Научная статья

https://doi.org/10.54220/v.rsue.1991-0533.2025.92.4.006
УДК 330.46

ЗАДАЧА ВЫБОРА КАНАЛОВ ПОСТАВОК И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ПОСТАВОК С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ

Бочкарев А. А.*[1], *Нос В. А.*[1]
[1] *Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия*
** hocvik@yandex.ru*

Аннотация. *Введение.* В статье рассматриваются содержательная и математическая постановка задачи выбора каналов поставок и определения оптимального плана поставок с учетом надежности как задачи линейного программирования. Оптимизация цепей поставок в условиях необходимости обеспечения надежности требует построения сложных стохастических моделей, решение которых зачастую представляет значительные вычислительные трудности. Альтернативой является декомпозиция задачи на два этапа: оценка структурной надежности сети и последующая оптимизация плана поставок. Это обосновывает актуальность данного подхода в контексте реализации крупных проектов ПАО «Газпром» на полуострове Ямал, характеризующихся сложной многоуровневой транспортно-логистической инфраструктурой. *Материалы и методы.* Методическая часть включает содержательную и математическую постановку задачи выбора каналов поставок и формирования оптимального плана поставок. Описание транспортной инфраструктуры, используемой для доставки грузов на Бованенковское ГКМ, структурировано по трем уровням: межрегиональному, региональному и локальному. Рассмотрены девять возможных схем доставки, зависящих от комбинации морского, речного, железнодорожного и автомобильного транспорта. Математическая модель включает целевую функцию минимизации транспортных затрат, ограничения по спросу, пропускной способности и надежности. Для учета надежности используется модель структурной надежности, а оптимизация выполняется средствами линейного программирования в среде MATLAB. *Результаты исследования.* На реальном примере строительства логистической инфраструктуры при обслуживании перспективных проектов строительства газоконденсатных месторождений (ГКМ) ПАО «Газпром» на полуострове Ямал показана возможность использования симплексного метода линейного программирования для решения задачи выбора каналов поставок и определения оптимального плана поставок с учетом надежности, которая по своей сути является стохастической задачей. *Обсуждение и заключение.* Результаты исследования подтверждают эффективность использования двухэтапного подхода к учету надежности в задачах оптимизации цепей поставок для территориально распределенных и инфраструктурно сложных объектов. Методика позволяет учитывать многовариантность маршрутов и агрегировать показатели надежности на уровне всей сети. Применение разработанной модели к задачам северных территорий, включая проекты ПАО «Газпром» на Ямале, демонстрирует ее практическую значимость и потенциал для дальнейшего использования в планировании поставок, выбора поставщиков и оптимизации транспортно-логистических систем.

Ключевые слова: цепи поставок, надежность, задача выбора каналов поставок, математическая постановка, оптимизация.

Для цитирования: Бочкарев А. А., Нос В. А. Задача выбора каналов поставок и определения оптимального плана поставок с учетом надежности. *Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ).* 2025;4(32):70-82. DOI: 10.54220/v.rsue.1991-0533.2025.92.4.006.

Research article

JEL C61 D81 M11 L23

SELECTION OF SUPPLY CHANNELS AND DETERMINATION OF AN OPTIMAL SUPPLY PLAN CONSIDERING RELIABILITY

Bochkarev A.*[1], *Nos V.*[1]
[1] *St. Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, Russia*
** hocvik@yandex.ru*

Abstract. *Introduction.* The article examines the substantive and mathematical formulation of the problem of selecting supply channels and determining the optimal supply plan with reliability considerations, framed as a linear programming task. Optimizing supply chains under reliability requirements typically demands the development of complex stochastic models, the solution of which often presents significant computational difficulties. An alternative approach is to decompose the problem into two stages: assessing the structural reliability of the network and subsequently optimizing the supply plan. This justifies the relevance of the proposed approach in the context of large-scale projects implemented by PJSC Gazprom on the Yamal Peninsula, which are characterized by a complex multi-level transport and logistics infrastructure. *Materials and methods.* The methodological section includes both the substantive and mathematical formulation of the problem of selecting supply channels and composing an optimal supply plan. The description of the transport infrastructure used for delivering cargo to the Bovanenkovo gas condensate field (GCF) is structured across three levels: interregional, regional, and local. Nine potential delivery schemes are considered, depending on different combinations of maritime, river, rail, and road transport. The mathematical model incorporates an objective function aimed at minimizing transportation costs, as well as constraints on demand, capacity, and reliability. A structural reliability model is applied to account for reliability, while the optimization itself is performed using linear programming tools in MATLAB. *Research results.* Using a real-world example of constructing logistics infrastructure to support prospective gas condensate field development projects of PJSC Gazprom on the Yamal Peninsula, the study demonstrates the feasibility of applying the simplex method of linear programming to solve the problem of selecting supply channels and determining an optimal supply plan with reliability considerations – despite the inherently stochastic nature of this problem. *Discussion and conclusion.* The results confirm the effectiveness of the two-stage approach to incorporating reliability in supply chain optimization for geographically dispersed and infrastructure-intensive systems. The methodology enables the consideration of multiple routing alternatives and the aggregation of reliability indicators at the network-wide level. Applying the developed model to supply planning for northern territories, including PJSC Gazprom's projects on the Yamal Peninsula, demonstrates its practical significance and its potential for further use in supply planning, supplier selection, and broader transport and logistics system optimization.

Keywords: supply chains, reliability, the task of choosing supply channels, mathematical formulation, optimization

For citation: Bochkarev A., Nos V. Selection of Supply Channels and Determination of an Optimal Supply Plan Considering Reliability. *Vestnik of Rostov State University of Economics (RINH).* 2025;4(32):70-82. DOI: 10.54220/v.rsue.1991-0533.2025.92.4.006.

Введение

Многие задачи оптимизации цепей поставок связаны с проблемой обеспечения их надежности. Этой проблеме посвящено большое количество трудов отечественных и зарубежных ученых, в частности одними из наиболее полных работ в этой области являются не переведенные на русский язык монографии Д. Бертсекаса [6] и М. Даскина [7]. В последние годы появилось много новых работ в области оптимизации сетей и цепей поставок. Обзор литературы по проблеме применения моделей и методов для оптимизации сетевой структуры цепей поставок представлен в статье [2]. Проведенный анализ литературных источников позволил разработать укрупненную классификацию методов оптимизации сетевой структуры цепей поставок, в соответствии с которой все методы оптимизации сетевой структуры цепей поставок предложено разбить на две обширные группы, первая из которых включает в себя детерминистические методы, а вторая – стохастические. К группе детерминистических методов относятся линейное программирование, включая смешанное целочисленное линейное программирование (MILP), нелинейное программирование, а также алгоритмы для работы с графами. Группа стохастических методов, в свою очередь, также делится на три большие группы: эвристические методы, метаэвристические методы и имитационное моделирование.

Учет надежности в задачах оптимизации цепей поставок практически всегда приводит к сложным математическим моделям, как правило, стохастическим, оптимизация которых представляет собой серьезную проблему. Существует и другой путь решения проблемы надежности в цепях поставок – декомпозиция общей задачи на две подзадачи, т. е. решение ее в два этапа: 1) построение модели структурной надежности сети поставок и расчет безотказности каналов поставок и всей сети; 2) расчет оптимального плана поставок.

В монографии [1, с. 186-192] на условном примере показано, что разбиение задачи выбора поставщиков и определение оптимального плана поставок по обобщенной аутсорсинговой модели на два этапа позволяет находить решение для цепей поставок, имеющих сложную структуру и жесткие требования к безотказности. Данная методика может быть успешно применена для решения задачи выбора каналов поставок и определения оптимального плана поставок с учетом надежности. В качестве исходных данных рассматриваемой задачи взяты объемы поставок генеральных грузов, оборудования, ГСМ и инертных грузов для строительства Бованенковского ГКМ.

Материалы и методы

Содержательная постановка задачи выбора каналов поставок и определения оптимального плана поставок с учетом надежности

Производственная деятельность промышленных предприятий различного профиля связана с необходимостью осуществления грузовых перевозок при доставке сырья, материалов, полуфабрикатов, готовой продукции. Для удовлетворения потребностей в перевозках создаются транспортные системы и вся необходимая территориальная инфраструктура. Формирование и развитие таких систем тесно связано с особенностями и объемами регионального производства, наличием устойчивых транспортных связей между предприятиями, а также перспективами развития промышленных зон и территорий [5, с. 32]. Сказанное в полной мере относится к формированию территориальной транспортной и логистической инфраструктуры при обслуживании грузопотоков в рамках проектов освоения ГКМ ПАО «Газпром» на полуострове Ямал. При этом под территориальной транспортной и логистической инфраструктурой мы будем понимать совокупность транспортных путей, узлов, складских комплексов и распределительных центров и других элементов инфраструктуры, обеспечивающих возможность эффективного продвижения транспортных и материальных потоков при осуществлении подразделениями ПАО «Газпром» своей деятельности на полуострове Ямал.

Таким образом, территориальную транспортную систему мы будем рассматривать как совокупность источников и потребителей транспортных потоков, взаимодействие которых происходит на базе единой транспортной сети с целью удовлетворения существующих потребностей в грузоперевозках [5, с. 33].

Следует отметить, что магистральная, локальная и корпоративная транспортная и логистическая инфраструктура ПАО «Газпром» по обеспечению строящихся ГКМ на полуострове Ямал является многоуровневой и включает в себя:

– межрегиональный уровень – магистральная транспортная и логистическая инфраструктура (III пояс), включающая: 1) поставщиков; 2) участки магистральной доставки железнодорожным транспортом; 3) перевалочные базы на магистральном транспорте / речные порты / морские порты;

– региональный уровень – локальная транспортная и логистическая инфраструктура (II пояс), включающая: 1) участок доставки морским транспортом по маршруту Архангельск – Харасавэй; 2) участок доставки железнодорожным транспортом по ведомственной железнодорожной линии; 3) участки доставки автомобильным транспортом с использованием зимников; 4) участки доставки автомобильным транспортом с использованием всесезонных автомобильных дорог; 5) перевалочные базы / речные порты / морские порты на полуострове Ямал (преимущественно корпоративного уровня);

– местный уровень – корпоративная транспортная и логистическая инфраструктура (I пояс), включающая: 1) участки доставки автомобильным транспортом с использованием зимников; 2) участки доставки автомобильным транспортом с использованием всесезонных автомобильных дорог; 3) участок доставки железнодорожным транспортом; 4) временные и постоянные базы хранения на ГКМ; 5) участки доставки на места строительства автомобильным транспортом с использованием зимников; 6) строящиеся газоконденсатные месторождения.

Рассмотрим содержательную постановку на примере уже введенного в эксплуатацию Бованенковского ГКМ. Бованенковское месторождение расположено на полуострове Ямал на расстоянии 120 км от побережья Карского моря.

Доставка грузов для обустройства и эксплуатации Бованенковского месторождения осуществляется: 1) морским транспортом из Архангельского морского торгового порта (ОАО «АМТП») в портопункт Харасавэй или до рейда реки Мордыяха; 2) речным транспортом от причала Лабытнангской базы ПТОиК до портопункта Харсавэй или с причалов Сергино, Тюмень, Тобольск, Сургут до портопункта Харсавэй; 3) ж/д транспортом до железнодорожной станции Бованенково и далее автотранспортом по зимней автодороге до промбазы Бованенковского ГКМ (ПБ БГКМ). Если используется морской или речной путь доставки, то на конечном этапе возможна доставка как водным (речным) транспортом, так и автотранспортом по зимней автодороге, поэтому всего имеется девять вариантов доставки.

Морской путь

Схема № 1 (А): Архангельск – Харасавэй – Бованенково (доставка по автозимнику на конечном участке);

Схема № 1 (Б): Архангельск – Харасавэй – Бованенково (доставка водным транспортом на конечном участке);

Схема № 1 (В): Архангельск – рейд р. Мордыяха – Бованенково (доставка водным транспортом на конечном участке);

Схема № 1 (Г): Архангельск – Харасавэй (припай) – Бованенково (доставка по автозимнику на конечном участке).

Речной путь

Схема № 2 (А): Лабытнанги – Харасавэй – Бованенково (доставка водным транспортом на конечном участке);

Схема № 2 (Б): Лабытнанги – Харасавэй – Бованенково (доставка по автозимнику на конечном участке);

Схема № 2 (В): Сергино – Харасавэй – Бованенково (доставка водным транспортом на конечном участке);

Схема № 2 (Г): Сергино – Харасавэй – Бованенково (доставка по автозимнику на конечном участке).

Железнодорожный путь

Схема № 3: Лабытнанги – ж/д ст. Хралов (ж/д ст. Бованенково с 2010 г.) – Бованенково (доставка по автозимнику на конечном участке).

Принципиальные схемы доставки строительных материалов и оборудования для строительства Бованенковского ГКМ представлены на рисунке 1: толстые стрелки и числа в квадратных скобках, выделенные полужирным шрифтом, означают объемы поставок морским, речным и железнодорожным транспортом, а также спрос конечного потребителя, которым является ПБ БГКМ, тонкие стрелки и числа в квадратных скобках, расположенные рядом с этими стрелками, означают направления грузопотоков и пропускные способности отдельных участков транспортной сети.

Математическая постановка задачи выбора каналов поставок и определения оптимального плана поставок с учетом надежности

Математическая постановка рассматриваемой задачи заключается в том, что необходимо найти значения неотрицательных переменных $x_j, j = 1,2,\dots,n$, доставляющих минимум целевой функции (1)

$$L = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \to \min, \quad (1)$$

при ограничениях (2)-(4)

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} aeq_j \cdot x_j = Q_0, j = 1,\dots,n; & (2) \\ \sum_{j=1}^{n} a_{i,j} \cdot x_{i,j} \le b_i, j = 1,\dots,n; & (3) \\ P_0 = \varphi(P_1, P_2, \dots, P_n) \ge P_{\text{opt}}^*, & (4) \end{cases}$$

где c_j – средняя стоимость доставки одной тонны груза по j-му каналу поставок, руб./т;

aeq_j – коэффициенты системы ограничений, имеющих вид равенств;

$a_{i,j}$ – коэффициенты системы ограничений, имеющих вид неравенств;

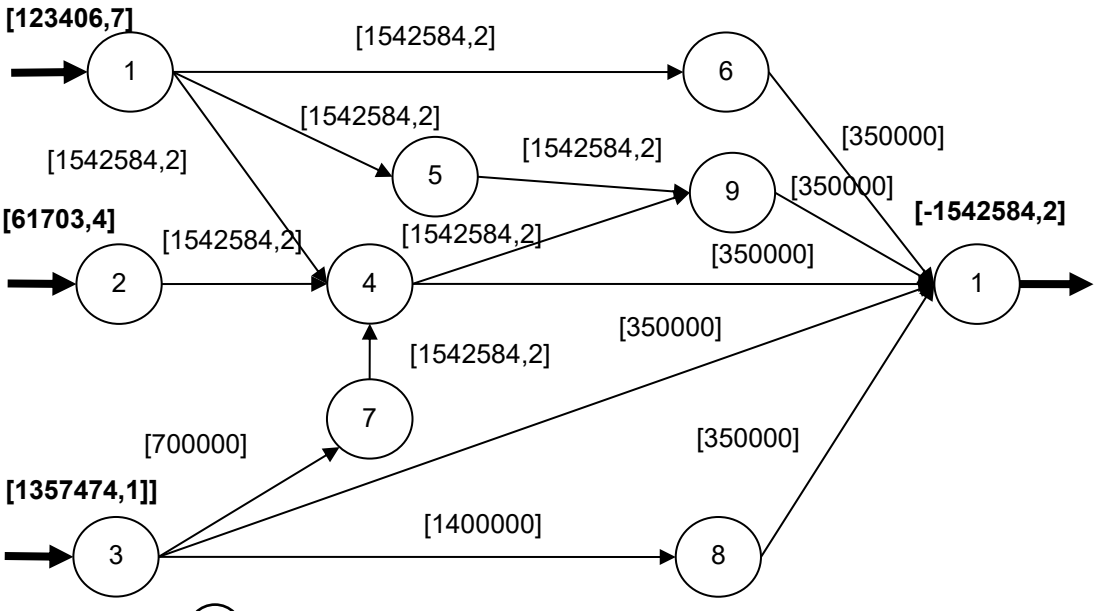
x_j – переменная – оптимальная величина по j-му каналу поставок, т;

Q_0 – плановый годовой объем поставок, т;

q_j – максимально возможный объем поставок по j-му каналу поставок, т;

$P_0 = \varphi(P_1, P_2, \dots, P_n)$ – функция, определяемая схемой структурной надежности;

P_{opt}^* – требуемый уровень надежности (безотказности) цепи поставок.



Условные обозначения: ◯ – элементы транспортной схемы; 1 – морской порт Архангельск; 2 – речной порт Сергино; 3 – ж/д ст. Лабытнанги; 4 – портопункт Харасавэй; 5 – рейд р. Мордыяха; 6 – портопункт Харасавэй (припай); 7 – речной порт Лабытнанги; 8 – ж/д ст. Бованенково; 9 – причал Бованенково; 10 – ПБ БГКМ

Рисунок 1 – **Принципиальные схемы доставки строительных материалов и оборудования для строительства Бованенковского ГКМ**

Figure 1 – **Schematic diagrams of the delivery of building materials and equipment for the construction of the Bovanenkovsky GKM**

Целевая функция (1) представляет собой сумму затрат на доставку материально-технических ресурсов в объеме Q_0 по всем j-м каналам поставок.

Ограничения вида (2) требуют, чтобы суммарная величина объема поставок по всем j-м каналам строго была равна величине суммарного спроса потребителей Q_0.

Ограничения вида (3) требуют, чтобы поставки по j-му каналу не превышали бы мощность (пропускную способность) этого канала.

Ограничения вида (4) – это ограничения по надежности (безотказности) цепи поставок, которые требуют, чтобы надежность или вероятность безотказной работы P_0 была бы не меньше некоторой величины P^*_{opt}.

Задача (1) – (4) не является задачей линейного программирования ввиду наличия в системе ограничений нелинейного ограничения вида (4), но, как было указано выше, она может быть сведена к задаче линейного программирования путем декомпозиции общей задачи на две подзадачи: 1) построение модели структурной надежности сети поставок и расчет безотказности каналов поставок и всей сети; 2) расчет оптимального плана поставок.

Результаты исследования

Пример численного решения задачи и анализ результатов

Фактические объемы поставок строительных материалов и оборудования для строительства Бованенковского ГКМ по различным маршрутам представлены в таблице 1.

Таблица 1 – **Плановые объемы поставок материально-технических ресурсов для строительства Бованенковского ГКМ по различным маршрутам** [4]

Table 1 – **Planned volumes of supplies of material and technical resources for the construction of the Bovanenkovsky GKM along various routes** [4]

Доставка МТР по направлениям	**Тонны**	**Относительная доля, % от Q_0**
Плановый годовой объем поставок Q_0, т	1 542 584,2	100,0
1. Доставка МТР из Архангельска	123 406,7	8,0
в том числе:		
портопункт Харасавэй	77 129,2	5,0
рейд р. Мордыяха	15 425,8	1,0
п. Харасавэй (припай)	30 851,7	2,0
Доставка МТР из Харасавэя (а/т)	231 387,6	15,0
Доставка МТР из Харасавэя (река)	46 277,5	3,0
2. Доставка МТР из Лабытнанги (река)	107 980,9	7,0
3. Доставка МТР из Сергино (река)	61 703,4	4,0
4. Доставка МТР из Лабытнанги (ж/д)	1 064 383,1	69,0
5. Доставка МТР из Лабытнанги (а/т)	185 110,1	12,0
Итого (1 + 2 + 3 + 4 + 5):	**1 542 584,2**	**100,0**

Данные, представленные в таблице 1, соответствуют году с максимальными ежегодными объемами поставок материально-технических ресурсов за весь период строительства Бованенковского ГКМ.

Исходный сетевой граф рассматриваемой задачи представлен на рисунке 1, а пропускная способность дуг сетевого графа – в таблице 2.

Таблица 2 – **Пропускная способность транспортной и логистической инфраструктуры ПАО «Газпром» на полуострове Ямал** [4]
Table 2 – **Capacity of Gazprom's transport and logistics infrastructure on the Yamal Peninsula** [4]

Вершина начало *v*(*i*)		**Вершина конец *v*(*j*)**		**Пропускная способность дуги *c*(*i*,*j*)**
Обозначение	Описание	Обозначение	Описание	
1	морской порт Архангельск	4	портопункт Харасавэй	1 542 584,2[1]
1	морской порт Архангельск	5	рейд р. Мордыяха	1 542 584,2[1]
1	морской порт Архангельск	6	портопункт Харасавэй (припай)	1 542 584,2[1]
2	речной порт Сергино	4	портопункт Харасавэй	1 542 584,2[1]
3	ж/д ст. Лабытнанги	7	речной порт Лабытнанги	700 000,0[2]
3	ж/д ст. Лабытнанги	8	ж/д ст. Бованенково	1 400 000,0[3]
3	ж/д ст. Лабытнанги	10	ПБ БГКМ	350 000[4]
4	портопункт Харасавэй	9	причал Бованенково	1 542 584,2[1]
4	портопункт Харасавэй	10	ПБ БГКМ	350 000[4]
5	рейд р. Мордыяха	9	причал Бованенково	1 542 584,2[1]
6	портопункт Харасавэй (припай)	10	ПБ БГКМ	350 000[4]
7	речной порт Лабытнанги	4	портопункт Харасавэй	1 542 584,2[1]
8	ж/д ст. Бованенково	10	ПБ БГКМ	350 000[4]
9	причал Бованенково	10	ПБ БГКМ	350 000[4]

Примечания:

1. Пропускная способность участков транспортной сети от вершины $v(i)$ до вершины $v(j)$ – (1,4), (1,5), (1,6), (2,4), (4,9), (5,9) и (7,4) принята неограниченной, т. е. по данным участкам транспортной сети может быть перевезен весь плановый годовой объем поставок Q_0.

2. Пропускная способность речного порта Лабытнанги принята равной 700 000,0 т в год;

3. Пропускная способность железнодорожной ветки в направлении ж/д ст. Лабытнанги – ж/д ст. Бованенково принята равной 1 400 000,0 т в год;

4. Пропускная способность автозимников принята равной 350 000,0 т.

Решение

Этап 1. Построение модели структурной надежности сети поставок и расчет безотказности каналов поставок и всей сети.

Структурные схемы надежности независимых каналов поставок рассматриваемой транспортной сети представлены на рисунке 2.

Главным ограничением в рассматриваемой задаче является ограниченная пропускная способность автозимников, составляющая 350 000,0 т в год. Следовательно, независимые каналы поставок могут включать только маршруты доставки, в которых на конечном участке доставка осуществляется по разным зимним автодорогам.

Примем надежность поставок железнодорожным транспортом равной 0,99, водным транспортом (морским и речным) – 0,98, а автомобильным транспортом – 0,95.

Данные о надежности поставок по отдельным участкам рассматриваемой транспортнойсети представлены на рисунке 2 (числа рядом со стрелками, означающими направления грузопотоков).

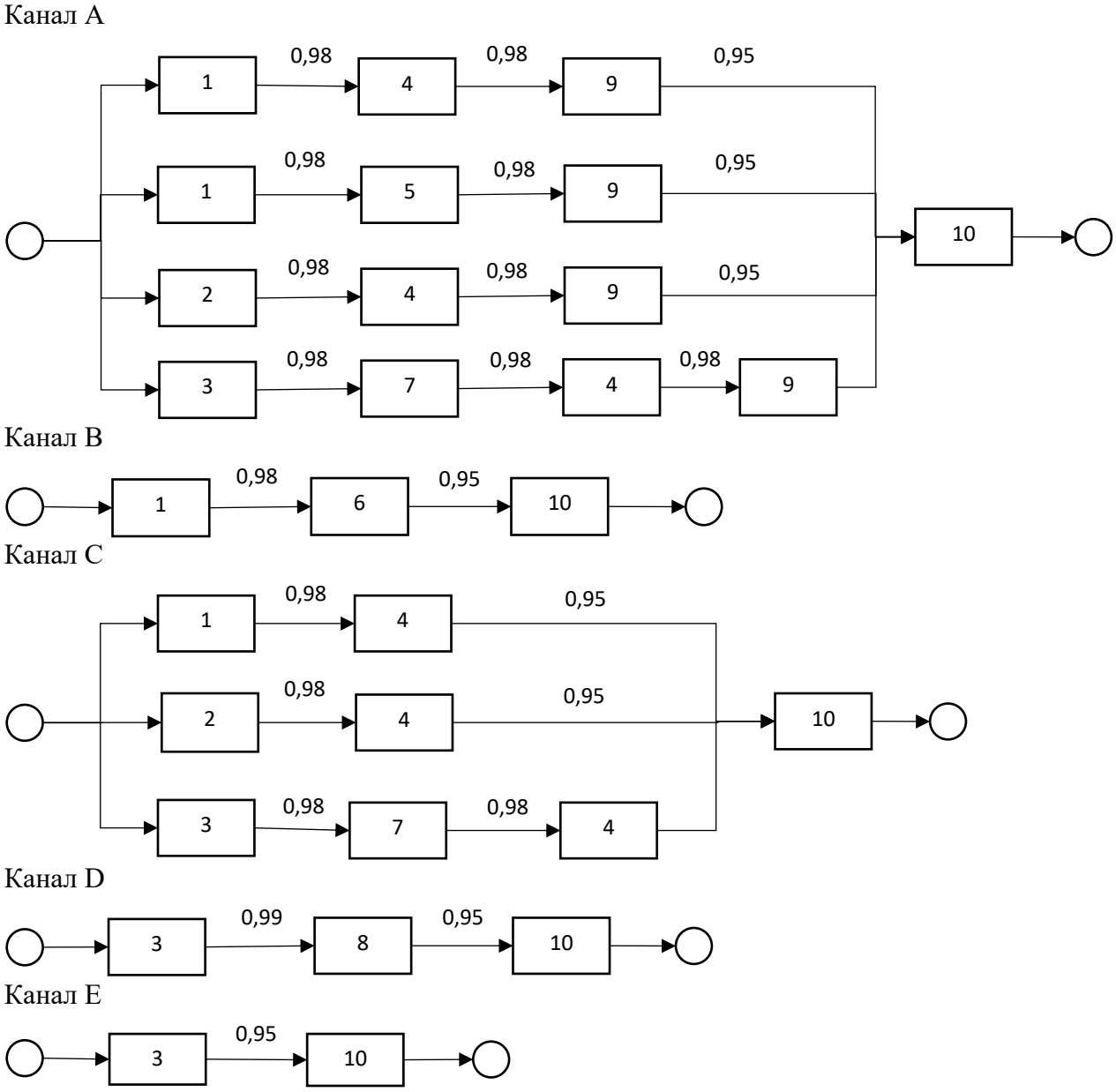


Рисунок 2 – **Независимые каналы поставок в рассматриваемой задаче**
Figure 2 – **Independent supply channels in the problem under consideration**

В книге А. М. Половко и С. В. Гурова [3, с. 256-261] представлены формулы расчета вероятности безотказной работы системы с различными способами резервирования отдельных элементов системы, некоторые из них используются для расчета надежности независимых каналов поставок *P*(A), *P*(B), *P*(C), *P*(D), *P*(E) и надежности сети поставок *P*(ABCDE), представленного в таблице 3.

Расчет надежности поставки по каналам, включенным в сеть поставок последовательно, ведется по формуле:

$$P_{\text{канала}} = \prod_{j=1}^{n} P_{i,j},$$

где $P_{i,j}$ – надежность поставки по участку транспортной сети от пункта *i* до пункта *j*.

Таблица 3 – **Расчет надежности независимых каналов поставок *P*(A), *P*(B), *P*(C), *P*(D), *P*(E) и надежности сети поставок *P*(ABCDE)**
Table 3 – **Calculation of the reliability of independent supply chains *P*(A), *P*(B), *P*(C), *P*(D), *P*(E) and the reliability of the supply chain *P*(ABCDE)**

Каналы поставок	**Надежность поставки от пункта *i* до пункта *j***														**$P_{\text{канала}}$**
	p(1,4)	p(1,5)	p(1,6)	p(2,4)	p(3,7)	p(3,8)	p(3,10)	p(4,9)	p(4,10)	p(5,9)	p(6,10)	p(7,4)	p(8,10)	p(9,10)	
	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,95	0,98	0,95	0,98	0,95	0,98	0,95	0,95	
P(1,4,9)	0,98							0,98							0,9604
P(1,5,9)		0,98								0,98					0,9604
P(2,4,9)				0,98				0,98							0,9604
P(3,7,4,9)					0,98			0,98				0,98			0,9412
***P*(A)**														**0,95**	**0,95**
***P*(B)**			**0,98**								**0,95**				**0,931**
P(1,4)	0,98														0,98
P(2,4)				0,98											0,98
P(3,7,4)					0,98							0,98			0,9604
***P*(C)**									**0,95**						**0,95**
***P*(D)**						**0,99**							**0,95**		**0,9405**
***P*(E)**							**0,95**								**0,95**
***P*(ABCDE)**															**1,0000**

Расчет надежности поставки по каналам, включенным в сеть поставок параллельно, ведется по формуле:

$$P_{\text{канала}} = 1 - \left(1 - \prod_{j=1}^{n-1} P_{i,j}\right) \times P_{n-1,n},$$

где $P_{i,j}$ – надежность поставки по участку транспортной сети от пункта *i* до пункта *j*; $P_{n-1,n}$ – надежность поставки по автозимнику на конечном участке доставки.

Расчет надежности всей сети, с учетом того, что каналы поставок являются независимыми и включены в сеть поставок параллельно, ведется по формуле:

$$P_{\text{сети}} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^{m} P_{i-\text{го канала}}\right).$$

Пример расчета для канала А представлен ниже.

$$P_{(1,4;4,9)} = 0{,}98 \times 0{,}98 = 0{,}9604;$$
$$P_{(1,5;5,9)} = 0{,}98 \times 0{,}98 = 0{,}9604;$$
$$P_{(2,4;4,9)} = 0{,}98 \times 0{,}98 = 0{,}9604;$$
$$P_{(3,7;7,4;4,9)} = 0{,}98 \times 0{,}98 \times 0{,}98 = 0{,}9412;$$
$$P(A) = 1 - \begin{pmatrix}(1 - 0{,}9604) \times (1 - 0{,}9604) \times (1 - 0{,}9604) \\ \times (1 - 0{,}9604) \times (1 - 0{,}9412)\end{pmatrix} \times 095 = 0{,}95.$$

Расчет надежности поставок по остальным каналам аналогичен.

Расчет надежности сети поставок *P*(*ABCDE*) представлен ниже.

$$P(ABCDE) = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^{m} P_{i-\text{го канала}}\right)$$
$$= 1 - \big((1 - 0{,}95) \times (1 - 0{,}931) \times (1 - 0{,}95) \times (1 - 0{,}9405) \times (1 - 0{,}95)\big)$$
$$= 1{,}0000.$$

Таким образом, надежность сети, включающей в себя пять независимых каналов поставок, близка к единице, т. е. является очень высокой.

Этап 2. Расчет оптимального плана поставок.

Исходные данные для расчета оптимального плана поставок представлены в таблице 4.

Таблица 4 – **Исходные данные для расчета оптимального плана поставок**
Table 4 – **Initial data for calculating the optimal supply plan**

Показатель	Канал поставки				
	A	B	C	D	E
Плановый годовой объем поставок Q_0, т	1 542 584,2				
Средняя стоимость доставки одной тонны груза по j-му каналу, руб./т	19 631	25 774	17 789	14 903	24 945
Надежность (вероятность безотказной работы) j-го канала	0,9500	0,9310	0,9500	0,9405	0,9500
Максимальные объемы поставок по j-му каналу, т	350 000	350 000	350 000	350 000	350 000

Оптимальный план поставок находится решением следующей индивидуальной задачи линейного программирования. Найти минимум целевой функции

$$L = (19\,631x_1 + 25\,774x_2 + 17\,789x_3 + 14\,903x_4 + 24\,945x_5) \rightarrow \min, \quad (5)$$

при ограничениях

$$1x_1 + 1x_2 + 1x_3 + 1x_4 + 1x_5 = 1542584{,}2; \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_1 \leq 350000; \\ x_2 \leq 350000; \\ x_3 \leq 350000; \\ x_4 \leq 350000; \\ x_5 \leq 350000. \end{cases} \quad (7)$$

Целевая функция (5) представляет собой сумму затрат на доставку материально-технических ресурсов в объеме Q_0 по всем j-м каналам поставок.

Ограничение (6) требует, чтобы суммарная величина объема поставок по всем j-м каналам была строго равна величине суммарного спроса потребителей Q_0. Ограничения (7) требуют, чтобы поставки по j-му каналу не превышали мощность (пропускную способность) этого канала.

Таким образом, рассматриваемая задача представляет собой задачу линейного программирования и может быть решена симплексным методом.

В качестве инструмента решения рассматриваемой задачи используем систему компьютерной математики MATLAB. Теоретические основы постановки и решения задач линейного, целочисленного линейного, смешанного и квадратичного программирования, а также методика их решения в среде MATLAB рассмотрены в монографии [1, с. 66-122].

Рассмотрим высокоуровневую функция linprog, которая используется для решения целочисленной задачи линейного программирования.

Существует несколько форматов вызова функции или форм обращения к функции. Наиболее удобная форма обращения к функции, которую мы часто будем использовать, имеет вид:

[xmin, Lmin] =
linprog(c,A,b,Aeq,beq,lb,ub),

где [xmin, Lmin] – вывод результата решения задачи в виде вектора-столбца переменных xmin и оптимального (минимального) значения целевой функции Lmin;
linprog – вызов высокоуровневой функции, в которой используется решатель для линейного программирования;
c – вектор коэффициентов целевой функции;
A – матрица коэффициентов системы ограничений, имеющих вид неравенств;
b – вектор правой части системы ограничений, имеющих вид неравенств;
Aeq – матрица коэффициентов системы ограничений, имеющих вид уравнений;
beq – вектор правой части системы ограничений, имеющих вид уравнений;

lb – ограничения на переменные снизу;
ub – ограничения на переменные сверху.

Функция всегда ищет минимум целевой функции. Для поиска максимума вводят новую целевую функцию -L, что соответствует замене c = -c, и изменяют знак результата на обратный:

$$Lmax = -Lmin.$$

Скалярная формулировка рассматриваемой задачи представлена выше (см. формулы (5) – (7)). Отметим, что задача (5) – (7) решается на минимум целевой функции. Также в этой задаче отсутствуют ограничения в виде неравенств, за исключением ограничений, накладываемых сверху на переменные xmin. Представим исходные данные этой задачи в матричном виде.

Вектор коэффициентов ограничения по объему поставок:

$$Aeq = [1;\ \ 1;\ \ 1; 1;\ 1].$$

Правая часть ограничения по объему поставок:

$$beq = [1542584{,}2].$$

Вектор-столбец ограничений на переменные сверху:

$$ub = [350000;\ \ 350000;\ \ 350000; 350000;\ 350000].$$

Вектор-столбец коэффициентов целевой функции:

$$c = [19631;\ 25774;\ 17789;\ 14903;\ 24945].$$

Решения рассматриваемой задачи в MATLAB может быть реализовано в m-файле, который представлен ниже.

```
% Задача определения оптимального плана поставок
% Задание коэффициентов ограничений по объему поставок
Aeq = ones(1, 5);
% Правая часть ограничения по объему поставок
beq = [1542584.2];
% Определение коэффициентов целевой функции
c = [19631; 25774; 17789; 14903; 24945];
% Задание ограничений сверх на переменные
ub = [350000; 350000; 350000; 350000; 350000];
% Решение и вывод результата в командное окно
[xmin, Lmin] = linprog(c,[],[],Aeq,beq,[],ub)
```

Результаты решения задачи выводятся в командное окно в виде:

```
>> example
Optimal solution found.
xmin =  1.0e+05 *  3.5000
 1.4258
 3.5000
 3.5000
 3.5000
Lmin = 3.0719e+10
```

Таким образом, получено следующее решение: поставки по каналам A, C, D и E должны составлять 350 тыс. т, т. е. соответствовать пропускной способности автозимников; поставки по каналу B должны составлять 142,58 тыс. т, что меньше пропускной способности автозимника, но средняя стоимость доставки одной тонны груза по каналу B – наивысшая среди всех альтернативных вариантов доставки.

Суммарные затраты на доставку материально-технических ресурсов составят 30 719 млн руб. в год.

Следует отметить, что в рассматриваемом примере суммарная пропускная способность всех каналов (ограниченная пропускной способностью автозимников) составляет 35 000 × 5 = 1 750 000 т, поэтому ни один из пяти независимых каналов поставок не может быть исключен, так как при его исключении суммарная пропускная способность сети будет меньше величины планового годового объема поставок Q_0.

Следовательно, в рассматриваемом решении имеем ненулевые объемы поставок по всем независимым каналам. Если же суммарная пропускная способность всех независимых каналов будет намного превышать величину планового годового объема поставок Q_0, то в процессе решения задачи объемы поставок по каналу, имеющему максимальную среднюю стоимость доставки одной тонны груза, будут равны нулю.

Обсуждение и заключение

Задача выбора каналов поставок и определения оптимального плана поставок с учетом их надежности является стохастической задачей, оптимизация которой с математической точки зрения представляет собой серьезную проблему. Предложен метод решения данной задачи путем декомпозиции общей задачи на две подзадачи: 1) построение модели структурной надежности сети поставок и расчет безотказности каналов поставок и всей сети; 2) расчет оптимального плана поставок.

Дана содержательная и математическая постановка задачи выбора каналов поставок и определения оптимального плана поставок с учетом надежности. Рассмотрен пример численного решения данной задачи на основе реальных данных о плановых объемах поставок строительных материалов и оборудования для строительства Бованенковского ГКМ по различным маршрутам.

Показано, что декомпозиция данной задачи на две подзадачи и решение ее в два этапа: во-первых, построение модели структурной надежности сети поставок и расчет безотказности каналов поставок и всей сети, во-вторых, нахождение оптимального плана поставок как результата решения задачи линейного программирования, позволяют находить решение для цепей поставок, имеющих сложную структуру и жесткие требования к безотказности.

Список литературы

1. *Бочкарев, А. А., Бочкарев, П. А.* Надежность и устойчивость цепей поставок: модели и алгоритмы. – СПб. : Скифия-принт, 2022. – 200 с.

2. *Бочкарев, А. А., Соловьёв, Д. С.* Проблема оптимизации сетевой структуры цепей поставок и методы ее решения // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2024. – Т. 14, № 5А. – С. 478-487.

3. *Половко, А. М., Гуров, С. В.* Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

4. Проект обустройства сеноманаптских залежей Бованенковского НГКМ. Транспортные схемы доставки грузов: отчет о НИР / ОАО «ВНИПИгаздобыча». – Саратов, 2007. – Т. 16. – 52 с.

5. *Слободянюк, М. Э.* Моделирование транспортных систем. – М. : Горячая линия – Телеком, 2017. – 296 с.

6. *Bertsekas, D. P.* Network Optimization: Continuous and Discrete Models. – Belmont, Massachusetts : Athena Scientific, 1998. – 585 p.

7. *Daskin, M. S.* Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Application. – New York : John Wiley & Sons. Inc., 1995. – 498 p.

References

1. *Bochkarev, A., Bochkarev, P.* Reliability and Stability of Supply Chains: Models and Algorithms. – SPb. : Scifia-print, 2022. – 200 p.

2. *Bochkarev, A., Solovyov, D.* The Problem of Optimizing the Network Structure of Supply Chains and Methods of its Solution // Economics: Yesterday, Today, Tomorrow. – 2024. – Vol. 14, № 5A. – P. 478-487.

3. *Polovko, A., Gurov, S.* Fundamentals of Reliability Theory. – 2nd ed., revised. and add. – SPb. : BHV-Petersburg, 2006. – 704 p.

4. The Project of Development of Cenomanian-Aptian Deposits of Bovanenkovsky NGKM. Transport Schemes for Cargo Delivery : research report / JSC VNIPIgazdobycha. – Saratov, 2007. – Vol. 16. – 52 p.

5. *Slobodyanyuk, M.* Modeling of Transport Systems. – M. : Hotline – Telecom, 2017. – 296 p.

6. *Bertsekas, D. P.* Network Optimization: Continuous and Discrete Models. – Belmont, Massachusetts Athena Scientific, 1998. – 585 p.

7. *Daskin, M. S.* Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Application. – New York : John Wiley & Sons. Inc., 1995. – 498 p.

Об авторах

Бочкарев Андрей Александрович, *доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры логистики и управления цепями поставок, Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия, andreibochkarev4@gmail.com.*

Нос Виктор Анатольевич, *доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры логистики и управления цепями поставок, Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия, hocvik@yandex.ru.*

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

About the Authors

Andrey Bochkarev, *Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Professor of the Department of Logistics and Supply Chain Management, St. Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, Russia, andreibochkarev4@gmail.com.*

Viktor Nos, *Dr. Sci. (Econ.), Professor, Professor of the Department of Logistics and Supply Chain Management, St. Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, Russia, hocvik@yandex.ru.*

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)