

**Математическая модель поиска оптимального решения задачи о формировании цепочек поставок сырья в условиях неопределенности с товарно-сырьевой биржи на склад предприятий лесопромышленной отрасли с учетом производственно-логистических особенностей**

*Роголин Родин Сергеевич* – кандидат экономических наук, старший преподаватель кафедры «Математики и моделирования», Владивостокский Государственный Университет Экономики и Сервиса, email: [rafassiaofusa@mail.ru](mailto:rafassiaofusa@mail.ru)

*Аннотация:* Формирование цепочек поставок сырья очень тесно связано с проблемами производства на лесоперерабатывающем предприятии. Зачастую актуальным вопросом является проблема оценки оптимальности принятого решения. В данной статье рассматривается лесопромышленное предприятия без собственных источников сырья в лице делян, которое ставит себе целью найти оптимальное решение в конце горизонта планирования, основываясь на данных об уже реализованных сделках. В качестве источника сырья рассматривается товарно-сырьевая биржа, где лоты появляются каждый день в разных регионах добытчиках в случайном порядке. В научной литературе существует множество подходов к расчёту оптимального значения прибыли на всем горизонте планирования, однако, они не учитывают множество важных для лесоперерабатывающего предприятия особенностей. Так в работе представлена математическая модель, позволяющая оценить оптимальную траекторию значений прибыли на всем горизонте планирования и отличающуюся тем, что позволяет учитывать долю полезного объема сырья, которое по зачислению на склад можно использовать в производстве ОСБ плит, время лота в пути в условиях неопределенностей. Модель протестирована на данных товарно-сырьевой биржи России и одного из предприятий Приморского края. Результатом тестирования модели является вычисленная оптимальная траектория прибыли для каждого набора данных об объемах сырья, времени лотов в пути, а также множество важных показателей для любого производства: объем прибыли, объем производства товаров. Анализ полученных решений показал, что существуют сложности в планировании цепочек поставок и объемов производства. Проанализированы регионы в качестве источников сырья, из каких регионов и когда стоит закупать сырье. Приведены недостатки и положительные стороны математической модели.

*Ключевые слова:* оптимизация производства, транспортная задача, лесная промышленность, товарно-сырьевая биржа, цепочки поставок, выпуск продукции.

**Jel Classification:** C44, C61, D24.

## Введение

Компании разрабатывают и экспериментируют с инновационными гибкими организационными и управленческими решениями на протяжении долгого времени. Сложность принятия решений на предприятиях в современных условиях быстро растет вместе с эволюцией факторов окружающей бизнес-среды. Чтобы обеспечить устойчивость цепочек поставок (Supply Chains, далее SC), теперь требуются высокое качество, конкурентоспособные цены и быстрые сроки разработки программного обеспечения, моделей и подходов. Компании, которые намереваются внедрить такого рода решения и адаптироваться к ситуации текущего времени, должны быть в курсе трендов и, как следствие, должны внедрить стратегическую систему с использованием различных методов управления и инструментов оптимизации для анализа большого объема данных для достижения удовлетворенности клиентов. В результате внедрения результатов работ, проводимых в контексте Индустрии 4.0, могут быть улучшены решения на предприятиях до соответствующего текущему времени и их вызовам качества [28].

Наиболее часто в исследованиях последних лет утверждается необходимость достижения удовлетворенности клиентов с помощью включения нескольких наиболее важных внешних и/или внутренних факторов при решении задач управления цепочками поставок (Supply Chain Management, далее SCM), а именно, управление запасами (разработка, особенности и ограничения), а в некоторых случаях и изменениями в объемах поставляемых видов ресурсов в зависимости от времени и внешних факторов.

До конца 1970-х годов в литературе преобладала организационная модель вертикально интегрированной компании. Впоследствии развитие коммуникационных и информационных технологий привело к кардинальным изменениям в логистике по мере увеличения требований отдельных клиентов. Все эти изменения способствуют финансовой интеграции бизнес-процессов, тем самым снижая затраты на переключение и предоставляя персонализированные услуги с более короткими сроками доставки. Это решающие факторы в развитии SCM. Благодаря этому новому методу управления компании становятся частью сети различных организаций. Цель состоит в том, чтобы предоставлять индивидуальные продукты и услуги. Поэтому понятие цепочки поставок гораздо шире, чем логистика. С этой точки зрения успех системы зависит от интерактивных возможностей отдельных узлов сети и эффективного использования интерактивных технологий. Изменчивость может быть связана с «эффектом Форрестера» или с «эффектом кнута». Он перемещается вверх по цепочке поставок и выявляет уровни запасов выше необходимого. Эффективная цепочка поставок имеет следующие характеристики [26]:

- Стабильные и взаимовыгодные организационные отношения;
- Надлежащая координация;
- Эффективный поток информации;

- Эффективное управление запасами с использованием логики подхода «just-in-time».

### **Обзор литературных источников**

В научных статьях и обзорах [2, 4, 6] обсуждается степень влияния различных факторов, включая глобализацию, на процесс управления цепями поставок. Описывается, как программное обеспечение и математическое программирование можно использовать для имитации и/или моделирования реальных жизненных ситуаций для помощи менеджерам в принятии важных управленческих решений. Так в статье [1] представлена модель геометрического программирования для решения задачи о совместной дифференциации цен, а также по планированию совокупного производства на нескольких площадках путем максимизации общей прибыли цепочки поставок. Проведено численное исследование на примере цепочки поставок одежды. Показано, что по мере увеличения ценового разрыва полезность ценовой дифференциации снижается. Статья [5] посвящена моделированию цепочек поставок, применяя уравнения в частных производных и обыкновенные дифференциальные уравнениями. Обсуждаются численные и точные подходы к оптимизации полученных систем дифференциальных уравнений для получения минимизации показателя стоимости. Авторы [7] рассматривают проблему аутсорсинга в управлении цепочками поставок. Они разрабатывает математическую модель аутсорсинга процессов в SCM и проводят численный эксперимент с применением реальных данных, чтобы найти оптимальное количество производства и аутсорсинга с минимальной общей стоимостью цепи поставок. В работе [8] была разработана математическая модель проектирования сети цепочки поставок с учетом устойчивости их к внешним вызовам. Разработанная модель является задачей стохастического программирования на основе сценариев и поиск решения осуществляется методом  $\epsilon$ -ограничения. Работа авторов [23] посвящена разработке модели и алгоритма формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности внешней среды с учетом возможности отказа от купленного лота, если последний находится в пути свыше обозначенного срока в договоре купли-продажи. Алгоритм представляет собой объединение метода ветвей и границ и генетического алгоритма. Автор работы [24] разработал модель, которая позволяет оценить перспективы сотрудничества предприятия лесопромышленной отрасли с товарно-сырьевой биржей с учетом двух проблем: объемах производства и о формировании цепочек поставок сырья. Полученные результаты отражают временные интервалы, когда цепочки поставок являются наиболее неустойчивыми и в какие промежутки времени какой объем товаров необходимо производить для максимизации прибыли. Работа [25] посвящена аналогичной проблеме, что в [24] с тем отличием, что предоставляет инструмент формирования цепочек поставок и расчёта объемов производства для случае, когда существует адекватный прогноз всех необходимых данных. Исследование [27] направленно на расчёт значения цен на товары лесопромышленного производства в условиях неопределенности с учетом

формирования цепочек поставок сырья по договорам B2B с делянами, объемов производства и логистики конечных товаров до потребителя с привязкой к изменению спроса в зависимости от рассчитанной цены.

В современной литературе часто встречаются работы, посвящённые вопросам SCM, где модели являются многопериодными или с несколькими целевыми функциями. В статье [9] разработана многоцелевая модель проблемы производственного распределения в цепочке поставок, состоящей из нескольких поставщиков, производителей, дистрибьюторов и различных клиентов. В качестве вспомогательной модели предлагается модель смешанного целочисленного линейного программирования (MILP) для проектирования многоцелевой и многопериодной сети цепочки поставок в то время, как модель GFLP построена для многоцелевой оптимизации задачи производства-распределения в сети цепочки поставок. В работе [10] разработана операционная политика для трехступенчатой цепочки поставок, направленной на максимальное увеличение совокупной прибыли при взаимодействии поставщиков, производителей и дистрибьюторов. Авторы принимают во внимание ухудшающийся характер сырья и конечной продукции. Предложенная модель была применена к реальному случаю и показала, что она способна увеличить общую прибыль цепочки поставок на 15%. В статье [12] рассматривается проблема перепроектирования цепочки поставок товаров массового потребления с учетом финансовых критериев и сценариев спроса. Для решения задачи используется разработанная авторами многоцелевая модель смешанно-целочисленного линейного программирования, учитывающая две целевые функции: максимизация чистой приведенной стоимости цепочки поставок и минимизация финансового риска. В работе [17] разработана многоцелевая модель для определения оптимального уровня запасов и их распределения между поставщиками. Целевая функция в модели направлена на минимизацию затрат и максимизацию качества. В этой статье [18] разработана многопериодная модель смешанно-целочисленного нелинейного программирования для оптимизации процесса принятия решений менеджерами в области закупок. Модель апробирована на реальных данных и результаты ее работы показывают, что она может снизить эксплуатационные расходы. В исследовании [22] предложена новая бизнес-модель для многоступенчатой схемы управления запасами в цепочке поставок. Она была протестирована путем проведения 288 экспериментов с целью оценки влияния переалки на производительность двухзвенной цепочки поставок. Анализы и моделирование показывают, что использование больших партий и/или недорогих продуктов не требовало перегрузки. Работа [29] посвящена решению проблемы минимизации стоимости цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи. Разработанная модель имеет две целевые функции: первая направлена на минимизацию издержек, вторая – на минимальное отклонение от рассчитанного плана закупа сырья с биржи на основе работы [23].

Существуют и другие работы на тему SCM, которые посвящены огромному спектру проблем в управлении цепями поставок. Так авторы [3] обсуждается применение анализа данных для прогнозирования сбоев в цепочке поставок первого уровня. Он использует выборку данных для выбора и разработки математических функций, которые могут служить полезными предикторами сбоев. Результаты показывают, что добавление разработанных функций в данные, а именно гибкость, превосходит другие эксперименты, что приводит к окончательному алгоритму, который может предсказывать просроченные заказы с точностью 80%. Авторы исследования [11] анализируют количественные модели устойчивого управления цепочками поставок. Они обнаруживают, что зачастую разрабатываемые модели SCM не применимы в жизни, так как важным фактором является неотъемлемое включение анализа жизненного цикла в дизайн сетей цепочки поставок, который редко включен в исследования управления цепочками поставок. В исследовании [13] используются цветные сети Петри для моделирования системы управления цепочками поставок с многоагентной структурой. В нем описывается, как можно использовать модель для указания желаемого уровня детализации системы. Авторы работы [14] рассматривают проблему координации в модели устойчивой цепочки поставок при наличии экологической и социальной осведомленности потребителей. Предполагается, что потребители чувствительны, как к экологическому качеству продукта, так и к социальной ответственности цепочки поставок. Для оптимизации исследуемой цепочки поставок применяется теоретико-игровой подход, и разрабатывается контрактная модель для создания взаимовыгодного результата для обоих участников цепочки поставок. В статье [16] авторы проводят обзор на тему применение нечетких методов при моделировании цепочки поставок. В ней также исследуются требования к разработке математической модели интегрированной цепочки поставок. В статье [19] разработана модель системной динамики для визуализации поведения цепочки поставок при внедрении аддитивного производства. Достоверность разработанной модели подтверждается путем оценки экстремальных условий и анализа чувствительности применительно к реальным данным в реальных условиях. В результате было проанализировано динамическое поведение переменных, обуславливающих управление цепью. В статье [20] проведено исследование на тему дизайна сети цепочки поставок с учетом разработки новых продуктов. Он включает в предлагаемую надежную модель понятие управления взаимоотношениями с клиентами и неопределенность спроса на продукцию. Производительность модели оценивается на данных реального предприятия. В работе [21] предлагается система оптимизации на основе данных о возможных рисках для управления цепочками поставок, которая учитывает стратегические, тактические и оперативные особенности. Разработана новая модификация генетического алгоритма, которая интегрирована с многослойной нейронной сетью для поиска решения предложенной модели. Результаты показывают, что предлагаемая модель снижает уровень запасов и увеличивает уровень прибыли.

Таким образом, можно утверждать, что рассматриваемая тема в рамках проблемы управления цепочками поставок актуальна и получила серьезную разработку в литературе. Однако, отметим некоторые важные особенности проведенного обзора литературы:

1. В научной литературе слабо освещены проблемы управления цепочками поставок сырья с товарно-сырьевых бирж в условиях неопределенности и рисков;
2. Недостаточно разработана проблема, посвященная вопросам оценки максимальной возможной прибыли на всем горизонте планирования производства лесопромышленной отрасли.

### **Цели, задачи и гипотеза исследования**

Рассмотрим деятельность предприятий лесопромышленной отрасли. В текущей задаче задействованы два процесса производства: доставка и объемы закупа сырья с биржи, а также объемы производства каждого типа продукта, исходя из имеющихся запасов сырья.

Для определенности необходимо отметить источники поступления сырья на биржу. Биржа заключает договора с арендаторами делян из регионов о том, что они могут пользоваться площадкой для торгов. После совершения сделки между предприятием (далее, заказчик) по переработке сырья и деляной (продавцом) заявленный в договоре<sup>1</sup> объем сырья отправляется заказчику [23, 25].

Как правило, предприятия получают заявки от заказчиков на товары заблаговременно. В связи с этим выдвинем предположение о том, что предприятие может проводить планирование своей деятельности на большие горизонты планирования. Здесь стоит отметить, что спрос на товары лесопромышленной отрасли имеют сезонный характер, что усложняет планирование деятельности компании [23, 25].

*Цель работы* заключается в построении математической модели, которая позволяет осуществлять поиск решения задачи лесопромышленного предприятия об оптимальном объеме выпуска товаров исходя из формируемых и поступающих цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи и отличается возможностью учитывать условия неопределённости предложения и логистики для оценки максимального значения прибыли на всем горизонте планирования.

Для достижения цели работы выдвигаются следующие *задачи исследования*:

1. Проведение обзора научной литературы по решению рассматриваемой проблемы;
2. Построение экономико-математической модели по формированию цепочек поставок сырья и о расчёте оптимального объема производства

---

<sup>1</sup> В договоре купли-продажи прописаны способы и цена доставки древесины. Доставка может осуществляться силами предприятия, однако, мы сосредоточимся на доставке сырья силами поставщика.

товаров лесопромышленного производства с учетом уже свершившихся событий, а именно:

- а. Распределение заявок во времени;
  - б. Затраченного времени на приход лотов на склад предприятия.
3. Анализ полученных результатов тестирования модели.

*Гипотеза исследования.* Существует такая модель, которая позволяет оценить оптимальную траекторию значения прибыли на всем горизонте планирования.

### **Математическая модель**

Любое производство, в том числе и лесопромышленное не способно функционировать без сырьевой базы. В качестве сырьевой базы будем пользоваться данными Санкт-Петербургской Международной Товарно-сырьевой Биржи<sup>2</sup> (далее, биржа). На бирже каждый день публикуются данные о том, сколько сделок (заявок) было совершено, по какой цене и какой был продан объем сырья. Кроме того, биржа оказывает услуги по доставке сырья до потребителя, что также включается в цену товару. На бирже представлены многие регионы, откуда может потенциально поступать сырье [23, 25]. Купить лот можно только полностью в соответствии со схемой работы товарно-сырьевой биржи [23, 25].

Производство происходит по следующей технологии: сырье поступает на склад, далее его перемалывают в труху, затем его прессуют в плиты ОСБ. ОСБ плиты изготавливаются отдельно для каждого типа сырья.

Транспортировка происходит по ЖД путям с использованием транссибирской магистрали за счет отправителя, который включает все издержки по транспортировке лота в цену.

Введем следующие обозначения параметров и переменных.

*Параметры:*

$p_{km}$  – цена на товар типа  $k$  в день  $m$ ;

$c_{ilrm}$  – цена лота  $i$  с типом сырья  $l$  из региона  $r$ , появившаяся на бирже в день  $m$ ;

$A_{lk}$  – норма потребления сырья типа  $l$  на производство единицы товара типа  $k$ ;

$\gamma_{\tilde{m}m}$  – коэффициент порчи сырья, купленного в день  $\tilde{m}$  ко дню  $m$  ( $m \geq \tilde{m}$ );

$V_{ilrm}$  – объем сырья в лоте  $i$  с типом сырья  $l$  из региона  $r$ , появившаяся на бирже в день  $m$ ;

$H_{km}$  – максимальный объем производства товаров типа  $k$  в день  $m$ ;

$\underline{b}$  – неприкосновенный уровень запаса сырья;

$\bar{b}$  – максимальная вместимость склада;

$B_0$  – начальный бюджет;

$FC$  – постоянные издержки;

---

<sup>2</sup> Официальный сайт «Санкт-Петербургской Международной Товарно-сырьевой Биржи» (АО «СПБМТСБ»), [Электронный адрес]: <https://spimex.com/markets/wood/trades/results/>

$M$  – горизонт планирования;

$T_{r\tilde{m}}$  – время, за которое выкупленный в день  $\tilde{m}$  лот из региона  $r$  дойдет до склада;

$L_r$  – расстояние от склада до региона  $r$ ;

$S_m$  – расстояние, пройденное заявкой в день  $m$ ;

$\beta$  – константа;

$\varepsilon^{(1)}$  – шум;

$left$  и  $right$  – минимальное и максимальное значение случайной величины, распределенной по равномерному закону;

$LN(a_m, \delta_m)$  – логнормальное распределение случайной величины с параметрами  $(a_m, \delta_m)$  соответственно;

$E$  – число различных наборов входных параметров  $\{V_{ilrm}(e), c_{ilrm}(e), T_{r\tilde{m}}(e)\}$ .

*Переменные:*

$x_{km}$  – объем производства товаров типа  $k$  в день  $m$ ;

$\lambda_{ilrm}$  – решение о покупке лота  $i$  с типом сырья  $l$  из региона  $r$ , появившаяся на бирже в день  $m$ ;

$b_{lm}$  – уровень запаса сырья типа  $l$  на складе в день  $m$ ;

Обозначим решаемую задачу для каждого набора параметров  $e$  (список параметров указан выше), как  $F^{(1,1)}(e)$  примет вид:

$$\sum_{k,m} p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r,m} c_{ilmr} \lambda_{ilmr} \rightarrow \max \quad (1)$$

$$b_{lm} = b_{lm-1} - \sum_k A_{lk} x_{km} + \gamma_{\tilde{m}m} \sum_{i,r} V_{i\tilde{m}rl} \lambda_{i\tilde{m}rl} \quad (2)$$

, где выполняется условие  $\tilde{m} = m - T_{r\tilde{m}}$ .

$$x_{km} \in N \quad (3)$$

$$\lambda_{ilmr} = \{0; 1\} \quad (4)$$

$$0 \leq \sum_l b_{lm} \leq \bar{b} \quad (5)$$

$$0 < \underline{b} \leq b_{lm} \quad (6)$$

$$B_0 + \sum_{m=1}^m \left( \sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{i\tilde{m}rl} \lambda_{i\tilde{m}rl} - FC \right) \geq 0, \underline{m} = 1: M, \quad (7)$$

где  $\tilde{m} = m - T_{r\tilde{m}}$ .

$$T_{r\tilde{m}} = m^*: \begin{cases} \left| L_r - \sum_{m=\tilde{m}}^{m^*} S_m \right| \rightarrow \min \\ L_r - \sum_{m=\tilde{m}}^{m^*} S_m \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$S_m \sim LN(a_m, \delta_m) \quad (9)$$

$$\gamma_{\tilde{m}m} = \min \left( 1; \max \left[ 0; 1 - \frac{2}{\pi} \arctg(\beta(m - \tilde{m})) + \varepsilon^{(1)} \right] \right) \quad (10)$$



$$\varepsilon^{(1)} \sim U(left, right) \quad (11)$$

$$0 \leq x_{km} \leq H_{km} \quad (12)$$

Поясним, что в ограничениях (2) и (7) значения  $V_{ilr(m-T_r\tilde{m})}$  записываются в систему ограничений тогда и только тогда, когда выполняется условие  $\tilde{m} = m - T_r\tilde{m}$ . Задача  $F^{(1,1)}(e)$  решается для всех  $e = 1:E$ .

Рассмотрим выражения (1–12) подробнее. Целевая функция (1) направлена на получение максимального значения прибыли в последний день горизонта планирования. Уровень запаса сырья в день  $m$  рассчитывается по формуле (2) исходя из затраченного объема сырья на производство  $\sum_k A_{lk}x_{km}$ , запаса сырья на конец предыдущего дня  $b_{lm-1}$ , а также поступившего объема сырья на склад в текущий день с поправкой на время в пути  $\tilde{m}$  и соответственно на долю полезного объема сырья  $\gamma_{\tilde{m}m}$ . Объем производства (3) принимает только целые и неотрицательные значения. Факт принятия решения по вопросу покупки лота задается соотношением (4). Объем сырья на складе ограничен сверху значением максимальной вместимости склада (5) и снизу (6), так как не может быть отрицательным. Любое предприятие имеет свой бюджет, за пределы которого ему нельзя выходить (7). Время в пути каждой заявки рассчитывается исходя из соотношений (8–9). Коэффициент полезного объема сырья задается формулами (10–11). Объем производимых товаров (12) также ограничен сверху по физическим причинам.

Как следует из описания модели  $F^{(1,1)}(e)$ , она является задачей нелинейного и стохастического программирования. Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть алгоритм решения. Алгоритм решения примет вид:

1. Разыграть значения (8–9) и  $\gamma_{\tilde{m}m}$  с учетом (11);
2. Решить задачу смешанно-целочисленного программирования (1–7, 12) для каждого набора данных  $e$ .

### Калибровка

Апробация модели была проведена, с одной стороны, на данных биржи, с другой стороны, на данных предприятия, расположенного в Приморском крае. Данные биржи использовались при генерации значений параметров, связанных с лотами  $(c_{imrl}, V_{i\tilde{m}rl})$ , а данные предприятия для оценки параметров логистики и производственных процессов  $(\bar{b}, \underline{b}, B_0, FC, a_m, \delta_m, \beta, L_r)$ . Для определенности будем использовать  $K = 4$  типов товаров, горизонт планирования длиной в  $M = 100$  дней, типов сырья  $L = 2$ , количество регионов  $R = 4$ , количество лотов каждый день в диапазон  $0 \leq I \leq 6$ , количество различных наборов входных параметров  $E = 400$ . Биржа представлена четырьмя регионами: Иркутская область ( $r = 1$ ), Пермский край ( $r = 2$ ), Республика Бурятия ( $r = 3$ ), Московская область ( $r = 4$ ). Горизонт планирования лежит в интервале между 1 февраля 2022 года и серединой мая 2022 года.

Основные входные данные, характеризующие предприятие, представлены в таблицах 1–2.

Таблица 1 – Основные входные параметры предприятия.

|                                                |                             |
|------------------------------------------------|-----------------------------|
| $\forall m > 0: p_{km}, k = 1: K, \text{ руб}$ | $(1, 1.5, 1.6, 1.7) * 10^4$ |
| $\bar{b}, \text{ м}^3$                         | 3000                        |
| $\underline{b}, \text{ м}^3$                   | 20                          |
| $B_0, \text{ руб}$                             | $3 * 10^6$                  |
| $left(m), \text{ y.e.}$                        | $\frac{100}{m * 10^5}$      |
| $right(m), \text{ y.e.}$                       | $\frac{100}{m * 10^5}$      |
| $\forall m, k > 0: H_{km}$                     | 4                           |
| $L_r, r = 1: R, \text{ км}$                    | (3740, 7560, 3250, 9000)    |

Источники: предприятие, биржа, авторы.

Таблица 2 – Затраты сырья на производство единицы товара.

|          |         |         |         |         |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| $A_{lk}$ | $k = 1$ | $k = 2$ | $k = 3$ | $k = 4$ |
| $l = 1$  | 2       | 3       | 4       | 3       |
| $l = 2$  | 1       | 3       | 3       | 5       |

Источники: Предприятие.

Для проведения вычислений воспользуемся высокоуровневым языком программирования Matlab и встроенной функцией `intlinprog`<sup>3</sup> для поиска решений задач смешано-целочисленной линейной оптимизации.

### Обсуждение

Рассмотрим рисунок 1. На нем изображены объемы производства товаров в каждый день отдельный день. Серым цветом обозначены объемы производства каждого отдельного набора данных  $e$ , черным – среднее значение. Несмотря на более высокую цену на товары 3 и 4, результаты расчётов показывают, что наиболее частый производимые товары 1 и 2 типа. Однако, как видно из показателя средних значений, почти всегда производятся все товары.

<sup>3</sup> См. [<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>]

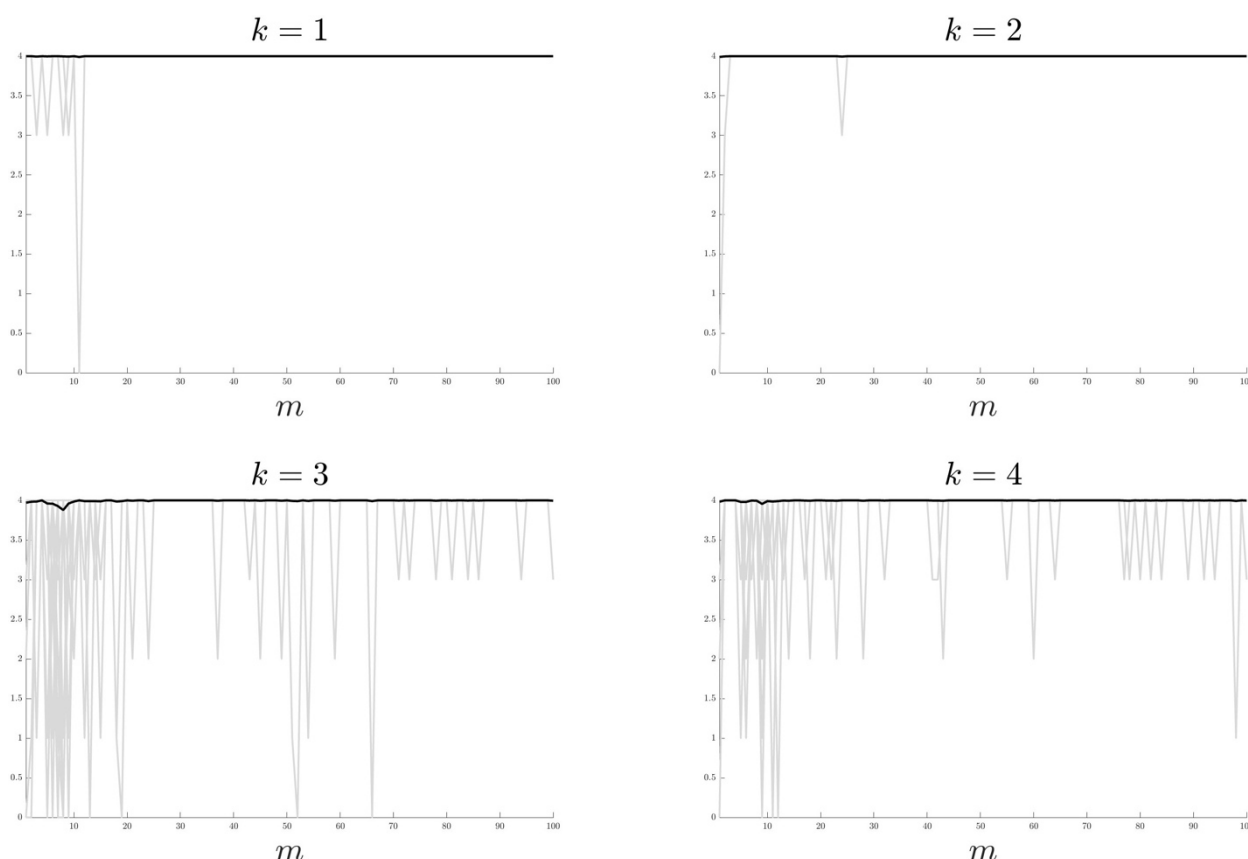


Рисунок 1 – Визуализация объемов производства

Рассмотрим рисунки 2 и 3. На них отражаются факты принятия решения касательно покупки лотов для сырья типа 1. Серым отмечаются траектории покупок лотов для каждого набора данных  $e$ , черным – их среднее значение.

Наиболее частыми для закупа сырья с биржи на всем горизонте планирования можно отнести следующие регионы: Пермский край и Московскую область. Исходя из результатов работ [23, 24, 25, 29] следует, что обычно территориальная близость играет важную роль в принятии решения об объемах закупа, однако, близость КНР к Иркутской области и наличие прямой ЖД ветки<sup>4</sup> сказывается на ценах на сырье, что влечет за собой необходимость закупа сырья в других регионах РФ, чтобы сэкономить на затратах. Кроме того, факт закупа сырья в более отдалённых регионах сказывается на рабочем объеме сырья, который приходит на склад, и времени в пути. В работах [25, 29] демонстрируется, что в основном стоит закупать сырье в Иркутской области, что идет в разрез с результатами текущего исследования.

Интересным фактом является то, что для второго типа сырья оптимально будет закупать сырье на начальных этапах планирования в Иркутской области и Республике Бурятия. Это связано с тем, что сырье, купленное в других регионах, не успеет дойти до склада и предприятие вынуждено закупать сырье по более высоким ценам. Из-за этой причины и происходит замедление роста показателя значения прибыли на рисунке 4.

<sup>4</sup> Карты международных транспортных коридоров (Евразия). Express+. Электронный ресурс: [\[http://www.expresstk.ru/wp-content/uploads/2017/08/Evroaziatskie-transportnye-koridory.pdf\]](http://www.expresstk.ru/wp-content/uploads/2017/08/Evroaziatskie-transportnye-koridory.pdf).

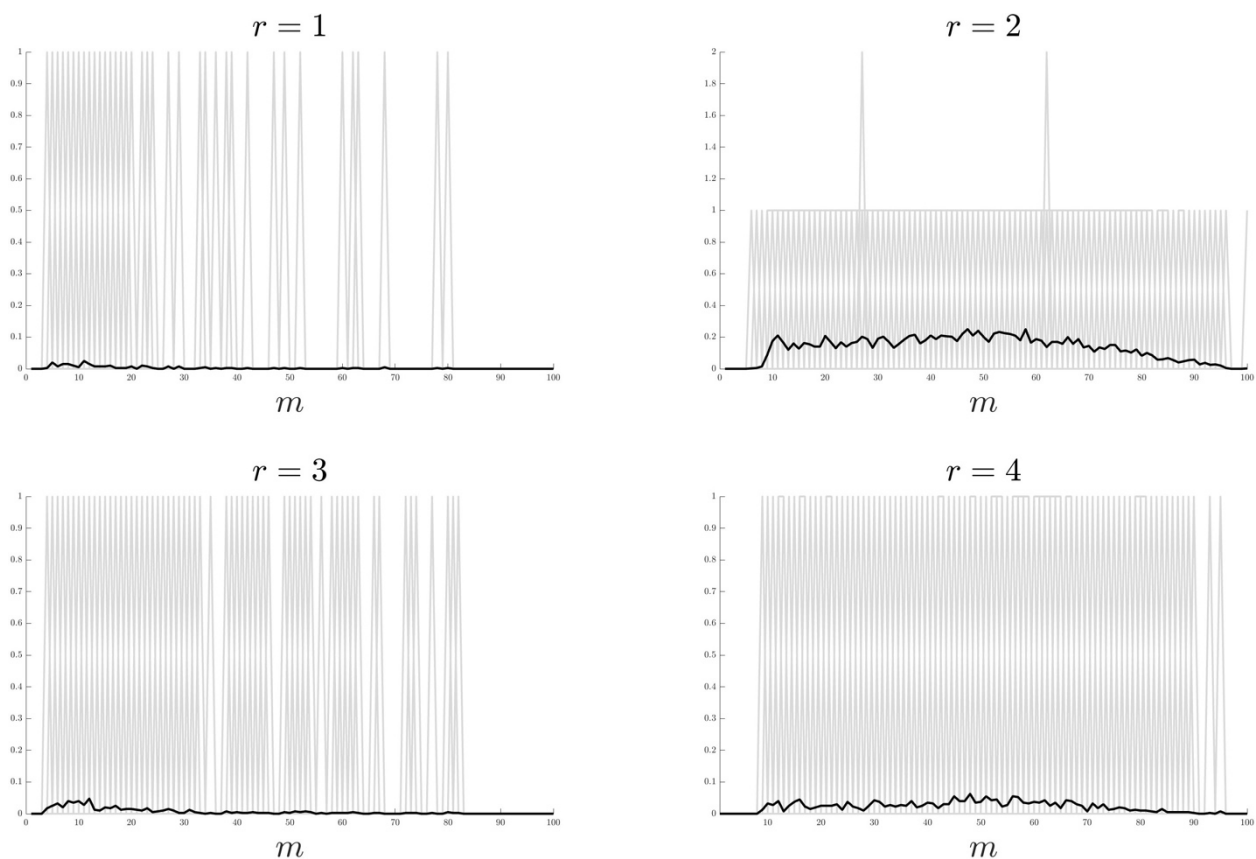


Рисунок 2 – Визуализация частоты закупа лотов с каждого региона ( $l = 1$ )

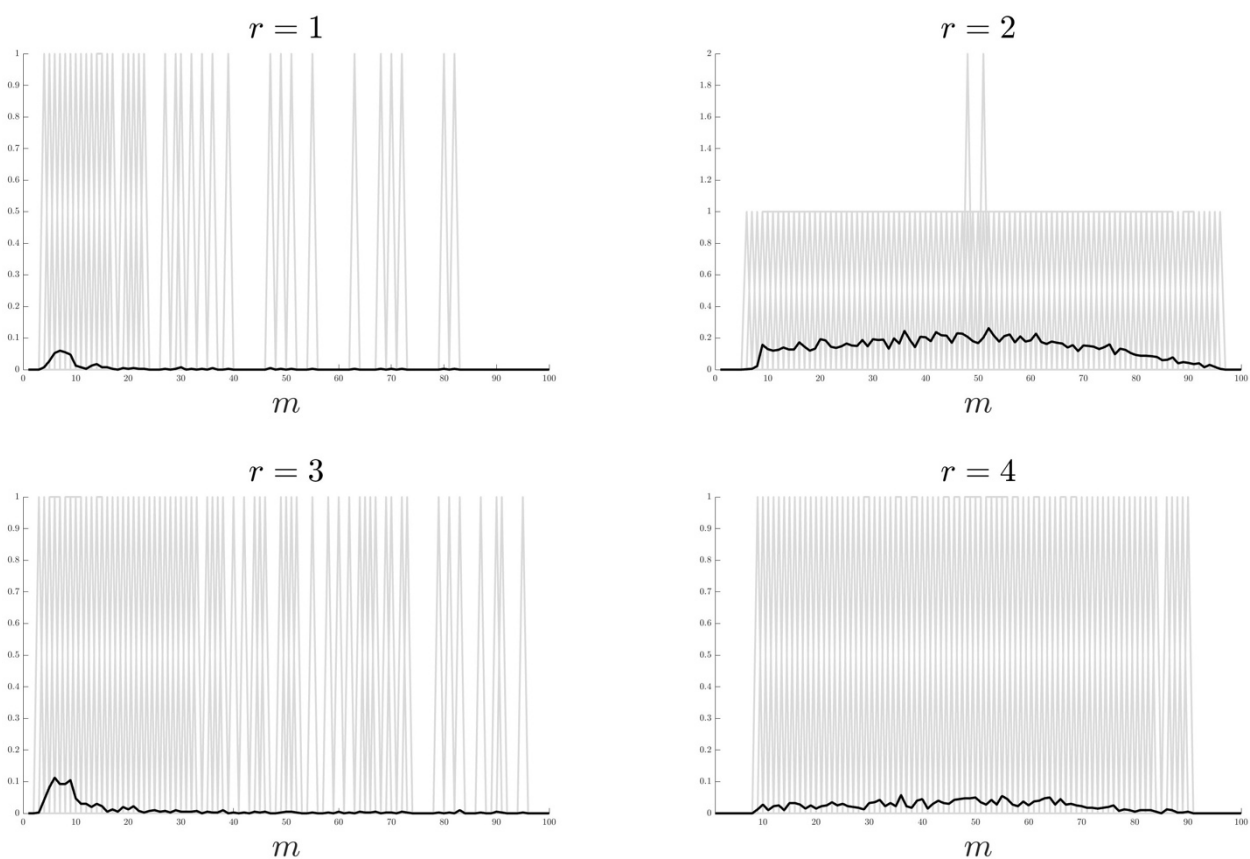


Рисунок 3 – Визуализация частоты закупа лотов с каждого региона ( $l = 2$ )

На рисунке 4 изображены показатель прибыли  $\pi_m(e)$  в каждый день отдельный день. Серым цветом обозначены объемы прибыли для каждого отдельного набора данных  $e$ , черным – среднее значение.

Видно, что наиболее финансово сложный период приходится на 40–60 дней планирования – показатель прибыли *при оптимальном решении* почти стабилизируется и не изменяется, что позволяет утверждать о сложности рассматриваемого периода, с точки зрения управленческого подхода.

Кроме того, начиная примерно с 70-го дня можно заметить, что прибыль начинает резко расти – это связано с тем, что в модель не закладывается идея, что предприятие будет дальше существовать, и происходит почти полная трата накопленного сырья (см. рисунки 5–7).

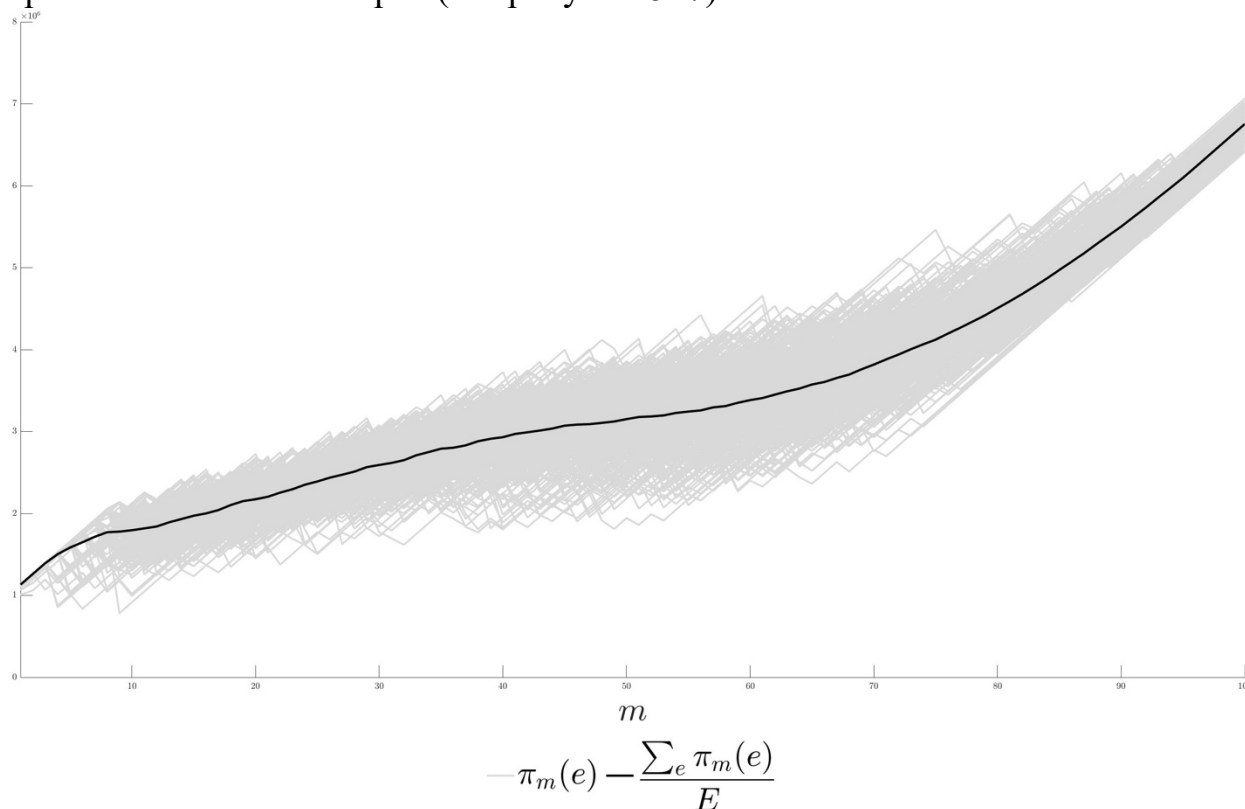


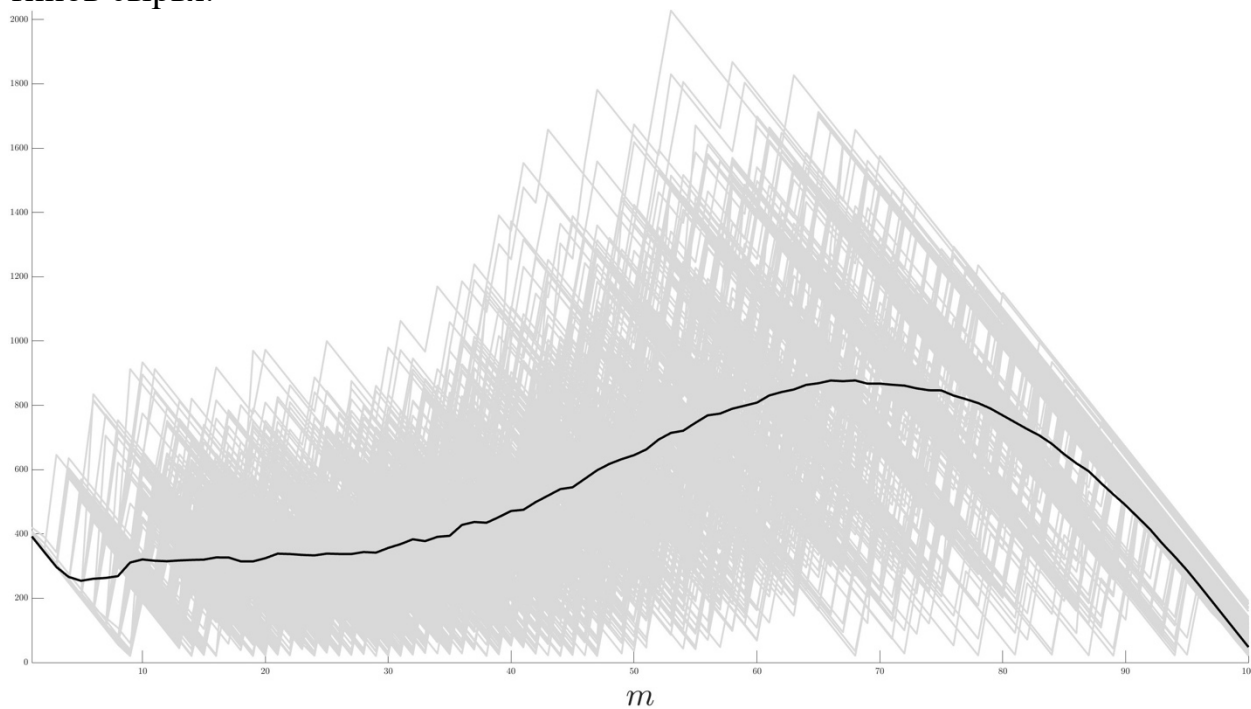
Рисунок 4 – Визуализация значений прибыли

На рисунках 5–7 изображены показатели объемов сырья на складе в каждый день отдельный день. Серым цветом обозначены объемы сырья для каждого отдельного набора данных  $e$ , черным – среднее значение.

Графики поведения значений объемов сырья на конец каждого дня показывают, что наиболее концентрированный приход лотов происходит в период между 40 и 70 днем, что позволяет утверждать о том, какой объем склада требуется предприятию. С вероятностью 80% предприятие должно иметь вместимость склада не менее 2500 м<sup>3</sup> для эффективного функционирования.

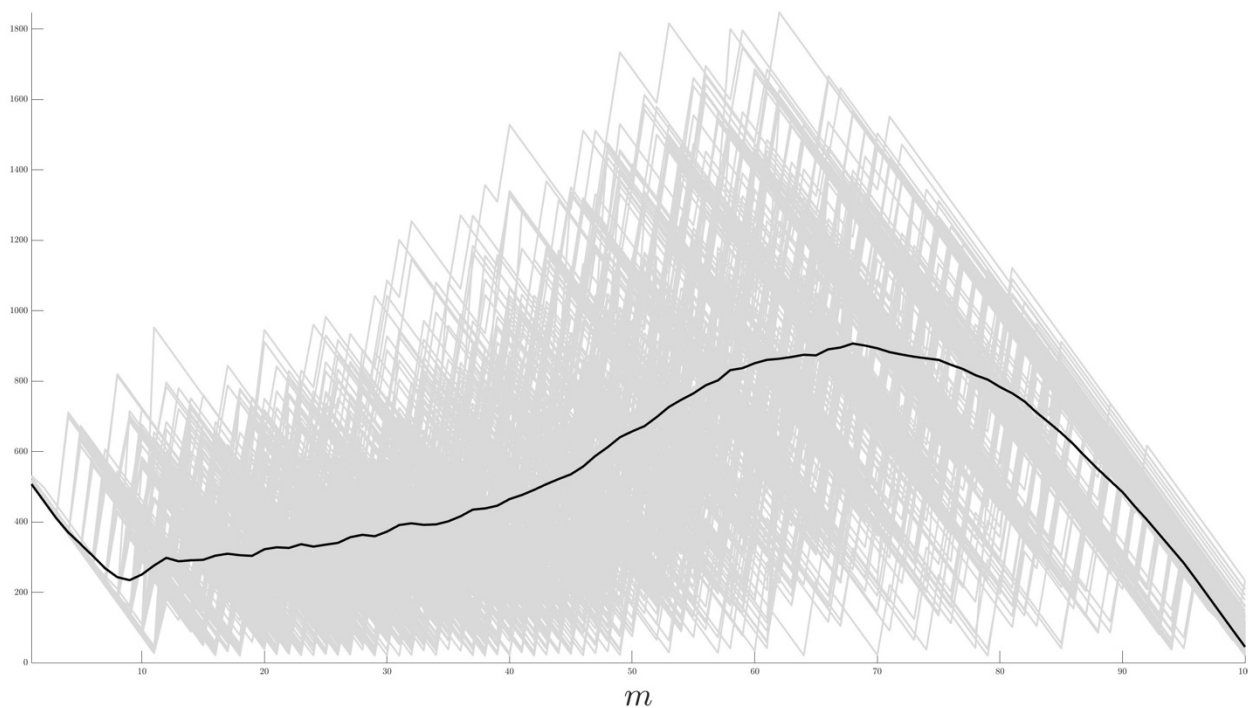
Суммарный объем сырья на складе повторяет во многом динамику изменения запаса сырья по каждому отдельному типу, так как различие между  $A_{lk}$  для разных значений  $l$  не значительны в масштабе производства, а также

и объемы лотов в среднем сильно не отличаются между собой для разных типов сырья.



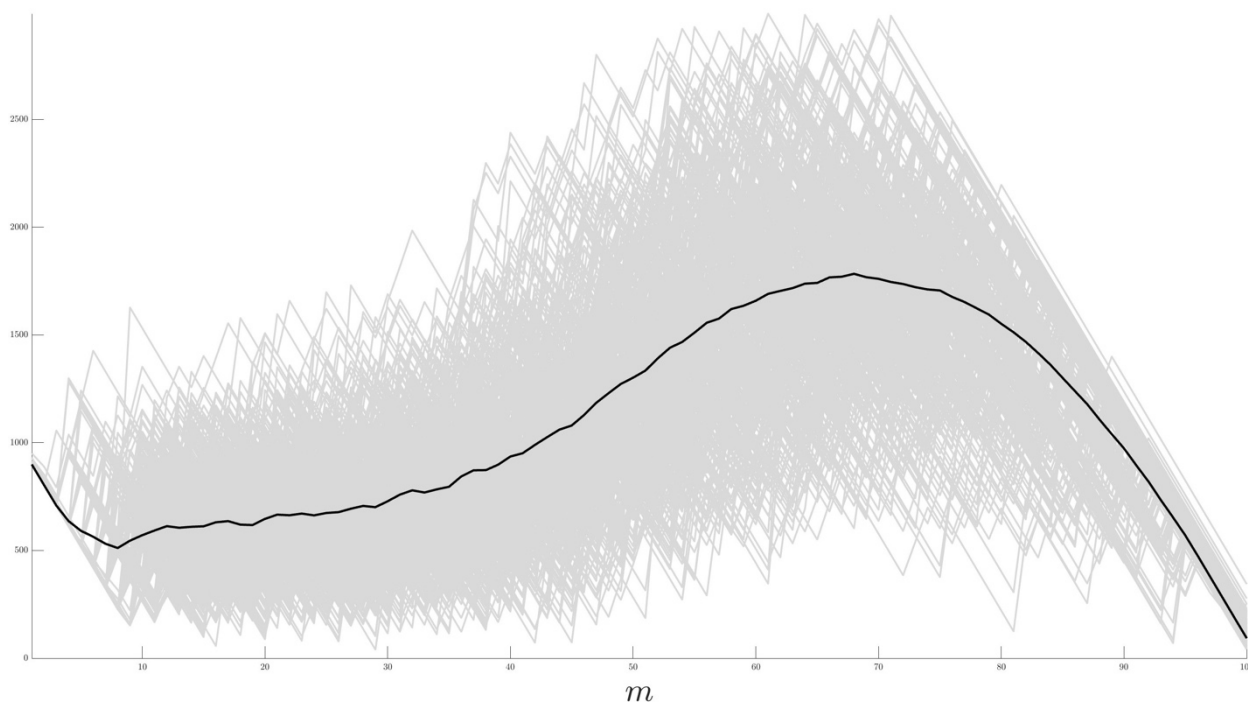
$$-b_{1m}(e) - \frac{\sum_e b_{1m}(e)}{E}$$

Рисунок 5 – Визуализация объемов остатков сырья типа  $l = 1$  каждый день



$$-b_{2m}(e) - \frac{\sum_e b_{2m}(e)}{E}$$

Рисунок 6 – Визуализация объемов остатков сырья типа  $l = 2$  каждый день



$$-\sum_l b_{lm}(e) - \frac{\sum_{e,l} b_{lm}(e)}{E}$$

Рисунок 7 – Визуализация суммарных объемов остатков сырья каждый день

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны полученной модели.

1. *Отрицательные стороны:*

1.1. В реальном производстве в процессе планирования едва можно представить себе ситуацию, когда менеджеры ответственные за принятия решений могут знать реальное распределение во времени лотов со всеми их характеристиками;

1.2. Быстро растущее количество ограничений из-за линейности модели [24];

1.3. Для каждого дня необходимо знать параметры  $a_m, \delta_m$ , которые могут меняться с течением лет;

1.4. Нет четкого объяснения о допустимости использования логнормального распределения величины пройденного расстояния лотом;

1.5. Параметр  $\beta$  должен также изменяться во времени, потому что летом изменения показателя полезного объема сырья падает быстрее под воздействием температуры, влаги и механического воздействия насекомых [29];

1.6. В реальных условиях ограничение (12) должно в себя включать в качестве верхней оценки значение  $\min(H_{km}, Q_{km})$ , где  $Q_{km}$  – это спрос на товары типа  $k$  в день  $m$ , что значительно позволит уточнить решение задачи;

1.7. Нет выбора допустимости степени риска, что крайне важно в выборе стратегии формирования «сырьевого портфеля» в современных условиях;

1.8. Предприятия лесопромышленной отрасли не всегда используют в качестве источника сырья только биржу, но зачастую применяются прямые договора B2B, которые нивелируют риски – этой возможности в модели не присутствует.

2. *Положительные стороны:*

2.1. Для верхней оценки прибыльности производства даже масштаба крупнейшей компании лесопромышленного сектора РФ «Сегежа»<sup>5</sup> при достаточно больших значениях количества сырья, лотов и регионов на бирже данная модель может быть эффективна с горизонтом планирования 1 год, что является самым часто встречающимся на предприятиях этой отрасли [23, 24, 25, 26];

2.2. Концептуальная простота модели;

2.3. Возможность учета времени в пути лота;

2.4. Наличие коэффициента полезного объема сырья для производства;

2.5. Наличие известных методов оптимизации для задач линейного программирования [29];

Таким образом, можно утверждать, что *гипотеза* о существовании модели, которая позволяет оценить верхнюю оценку оптимального значения прибыли для предприятия лесопромышленной отрасли при взаимодействии с товарно-сырьевой биржей, *подтверждается* и, инструмент оценки может быть разработан – его пример приводится в данной статье.

### **Заключение**

В работе представлена модель, позволяющая определять по уже имеющимся данным о распределении лотов во времени верхнюю границу прибыли и отличающуюся возможностью учета, во-первых, времени в пути лотов и оценкой степенью их полезного объема для дальнейшей переработки. Модель учитывает множество наиболее важных факторов для лесопромышленного производства: формирование цепочек поставок сырья и объемов производства ОСБ плит силами предприятия. Используется исключительно бюджет предприятия. Также модель учитывает схему работы биржи, а именно: схему ведения покупки лота – только целиком. Решением модели является посуточное производство каждого типа товара, ежедневное состояние бюджета, список цепочек поставок в пути, уровень запаса сырья на складе с учетом его вместимости и неприкосновенного запаса. Формирование цепочек поставок сырья происходит в соответствии с политикой «just-in-time». Процесс поиска оптимального решения происходит автоматически по заранее выбранному алгоритму оптимизации. С практической точки зрения модель представляет собой интерес для топ-менеджмента предприятия лесопромышленной отрасли, которые заинтересованы в оценке эффективности деятельности своего предприятия. С теоретической точки

---

<sup>5</sup> ПАО «Сегежа Групп» Segezha Group PJSC. Официальный сайт: [ <https://segezha-group.com/about/> ]



зрения модель вносит в развитие раздела экономико-математического раздела экономических наук, в частности, в теорию принятия решения.

Апробация модели проведена на примере одного из крупных лесоперерабатывающих предприятий Приморского края. На основе проведенных расчетов и найденного решения модели сформулированы рекомендации для управляющего звена компании по сотрудничеству с товарно-сырьевой биржей России. Анализ решения показал, что, несмотря на территориальную близость Иркутской области и Республики Бурятия к Приморскому краю, стоит обратить внимание на покупку сырья из Московской области и Пермского края, что идет в разрез с некоторыми другими результатами исследований в рассматриваемой области. Интерес во взаимодействии с этими двумя регионами вызван отсутствием спроса со стороны крупных стран импортеров леса, например КНР и удаленности от границ РФ, что сказывается на ценах на ресурсы. Однако, помимо этого выявлено, что закуп сырья с Иркутской области и Республики Бурятия целесообразен тогда и только тогда, когда выполняется одновременно два условия: нет других регионов, откуда возможно закупить сырье, и предприятие находится в начале своего горизонта планирования. В целом приведенные расчеты позволяют сделать выводы о возможности рациональных закупок сырья на товарно-сырьевой бирже России.

Для уточнения верхней оценки значения прибыли имеет смысл введения дополнительных ограничений, связанных с технологиями производства, допустимости степени риска, уточнение расчетов некоторых параметров (например,  $a_m, \delta_m, \beta$ ), влияющих на время в пути и на рабочий объем сырья по приходу на склад, нивелирование транспортных и ресурсных рисков за счёт возможности закупа сырья по прямым контрактам с делянами, введения функции спроса на конечные товары. Рассмотрены положительные и отрицательные стороны модели.

### Список литературы

1. Ghasemy Y.R. Enhancing supply chain production-marketing planning with geometric multivariate demand function (a case study of textile industry) // Computers & Industrial Engineering. 2020. Vol. 140. Article ID 106220.
2. Maina J., Mwangangi P.W. A Critical Review of Simulation Applications in Supply Chain Management // Journal of Logistics Management. 2020. Vol. 9. pp. 1-6. DOI: 10.5923/j.logistics.20200901.01
3. Brintrup A., Pak J., Ratiney D., Pearce T., Wichmann P., Woodall P., McFarlane D. Supply chain data analytics for predicting supplier disruptions: a case study in complex asset manufacturing // International Journal of Production Research. 2020. Vol. 58. Pp. 3330-3341. DOI: 10.1080/00207543.2019.1685705
4. Dominguez R., Cannella S. Insights on Multi-Agent Systems Applications for Supply Chain Management // Sustainability. 2020. Vol. 12. Article ID 1935. DOI: 10.3390/su12051935
5. Luigi R., Stamova I.M., Tomasiello S. Numerical schemes and genetic algorithms for the optimal control of a continuous model of supply chains // Applied

- Mathematics and Computation. 2021. Vol. 388. Article ID: 125464. DOI: 10.1016/j.amc.2020.125464
6. El Raoui H., Oudani M., El Hilali Alaoui A. Coupling Soft Computing, Simulation and Optimization in Supply Chain Applications: Review and Taxonomy // IEEE Access. 2020. Vol. 8. pp. 31710-31732. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973329.
  7. Alkahtani M. Mathematical Modelling of Inventory and Process Outsourcing for Optimization of Supply Chain Management // Mathematics. 2022. Vol 10. Article ID 1142. DOI: 10.3390/math10071142
  8. Sadeghi Z., Boyer O., Sharifzadeh S., Saeidi N. A Robust Mathematical Model for Sustainable and Resilient Supply Chain Network Design: Preparing a Supply Chain to Deal with Disruptions // Complexity. 2021. Pp. 1-17.
  9. Goodarzian F., Shishebori D., Nasserli H., Dadvar F. A bi-objective production-distribution problem in a supply chain network under grey flexible conditions // RAIRO Operations Research. 2021. Vol. 55. Pp.1287-1316.
  10. Taghizadeh-Yazdi M., Farrokhi Z., Mohammadi-Balani A. An integrated inventory model for multi-echelon supply chains with deteriorating items: a price-dependent demand approach // Journal of Industrial and Production Engineering Vol. 37. Pp. 87 - 96.
  11. Flores-Sigüenza P., Marmolejo-Saucedo J.A., Niembro-García J., Lopez-Sanchez V.M. A systematic literature review of quantitative models for sustainable supply chain management // Mathematical biosciences and engineering: MBE. 2021. Vol. 18. Pp. 2206-2229.
  12. Escobar J.W., Marin A.A., Lince J.D. Multi-objective mathematical model for the redesign of supply chains considering financial criteria optimization and scenarios // International Journal of Mathematics in Operational Research. 2020. Vol. 16. Pp. 238-256.
  13. Fierro L. H., Cano R. E., García J. I. Modelling of a multi-agent supply chain management system using Colored Petri Nets // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 42. Pp. 288-295. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.095
  14. Heydari J., Rafiei P. Integration of environmental and social responsibilities in managing supply chains: A mathematical modeling approach // Computers & Industrial Engineering. 2020. Vol. 145. Article ID 106495. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106495
  15. Schroeder M., Lodemann S. A Systematic Investigation of the Integration of Machine Learning into Supply Chain Risk Management // Logistics. 2021. Vol. 5. Article ID 62. DOI: 10.3390/logistics5030062
  16. Nishanth B., Priyanka S., Kannan V., Muhammad Raheel Basha A., Dinesh J., Muruganandham R., Harish V. Mathematical modelling of supply chain under current COVID'19 business scenario with the review study on the fuzzy logic based supply chains // European Journal of Molecular and Clinical Medicine. 2020. Vol. 7. Pp. 1-10.
  17. Saadi E., Hafshejani K.F., Radfar R. Designing and Developing a multi - level supply chain mathematical model, multi products, multi objective of supplier

selection considering simultaneous overall - incremental Discount. Corpus ID: 226097431

18. Teixeira A., Silva E.C., Lopes C. A mixed integer nonlinear multiperiod model for supply chain management of a company in the retail sector // *RAIRO - Operations Research*. 2021. Vol. 55. Pp. 997-1013. DOI: 10.1051/ro/2021048

19. Nuñez Rodriguez J., Andrade Sosa H.H., Villarreal Archila S.M., Ortiz A. System Dynamics Modeling in Additive Manufacturing Supply Chain Management // *Processes*. 2021. Vol. 9. Article ID: 982. DOI: 10.3390/pr9060982

20. Rezaei E., Paydar M.M., Safaei A.S. Customer relationship management and new product development in designing a robust supply chain // *RAIRO - Operations Research*. 2020. Vol. 54. Pp. 369-391. DOI: 10.1051/ro/2018107

21. Nezamoddini N., Gholami A., Aqlan F. A risk-based optimization framework for integrated supply chains using genetic algorithm and artificial neural networks // *International Journal of Production Economics* 2020. Vol. 225. Article ID: 107569. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107569

22. Cesarelli G., Scala A.E., Vecchione D., Ponsiglione A., Guizzi G. An Innovative Business Model for a Multi-echelon Supply Chain Inventory Management Pattern // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1828. Pp. 1-10. DOI 10.1088/1742-6596/1828/1/012082

23. Рогулин Р.С., Мазелис Л.С. Алгоритм и математическая модель формирования устойчивых цепочек поставок древесного сырья из регионов России: сравнение и анализ // *Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика»*. 2020. Том 15. № 3. С. 385–404. doi: 10.17072/1994-9960-2020-3-385-404

24. Рогулин Р.С. Моделирование перспектив взаимодействия предприятия лесопромышленного комплекса и товарно-сырьевой биржи России // *Journal of Applied Economic Research*. 2020. Т. 19, № 4. С. 489–511. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.4.023.

25. Рогулин Р.С. Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом // *Бизнес-информатика*. 2020. Т. 14. № 4. С. 19–35. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.4.19.35

26. Рогулин Р. С. Место ИКТ и предпринимательства в формировании устойчивых цепочек поставок // *Экономическая политика*. 2021. Т. 16. № 4. С. 84–103. DOI: 10.18288/1994-5124-2021-4-84-103

27. Рогулин Р. С. Математическая модель формирования ценовой политики и плана производственно-транспортной системы лесопромышленного предприятия // *Бизнес-информатика*. 2021. Т. 15. № 3. С. 60–77. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.60.77

28. Рогулин Р. С. Роль информационно-коммуникационных технологий в формировании устойчивых цепочек поставок до и после пандемии covid-19 // *Journal of Applied Economic Research*. 2021. Т. 20. № 3. С. 461–488. DOI: 10.15826/vestnik.2021.20.3.019

29. Mazelis, L., Rogulin, R. (2021). Devising a method for the formation of sustainable chains of supply of raw materials from mercantile exchange to a timber processing enterprise considering uncertainties and risks // *Eastern-European*

Journal of Enterprise Technologies, 5 (3 (113)), 6–18. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242960