

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАТРАТАМИ НА ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕПОЧКАХ РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРЫ

Ростова Е.П., Черкасова Н.А.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,  
Самара, Россия*

rostova.ep@ssau.ru, cherkasova.na@ssau.ru

*Аннотация. Рассмотрена система предприятий, участвующих в технологической цепочке. Центр является производителем конечного продукта и потребителем ресурсов, производимых агентами. Рассмотрены варианты взаимодействия центра и агентов в вопросах управления затратами на предупредительные мероприятия. Сформулированы оптимизационные задачи определения параметров функционирования центра и агентов.*

*Ключевые слова: риск, предупредительные мероприятия, технологическая цепочка, центр, агенты, управление затратами, оптимизация.*

## Введение

Управление рисками в условиях постоянно изменяющихся внешнеэкономических и внешнеполитических ситуаций становится неотъемлемой частью стратегического планирования экономических субъектов различного уровня. Вопросы изучения рисков, разработка методики их оценки и методов управления ими рассматриваются в отечественной и зарубежной литературе с различных точек зрения и с применением разнообразного математического аппарата. Экономические системы рассматриваются как многоагентные системы и для решения задач управления риском в них используются методы согласованного взаимодействия, методы теории игр, многокритериальной оптимизации [1 - 6]. Slumbers O. с соавторами считают: «чтобы агенты в многоагентных системах (MAS) имели минимальный риск, им необходимо учитывать риски, создаваемые действиями других агентов» [2]. Подобной ситуации возможны в технологических цепочках, включающих несколько агентов, участвующих в производстве какого-либо продукта. Агентами в данном контексте могут быть предприятия, поставляющие сырье и комплектующие производителю конечного продукта, подразделения одной фирмы т.д. Достаточно известным подходом к анализу деятельности системы предприятий является метод, получивший название «цепочки поставок» (supply chain) [7, 8]. В отличие от авторов [7], рассматривающих устойчивость цепочки поставок с точки зрения способности быстро и эффективно восстанавливаться после сбоев, в данной работе рассмотрена система с точки зрения организации предупредительных мероприятий. Влияние всех участников производственной цепочки друг на друга отражается в объемах производства, финансовых показателях, уровне риска каждого агента и всей системы. Зарубежные исследователи отмечают усиление взаимного влияния в масштабах межгосударственных производственных взаимосвязей, а также под воздействием процессов глобализации экономики в конце XX - начале XXI веков [9, 10]. В отечественной практике ярким примером подобной зависимости от международных связей в производственной цепочке является АО «АВТОВАЗ», вынужденный остановить конвейер в 2022 году из-за прекращения поставок комплектующих от иностранных поставщиков. Остановка производства отразилась на всех поставщиках компании, которые потеряли существенную часть рынка сбыта своих товаров. Отечественные и зарубежные исследователи отмечают необходимость активного дособытийного управления рисками, а не ограничиваться реакцией на произошедшие аварии [11 - 14]. Однако стремление снизить риск имеет два критерия оценки достижения данной цели: технический и экономический. Первый вариант основывается на снижении риска путем совершенствования технологии, установки более надежного оборудования, систем мониторинга за технологическим процессом и т.п., отодвигая вопросы экономической эффективности на второй план [15 - 17]. Экономический подход использует в качестве инструмента управления затраты на различные мероприятия по снижению, передаче и сохранению риска, оценивая в первую очередь их экономическую эффективность [18, 19].

Научные публикации, посвященные вопросам исследования рисков либо рассматривают процесс с точки зрения менеджмента, либо изучают специфические риски, присущие отдельной отрасли или предприятию. Разработка универсальных моделей, отражающих вопросы управления рисками, позволит сформировать инструмент, применимый для любых отраслей и систем различного масштаба.

При формировании модели следует учитывать взаимное влияние участников системы на весь производственный процесс. В настоящее время существуют технологические цепочки, включающие предприятия, не являющиеся частью одной корпорации и представляющие самостоятельные экономические субъекты. В данной ситуации каждый участник решает вопросы управления риска в автономном порядке, без учета уровня надежности партнеров. В случае объединения участников технологической цепочки в систему, риски которой регулируются "центром", возможно формирование единой стратегии управления рисками всех участников системы. Кроме того, подобные технологические взаимосвязи могут быть многоуровневыми - в таком случае вопрос управления рисками системы усложняется и требует решения для систем различной структуры.

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим системы, моделирующие различные подходы к управлению рисками и состоящие из предприятий (агентов), взаимодействующих с центром. Под центром понимается предприятие - участник системы, выпускающее конечный продукт и использующее в своей деятельности в качестве ресурсов, комплектующих, запасных частей продукцию предприятий-агентов. Системы будут отличаться по структуре и взаимосвязи между участниками. В первой системе центр не задает требования к уровню риска и не участвует в формировании стратегии управления рисками участников системы (слабо связанная система). Во второй системе центр финансирует мероприятия по управлению рисками каждого участника системы (сильно связанная система). В третьей системе центр участвует в формировании стратегии управления рисками только в отношении агентов, непосредственно взаимодействующих с центром (агентами первого уровня).

Опишем подробнее взаимодействие агентов и центра в каждой системе и изобразим схематически на рисунках. Система 1: Центр производит продукцию в объеме  $Q$ , используя ресурсы, поставляемые агентами в объеме  $q_1, q_2, \dots, q_n$  по цене  $p_1, p_2, \dots, p_n$  соответственно. Задачу управления рисками каждый агент решает автономно, не отчитываясь перед центром, центр не предъявляет никаких условий по уровню риска агентов (рисунок 1). Недостатком подобного взаимодействия является зависимость центра от уровня риска агентов (сбой в производстве и нарушение цепочки поставок).

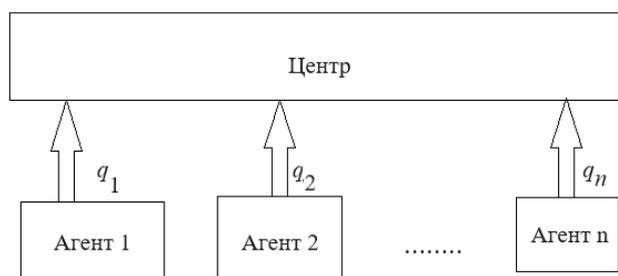


Рис. 1. Схема взаимодействия агентов и центра в слабо связанной системе

Система 2: Центр участвует в формировании стратегии управления рисками агентов системы в части определения максимально допустимого уровня риска  $r_k^0$  ( $k=1..n$ ) и финансирования превентивных мероприятий  $k$ -го агента в сумме  $f_{2k}$  (рисунок 2). В такой ситуации центр контролирует риск агентов и всей системы, но увеличивает свои затраты на сумму  $F$

$$\sum_{k=1}^n f_{sk} \leq F. \quad (1)$$

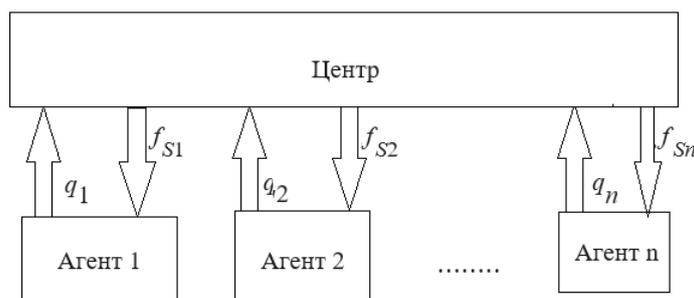


Рис. 2. Схема взаимодействия агентов и центра в сильно связанной системе

Система 3: Центр участвует в формировании стратегии управления рисками только тех агентов, с которыми непосредственно взаимодействует в рамках технологической цепочки. Будем называть их агентами 1-го уровня. Агенты 2-го уровня - это предприятия, являющиеся поставщиками комплектующих и сырья для агентов 1-го уровня (рисунок 3). Как и в системе 2, центр определяет максимально допустимый уровень риска  $r^0_k$  и распределяет средства на предупредительные мероприятия в сумме  $F$  между агентами 1-го уровня. В такой ситуации агенты 2-го уровня являются носителями рисками, неподконтрольного центру, что отражается на уровне риска всей системы.

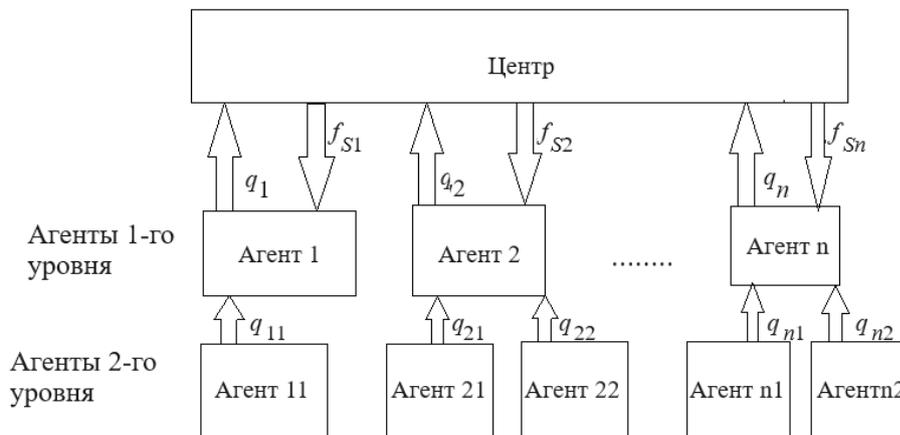


Рис. 3. Схема взаимодействия центра, агентов 1-го и 2-го уровня в системе

Составим модели, описывающие функционирование центра и агентов в каждой из описанных систем.

Система 1.

Функция прибыли центра в системе 1 имеет вид:

$$\Pi_1 = P \cdot Q - \sum_{k=1}^n p_k q_k, \quad (2)$$

где  $P$  - цена реализации продукции центра.

Прибыль  $k$ -го агента в системе 1 запишем в виде

$$\pi_{1k} = p_k q_k - c_k - f_{1k}, \quad (3)$$

где  $c_k$  - производственные затраты  $k$ -го агента,  $f_{1k}$  - затраты на предупредительные мероприятия  $k$ -го агента.

Затраты на предупредительные мероприятия  $f_{1k}$  не должны превышать ожидаемый ущерб от нейтрализуемого риска  $M[\chi_{1k}]$

$$f_{1k} \leq M[\chi_{1k}]. \quad (4)$$

Ожидаемый ущерб определяется по формулам, использованным ранее в работах [20, 21]:

$$M[\chi_{1k}] = \chi_k(q_k) \varepsilon_{1k}(f_{1k}), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{1k}$  - вероятность реализации рискованного события для  $k$ -го агента в системе 1,  $\chi_k$  - функция ущерба  $k$ -го агента от объема производства.

Система 2.

С учетом затрат на предупредительные мероприятия  $F$  в условиях сильно связанной системы функции прибыли центра  $\Pi_2$  и агентов  $\pi_{2k}$  будут иметь вид:

$$\Pi_2 = P \cdot Q - \sum_{k=1}^n p_k q_k - F, \quad (6)$$

$$\pi_{2k} = p_k q_k - c_k + f_{2k}, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^n f_{2k} \leq F, \quad (8)$$

$$f_{2k} \leq M[\chi_{2k}], \quad (9)$$

$$M[\chi_{2k}] = \chi_k(q_k) \varepsilon_{2k}(f_{2k}), \quad (10)$$

Вероятность реализации рискованного события  $\varepsilon_{2k}$  для  $k$ -го агента в системе 2 не должна превышать максимально допустимый уровень риска  $r^0_k$ , определенный центром

$$\varepsilon_{2k}(f_{2k}) \leq r_k^0, k = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Система 3.

Прибыль центра совпадает с функцией прибыли в системе 2:

$$\Pi_3 = P \cdot Q - \sum_{k=1}^n p_k q_k - F. \quad (12)$$

Функция прибыли агента запишем с учетом его затрат на закупку ресурсов у агентов второго уровня

$$\pi_{3k} = p_k q_k - \sum_{i=1}^{m_k} p_{ki} q_{ki} + f_{3k}, \quad (13)$$

где  $p_{ki}$  - стоимость ресурсов, приобретаемых  $k$ -ым агентом 1-го уровня у своего  $i$ -го поставщика - агента 2-го уровня в объеме  $q_{ki}$ ,  $m_k$  - количество поставщиков 2-го уровня  $k$ -го агента 1-го уровня.

Ограничения (8) - (10) остаются неизменными:

$$\sum_{k=1}^n f_{3k} \leq F, \quad (14)$$

$$f_{3k} \leq M[\chi_{3k}], \quad (15)$$

$$M[\chi_{3k}] = \chi_k(q_k) \varepsilon_{3k}(f_{3k}), \quad (16)$$

$$\varepsilon_{3k}(f_{3k}) \leq r_k^0, k = \overline{1, n}. \quad (17)$$

Сформулируем задачи определения оптимального функционирования для исследуемых систем.

Система 1.

$$\Pi_1 \rightarrow \max, \quad (18)$$

$$\pi_{1k} \rightarrow \max, \quad (19)$$

$$\begin{cases} \Pi_1 = P \cdot Q - \sum_{k=1}^n p_k q_k, \\ \pi_{1k} = p_k q_k - c_k - f_{1k}, \\ f_{1k} \leq M[\chi_{1k}], \\ M[\chi_{1k}] = \chi_k(q_k) \varepsilon_{1k}(f_{1k}). \end{cases} \quad (20)$$

Система 2.

$$\Pi_2 \rightarrow \max, \quad (21)$$

$$\pi_{2k} \rightarrow \max, \quad (22)$$

$$\begin{cases} \Pi_2 = P \cdot Q - \sum_{k=1}^n p_k q_k - F, \\ \pi_{2k} = p_k q_k - c_k + f_{2k}, \\ \sum_{k=1}^n f_{2k} \leq F, \\ f_{2k} \leq M[\chi_{2k}], \\ M[\chi_{2k}] = \chi_k(q_k) \varepsilon_{2k}(f_{2k}), \\ \varepsilon_{2k}(f_{2k}) \leq r_k^0. \end{cases} \quad (23)$$

Система 3.

$$\Pi_3 \rightarrow \max, \quad (24)$$

$$\pi_{3k} \rightarrow \max, \quad (25)$$

$$\begin{cases} \Pi_3 = P \cdot Q - \sum_{k=1}^n p_k q_k - F, \\ \pi_{3k} = p_k q_k - \sum_{i=1}^{m_k} p_{ki} q_{ki} + f_{3k}, \\ \sum_{k=1}^n f_{3k} \leq F, \\ f_{3k} \leq M[\chi_{3k}], \\ M[\chi_{3k}] = \chi_k(q_k) \varepsilon_{3k}(f_{3k}), \\ \varepsilon_{3k}(f_{3k}) \leq r_k^0. \end{cases} \quad (26)$$

Решение задач (18) - (20), (21) - (23), (24) - (26) позволит определить параметры оптимального функционирования центра и агентов рассмотренных систем.

## 2. Заключение

В статье рассмотрены системы взаимодействия центра и агентов, описывающие технологические цепочки различной структуры. Сформулированы задачи для сильно связанной и слабо связанной систем. Полученные модели носят универсальный характер, не отражают характерные особенности отдельной отрасли или предприятия. Спецификация моделей достигается путем подстановки функций и значений параметров, полученных в результате анализа деятельности объекта исследования.

Различные вариации предложенных моделей возможны за счет включения в функции прибыли различных производственных функций, подстановки функций вероятности реализации рискового события. Также в представленных задачах намеренно не оговаривается структура рынка, что тоже дает возможность модифицировать модели для рынков совершенной конкуренции, олигополии, олигопсонии и пр. Определенный интерес для развития моделей представляет анализ взаимного влияния показателей риска агентов внутри системы, что позволит сформулировать более полную задачу, отражающую зависимость агентов не только от центра.

Развитие представленных моделей и их детализация для определенных отраслей и предприятий в дальнейших исследованиях позволит усовершенствовать представленные результаты и дополнить их решением конкретных практических задач.

## Литература

1. Lee, J.&Kim, C. Multi-Agent Systems Applications in Manufacturing Systems and Supply Chain Management: a Review Paper, International Journal of Production Research. – 2008. – Vol. 46. – Issue 1. – P. 233-265. <https://doi.org/10.1080/00207540701441921>
2. Slumbers O. et al. A game-theoretic framework for managing risk in multi-agent systems //International Conference on Machine Learning. – PMLR. – 2023. – P. 32059-32087.
3. Almen A., Dentcheva D. On Risk Evaluation and Control of Distributed Multi-Agent Systems //arXiv preprint arXiv:2311.10287. – 2023.
4. Kanj H., Aly W. H. F., Kanj S. A novel dynamic approach for risk analysis and simulation using multi-agents model //Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – №. 10. – P. 5062.
5. Edjossan-Sossou, A.M., Galvez, D., Deck, O., Heib, M.A., Verdel, T., Dupont, L., Chery, O., Camargo, M., Morel, L. Sustainable Risk Management Strategy Selection Using a Fuzzy Multi-Criteria Decision Approach // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2020. – Vol. 45, May 2020, 101474 <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101474>
6. Yazdani, M., Gonzalez, E.D.R.S. and Chatterjee, P. A Multi-Criteria Decision-Making Framework for Agriculture Supply Chain Risk Management Under a Circular Economy Context, Management Decision. – 2019. – Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/MD-10-2018-1088>
7. Behzadi G., O'Sullivan M.J., Olsen T.L. On metrics for supply chain resilience // European Journal of Operational Research. – 2020. – № 287(1). – P. 145–158
8. Bode C., Wagner S.M. Structural drivers of upstream supply chain complexity and the frequency of supply chain disruptions // Journal of Operations Management. – 2015. – № 36(1). – P. 215–228
9. Anbumozhi V., Kimura F., Thangavelu S.M. Global supply chain resilience: Vulnerability and shifting risk management strategies. / In: Anbumozhi V., Kimura F., Thangavelu S.M., eds. Supply Chain Resilience. - Singapore: Springer. – 2020. – P. 3–14.
10. Bier T., Lange A., Glock C.H. Methods for mitigating disruptions in complex supply chain structures: A systematic literature review // International Journal of Production Research. – 2020. – № 58(6). – P. 1835–1856
11. Rasmussen J., Svedung, I. Proactive Risk Management in a Dynamic Society. – Swedish Rescue Services Agency, 2000.
12. Nurgaliyeva A.Sh., Koval A.P., Sarybayeva I.E. Methods of assessing the economic effectiveness of measures to ensure safe work // Colloquium-Journal. – 2022. – № 18-1 (141). – P. 74-77
13. Sidikov F. Problems in the study of pollution compensation and the effectiveness of environmental measures // Universum: технические науки.2022.№ 5-10 (98). – С. 70-71.
14. Исмагилова Л.А., Ситникова Л.В., Матягина Т.В. Метод оценки экономической эффективности и результативности мероприятий в сфере охраны труда // Уфимский гуманитарный научный форум. 2023. № 4 (16). – С. 118-130.
15. Хачикян П.П. Риск-ориентированный подход при построении многоэлементных систем предупреждения чрезвычайных ситуаций в авиации в условиях глубокой неопределенности // Проблемы безопасности полетов. 2024. № 3. – С. 22-35.
16. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Ivanov P.G. Engineering and technical methods for landslide risk management and reduction// Sustainable Development of Mountain Territories. – 2020. – Vol. 12. – № 1 (43). – P. 162-170.
17. Порядин В.С. Влияние 3D-моделей на снижение ошибок и рисков в капитальном строительстве// Вестник науки. 2023. Т. 3. № 8 (65). – С. 128-130.

18. *Елькин А.Б., Евсеева И.А.* Оценка экономической эффективности мероприятий по безопасности и охране труда // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 2 (22). – С. 157-167.
19. *Гун Мин* Внедрить комплексное управление рисками для снижения бизнес-рисков // Экономика и социум. 2022. № 5-1 (96). – С. 378-382.
20. *Rostova E. P., Geraskin M.* Costs Function Optimization For Prevention Of Firm's Industrial Risks With Regard To Reinvestment Of Profit // Advances in Systems Science and Applications. – 2018. – Vol. 18. – №. 4. – P. 52-63. <https://doi.org/10.25728/assa.2018.18.4.664>.
21. *Rostova E., Geraskin M.* Models of Industrial Risk Control Systems // Advances in Systems Science and Applications. – 2022. – Vol. 22. – №. 3. – P. 18-35. <https://doi.org/10.25728/assa.2022.22.3.1080>