}$  – коэффициент трансформации денежных затрат, вложенных в интенсификацию выращивания древесины  $\rho$ -го качества на  $i$ -й площади ( $i \in I_3$ ), в дополнительно вовлекаемый в рубку запас спелого леса на новых площадях;

$D_{i\rho}$  – объем спроса в  $i$ -м пункте ( $i \in I_2$ ) на древесину  $\rho$ -й категории качества;

$Q_{i\rho}$  – предельный объем древесины  $\rho$ -й категории качества, возможный к рубке в пункте  $i \in I_1$ , или закупке из партии  $i \in I_4$ , или получаемый за счет интенсивного лесовыращивания  $i \in I_3$ ;

$\rho$  – категория качества леса;

$i$  – пункт;

$j$  – цена;

$l$  – транспортная связь.

Тогда существует модель REG3:

$$\max_{(V,Z,X)} \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{\rho \in P} r_{i\rho} V_{i\rho} - \sum_{i \in I} \sum_{\rho \in P} Z_{i\rho} - \sum_{i \in I} W_i - \sum_{i \in I} e_i S_i - \sum_{l \in L} a_l \sum_{\rho \in P} X_{l\rho} \right\}; \quad (1)$$

$$[M_{il}]_{\rho}[X_l]_{\rho} - [V_i]_{\rho} = [0]_{\rho}; \quad \forall \rho \in P, \forall l \in L, \forall i \in I_1; \quad (2)$$

$$[M_{il}]_{\rho}[X_l]_{\rho} + [V_i]_{\rho} = [0]_{\rho}; \quad \forall \rho \in P, \forall l \in L, \forall i \in I_2; \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I_1 \cup I_3} V_{i\rho} - \sum_{i \in I_2} V_{i\rho} = 0; \quad \forall \rho \in P; \quad (4)$$

$$V_{i\rho} = D_{i\rho}; \quad \forall i \in I_2; \quad \forall \rho \in P; \quad (5)$$

$$V_{i\rho} \leq Q_{i\rho}; \quad \forall i \in I_1 \cup I_3 \cup I_4, \cup I_6, \forall \rho \in P; \quad (6)$$

$$\sum_{\rho \in P} V_{i\rho} - c_i W_i = V_{0i}; \quad \forall i \in I_6; \quad (7)$$

$$b_{i \in I_3, \rho} Z_{i \in I_3, \rho} - V_{i \in I_1, \rho} = 0; \quad \forall \rho \in P; \quad (8)$$

$$V_{i, \rho} - \sum_{j \in J} V_{ij\rho} = 0; \quad \forall i \in I_5; \quad \forall \rho \in P; \quad (9)$$

$$\sum_{\rho \in P} V_{i\rho} - q_i S_i = 0; \quad \forall i \in I_7; \quad (10)$$

$$X_l^{\min} \leq \sum_{\rho \in P} X_{l\rho} \leq X_l^{\max}; \forall l \in L_3; \quad (11)$$

$$V_{i\rho} \geq 0; \forall i \in I; \forall \rho \in P; \quad (12)$$

$$X_{l\rho} \geq 0; \forall l \in L; \forall \rho \in P; \quad (13)$$

$$Z_{i\rho} \geq 0; \forall i \in I; \forall \rho \in P. \quad (14)$$

Модель REG3 эффективно распределяет совокупные денежные потоки лесного комплекса по его элементам, обеспечивая максимальную прибыль за период планирования. Компоненты потоков: затраты на лесовыращивание в неспелых древостоях; на лесосечные работы в рамках промежуточного и главного пользования; на транспортировку и строительство необходимых транспортных связей; на обработку древесины на нижних складах и в конечных пунктах потребления; на охрану и защиту леса, закупку древесины вне региона и ее транспортировку по внутрирегиональной сети к потребителям.

Целевая функция (1) задачи максимизирует прибыль от продажи древесины на внешнем рынке и лесной продукции на внутреннем рынке. Ограничения (2) и (3) обеспечивают неразрывность и сложение грузопотоков в транспортной сети. Ограничение (4) определяет баланс заготовки, внешнего ввоза и потребления древесины в регионе, ограничение (5) – спрос в  $i$ -м пункте на древесину заданного качества. Ограничение (6) определяет, что с  $I$ -й ( $i \in I_1$ ) площади невозможно вырубить больше леса заданного качества, чем там имеется. Для площадей интенсивного лесовыращивания ( $i \in I_3$ ) ограничение устанавливает верхний предел достигаемого запаса в условиях  $i$ -й площади, для пунктов внешнего ввоза ( $i \in I_4$ ) – предельный объем закупаемой партии  $\rho$ -го качества, для площадей, подлежащих охране и защите ( $i \in I_6$ ), – верхнюю границу сохраняемого запаса. Ограничение (7) устанавливает связь между объемом средств, выделяемых на охрану и защиту леса в  $i$ -м пункте, и сохраняемым за счет этого лесным запасом. Ограничение (8) определяет, что на площадях интенсивного лесовыращивания образуется дополнительный лесной запас, пропорциональный вложенным средствам. Это ограничение совместно с ограничением (6) отображает линейными функциями логистическую кривую «затраты на лесовыращивание – объем дополнительно образующегося запаса». При наличии затрат на интенсивное лесовыращивание модель отражает ситуацию, когда достигается немедленное увеличение объема лесопользования за счет интенсификации лесовыращивания. Дополнительные затраты на лесовыращивание или импорт древесины возникают, когда исчерпаны экстенсивные пути увеличения объемов лесозаготовок. В частности, модель может быть использована для обоснования объемов плантационного лесовыращивания. Ограничение (9) определяет формирование потоков ввозимой в регион древесины из возможных к закупке партий. Ограничение (10) устанавливает связь между вырубаемым объемом древесины и площадью  $i$ -го пункта. Ограничение (11) определяет диапазон грузопотока древесины для  $l$ -й ( $l \in L_3$ ) транспортной связи. Ограничения (12)–(14) определяют неотрицательность переменных.

В ограничении (5) объем спроса, определяемый импортом и внутренним потреблением лесопродукции, полагается заданным. Это эмулирует ситуацию, когда регион или холдинг подстраиваются под требования внешнего рынка и внутренних обстоятельств. Но могут быть и иные случаи, например, когда руководство экономически сильного холдинга или региона, определяющих состояние рынка, стремится узнать экономически целесообразную структуру и параметры лесозаготовок в сложившихся обстоятельствах. Для решения этого вопроса достаточно изменить ограничение (5):

$$V_{ip} - D_{ip} = 0; \forall i \in I_2; \forall p \in P. \quad (5^*)$$

В этом случае будут найдены оптимальные в сложившихся внутриэкономических обстоятельствах параметры системы без учета требований внешнего рынка и внутреннего спроса. При этом достигается максимальная эффективность системы. В реальных условиях не приходится ожидать, что внешний и внутренний рынки будут подстраиваться под холдинг в соответствии со сложившейся обстановкой. Но руководству всегда полезно знать оптимальные параметры управляемой системы, заключать договоры на поставку и выполнять другие планово-управленческие функции в соответствии с этими параметрами либо, по возможности, приближаясь к ним.

В данной модели древесина усыхающих лесов может быть представлена как один из параметров, образующих множество  $P$ , содержащее категории качества леса.

Модель имеет среднюю либо большую размерность и в различных вариантах (REG1, REG2) используется в учебном процессе вузов. С примером можно ознакомиться в работе [3, с. 133–144]. Обеспечение модели данными представляет собой объемную информационную задачу, решаемую с привлечением всех возможных источников, включая материалы спутникового мониторинга территории.

#### *Выводы*

Разработан инструмент для обоснования планово-проектных решений освоения усыхающих лесов Архангельской области, учитывающих производственные, экономические и лесоводственные реалии проблемы.

Принятие решений существенным образом базируется на математических методах обоснования решений, использовании ГИС и спутниковой информации, организованной в базы картографических и иных данных, служащих исходной информационной основой для математических моделей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешко Р.А., Гурьев А.Т., Тархов С.В. Программа автоматизированного определения основных таксационных показателей Европейского Севера по данным спутниковых снимков. № 2009614299; зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 19.06.2009 г.

2. Варфоломеев Ю.Ф., Гурьев А.Т., Алешко Р.А. Методические и технические аспекты космического мониторинга биоповреждений и усыхания еловых лесов / Лесн. журн. 2010. № 5. С. 149–156. (Изв. высш. учеб. заведений).

3. Гладков Е.Г. Моделирование технологических процессов: моделирование территориальной динамики лесопромышленных предприятий: учеб. пособие. СПб.: СПбГЛТА, 2010. 148 с.

4. Гладков Е.Г. Территориальная динамика лесозаготовок: моделирование и оптимизация эффективного развития лесозаготовок в современных экономических условиях. СПб.: СПбГУ, 2006. 187 с.

Поступила 18.02.11

*E.G. Gladkov<sup>1</sup>, O.G. Plekhov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

#### **Drying Forests: a Model of Regional Forest Management**

The paper presents an economic and mathematical model of feasibility study of regional projects on drying forests development in the Arkhangelsk Region. The model substantiates distribution of investments within the regional structure allowing the highest possible profits within the timber production spheres under consideration for the planning period.

*Key words:* drying forests, regional forest management, mathematical model, timber transportation network, feasibility study.