

# Риск-ориентированный подход к размещению центров материально-технического снабжения на транспортной сети

Д. С. Поликарпов, Е. Ю. Косенко

**Аннотация**—В статье представлен риск-ориентированный подход к размещению центров материально-технического снабжения (ЦМТС) с учетом динамически изменяющихся рисков на транспортных сетях. Разработанный подход сочетает методы сетевого анализа, пространственной оптимизации и риск-ориентированного управления, обеспечивая устойчивое снабжение в условиях неопределенности.

Ключевой особенностью алгоритма является адаптивный механизм формирования множества потенциальных мест размещения ЦМТС, который на основе модифицированного алгоритма поиска кратчайших путей определяет зоны покрытия с учетом заданных ограничений по радиусу действия и допустимому уровню риска. Этот механизм обеспечивает выбор таких мест размещения ЦМТС, которые гарантируют снабжение узлов по безопасным маршрутам. Алгоритм применим для планирования логистики в специализированных задачах, где требуется оперативное развертывание устойчивых систем снабжения (снабжение воинских подразделений, ликвидация чрезвычайных ситуаций и т.п.).

Практическая значимость работы заключается в возможности её применения для планирования логистических систем, функционирующих в условиях быстро меняющейся обстановки. Результаты представляют ценность для специалистов в области логистики и управления инфраструктурой, а также для органов управления чрезвычайными ситуациями, обеспечивая надежность цепей поставок в динамично изменяющихся условиях.

**Ключевые слова**—оптимальное размещение, центры материально-технического снабжения, транспортная сеть, риск-ориентированный подход, зоны покрытия, сетевой анализ, алгоритм Дейкстры.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях проведения специальных операций военного назначения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций актуальной задачей является эффективное материально-техническое снабжение подразделений [1,2]. Оперативное развертывание ЦМТС в зонах с динамически

изменяющимися потребностями требует разработки математических моделей и алгоритмов, учитывающих расположение зон с различным уровнем риска на местности, ограниченность ресурсов и изменчивость условий функционирования транспортной сети [3,4]. Ранее в работе [5] было предложено графовое представление транспортной сети. При таком подходе под риском понимается вероятность нарушения функционирования участка транспортной сети (ребра графа) или его полной блокировки. В рамках графовой модели риск формализуется как весовая функция, присвоенная ребрам графа. При этом риск не является постоянной величиной – он привязан к конкретным координатам в пространстве, и его величина меняется от точки к точке.

Основной проблемой при размещении ЦМТС является необходимость минимизации количества развертываемых центров при обеспечении покрытия максимального количества узлов с учетом факторов риска. В данной работе рассматривается задача оптимизации размещения ЦМТС на транспортной сети, где узлы представляют ключевые точки снабжения, а ребра – маршруты доставки.

Актуальность исследования обусловлена тем, что традиционные методы размещения объектов инфраструктуры, основанные на статических графовых моделях, не учитывают динамику изменения рисков и ограничения условий, связанных с безопасностью маршрутов. В отличие от классических оптимизационных моделей размещения, предлагаемый подход интегрирует оценку рисков в процесс принятия решений, что позволяет снизить вероятность срыва снабжения из-за внешних угроз [6,7].

Целью данной работы является разработка алгоритма размещения ЦМТС, обеспечивающего покрытие максимального количества узлов при заданном радиусе покрытия с учетом ограничений на допустимый уровень риска. Для достижения поставленной цели в качестве математического аппарата используются теория графов, методы и алгоритмы поиска кратчайших путей с учетом взвешенных ограничений [8,9].

Статья получена 29 сентября 2025.

Д. С. Поликарпов, аспирант, Южный федеральный университет, Таганрог, Россия (e-mail: polikarpov@sfnu.ru).

Е. Ю. Косенко, канд. техн. наук, доцент, Южный федеральный университет, Таганрог, Россия (e-mail: ekosenko@sfnu.ru).

В рамках исследования предложен метод формирования множества потенциальных мест размещения ЦМТС, учитывающий не только географическую близость узлов, но и уровень связанного с ними риска. Такой подход позволяет исключить размещение центров в зонах с высокой вероятностью нарушения функционирования, что существенно повышает устойчивость системы снабжения в условиях неопределенности.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанного алгоритма для планирования логистических операций в условиях конфликтов или чрезвычайных ситуаций. Результаты могут быть использованы для автоматизированного проектирования сетей снабжения, обеспечивающих устойчивость к внешним воздействиям.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках данного исследования рассматривается транспортная сеть [10], представленная взвешенным графом  $G = (V, E)$ , где  $V$  – множество вершин, соответствующих ключевым точкам снабжения, а  $E$  – множество рёбер, отображающих маршруты доставки.

Каждой вершине  $v_i \in V$  поставлены в соответствие:

- пространственные координаты  $(x_i, y_i)$ ;
- два параметра риска  $r_i^{(1)} \in [0, 1]$  и  $r_i^{(2)} \in [0, 1]$ , характеризующих точечную вероятность нарушения функционирования в двух различных сценариях.

Под риском  $r_i$  в данной работе понимается скалярная оценка условной вероятности её отказа (блокировки, недоступности) в рассматриваемом сценарии. Каждый сценарий  $k$  задаёт своё распределение значений  $r_i^k$  по множеству вершин  $V$ , отражающее пространственную картину угроз данного типа.

Каждому ребру присвоен вес  $w_{ij}$ , равный евклидову расстоянию между соответствующими вершинами.

Для каждого ребра графа  $e = (v_i, v_j) \in E$  уровень риска рассчитывается как максимальный из рисков смежных с ним вершин:  $r_e = \max(r_i, r_j)$ . Это значение используется для проверки допустимости пути при вычислении параметров покрытия [11]. Исходные параметры экспериментальной транспортной сети представлены в таблице.

Таблица 1. Исходные параметры транспортной сети

| V               | x  | y  | $r_i^{(1)}$ | $r_i^{(2)}$ | Смежные вершины  |
|-----------------|----|----|-------------|-------------|--|
| v <sub>1</sub>  | 3  | 12 | 0,3         | 0,3         | v <sub>2</sub>   |
| v <sub>2</sub>  | 7  | 16 | 0,4         | 0,4         | v <sub>3</sub> , v <sub>5</sub>  |
| v <sub>3</sub>  | 9  | 28 | 0,2         | 0,2         | v <sub>2</sub> , v <sub>4</sub> , v <sub>5</sub>   |
| v <sub>4</sub>  | 17 | 47 | 0,5         | 0,8         | v <sub>3</sub> , v <sub>6</sub>  |
| v <sub>5</sub>  | 27 | 23 | 0,3         | 0,3         | v <sub>2</sub> , v <sub>3</sub> , v <sub>9</sub> , v <sub>10</sub> , v <sub>13</sub>                   |
| v <sub>6</sub>  | 30 | 45 | 0,4         | 0,7         | v <sub>7</sub> , v <sub>10</sub>   |
| v <sub>7</sub>  | 36 | 52 | 0,2         | 0,2         | v <sub>6</sub> , v <sub>8</sub> , v <sub>12</sub> , v <sub>10</sub>                                    |
| v <sub>8</sub>  | 39 | 68 | 0,1         | 0,1         | v <sub>7</sub> , v <sub>12</sub> , v <sub>15</sub> , v <sub>16</sub>                                   |
| v <sub>9</sub>  | 38 | 13 | 0,3         | 0,9         | v <sub>5</sub> , v <sub>14</sub> , v <sub>13</sub>   |
| v <sub>10</sub> | 43 | 45 | 0,4         | 0,8         | v <sub>6</sub> , v <sub>7</sub> , v <sub>12</sub> , v <sub>15</sub> , v <sub>11</sub> , v <sub>5</sub> |
| v <sub>11</sub> | 48 | 18 | 0,2         | 0,9         | v <sub>10</sub> , v <sub>13</sub>  |

|                 |    |    |     |     |  |
|-----------------|----|----|-----|-----|--|
| v <sub>12</sub> | 49 | 55 | 0,5 | 0,7 | v <sub>7</sub> , v <sub>8</sub> , v <sub>10</sub> , v <sub>15</sub>  |
| v <sub>13</sub> | 49 | 28 | 0,3 | 0,8 | v <sub>5</sub> , v <sub>9</sub> , v <sub>14</sub> , v <sub>11</sub> , v <sub>15</sub> , v <sub>17</sub> , v <sub>19</sub>  |
| v <sub>14</sub> | 50 | 2  | 0,4 | 0,9 | v <sub>9</sub> , v <sub>13</sub>   |
| v <sub>15</sub> | 55 | 55 | 0,2 | 0,7 | v <sub>10</sub> , v <sub>12</sub> , v <sub>8</sub> , v <sub>13</sub> , v <sub>17</sub> , v <sub>20</sub> , v <sub>16</sub> |
| v <sub>16</sub> | 60 | 73 | 0,1 | 0,8 | v <sub>8</sub> , v <sub>15</sub> , v <sub>20</sub>   |
| v <sub>17</sub> | 58 | 31 | 0,3 | 0,9 | v <sub>13</sub> , v <sub>15</sub> , v <sub>18</sub> , v <sub>20</sub>  |
| v <sub>18</sub> | 74 | 18 | 0,4 | 0,8 | v <sub>17</sub> , v <sub>19</sub>  |
| v <sub>19</sub> | 84 | 5  | 0,2 | 0,7 | v <sub>18</sub> , v <sub>13</sub>  |
| v <sub>20</sub> | 96 | 80 | 0,1 | 0,9 | v <sub>15</sub> , v <sub>16</sub> , v <sub>17</sub>  |

Основная цель заключается в определении минимального количества ЦМТС  $\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ , размещаемых на сети (Рис.1), при котором выполняются следующие условия:

1. Каждая вершина  $v_i \in V$  должна быть покрыта хотя бы одним ЦМТС, то есть находиться на расстоянии не более радиуса покрытия  $R$  от ближайшего центра с учетом допустимого пути.

2. Маршрут от ЦМТС до покрываемой вершины  $v_i$  не должен содержать участков с уровнем риска выше заданного порога  $\tau$ .

3. Приоритет размещения ЦМТС в зонах с минимальным уровнем риска обеспечивается за счет формирования множества кандидатов  $J$  из вершин с низким уровнем риска на предварительном этапе алгоритма.

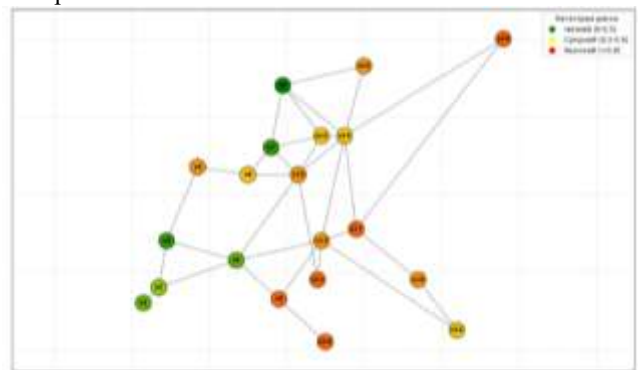


Рис. 1. Транспортная сеть

Формально задача может быть описана следующим образом. Пусть  $S \subseteq V$  – подмножество вершин, выбранных для размещения ЦМТС, а  $J \subseteq V$  – множество вершин-кандидатов для размещения ЦМТС. Множество кандидатов  $J$  формируется адаптивно на основе анализа уровня риска вершин. В него включаются все вершины с уровнем риска  $r_i$  (для рассматриваемого сценария) ниже порога  $\tau_c$ , где  $\tau_c$  – дополнительный параметр, задающий максимально допустимый риск для размещения ЦМТС в вершине (например,  $\tau_c = 0,5$ ). Это позволяет исключить размещение центров в заведомо опасных локациях. Также в  $J$  добавляются дополнительные вершины, необходимые для обеспечения связности сети и полноты покрытия [12]. Для каждой вершины  $v_i \in J$  определим бинарную переменную  $x_j$ , принимающую значение 1, если ЦМТС размещен в вершине  $v_j$ , и 0 в противном случае. Тогда целевая функция минимизации количества ЦМТС примет вид:

$$\min \sum_{v_j \in J} x_j. \quad (1)$$

Основным элементом модели является определение бинарного параметра  $\alpha_{ij}$  для всех  $v_i \in V$ ,  $v_j \in J$ . Пусть  $P(v_i, v_j)$  обозначает путь в графе  $G$  между вершинами  $v_i$  и  $v_j$ . Параметр  $\alpha_{ij} = 1$ , если существует путь  $P(v_i, v_j)$  такой, что его длина  $d_P(v, v_i) \leq R$  и максимальный риск на любом ребре этого пути не превышает порога  $\tau$ . В противном случае  $\alpha_{ij} = 0$ . Этот параметр вычисляется для каждого кандидата  $v_j \in J$  и для всех вершин  $v_i \in V$  с помощью модифицированного алгоритма Дейкстры [13, 14], запускаемого для каждого кандидата  $v_j$ .

Ограничения на покрытие и уровень риска формализуются как:

$$\sum_{v_j \in J} \alpha_{ij} x_j \geq 1 \quad \forall v_i \in V \quad (2)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall v_j \in J$$

Первое ограничение гарантирует, что каждая вершина  $v_i$  покрыта хотя бы одним размещенным центром  $j$  ( $x_j = 1$ ), который может ее покрыть ( $\alpha_{ij} = 1$ ). Таким образом, модель представляет собой задачу покрытия множества с предварительно вычисленными параметрами покрытия  $\alpha_{ij}$ .

Для формального описания результатов размещения введём понятие зоны покрытия. Зоной покрытия центра, размещенного в вершине  $j \in S$ , называется множество вершин  $A_j \subseteq V$ , для которых выполняются условия покрытия по расстоянию и риску:

$$A_j = \left\{ v \in V \mid d_P(v, v_j) \leq R \wedge \max_{e \in P(v, v_j)} r_e \leq \tau \right\}, \quad (3)$$

где  $d_P(v, v_j)$  – длина кратчайшего допустимого пути от вершины  $v$  до  $v_j$ , в которой размещен центр.

Особенностью предлагаемой постановки задачи является учёт двух независимых категорий рисков ( $r_i^{(1)}$  и  $r_i^{(2)}$ ), что в рамках данной работы интерпретируется как "техногенные риски" ( $r_i^{(1)}$ ) и "военные риски" ( $r_i^{(2)}$ ). Такой подход позволяет адаптировать решение к различным сценариям угроз, каждый из которых характеризуется уникальным пространственным распределением опасности [15].

Основной сложностью является необходимость комплексной оценки путей, учитывающей не только длину маршрута, но и совокупный риск. Данное ограничение делает неприменимыми стандартные алгоритмы покрытия и требует разработки методов оптимизации. Центральное место в предложенном подходе занимает этап формирования зон размещения, основанный на анализе пространственного распределения низкорисковых зон.

Таким образом, поставленная задача относится к классу NP-сложных комбинаторных оптимизационных задач с дополнительными ограничениями.

### III. РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Алгоритм риск-ориентированного размещения центров материально-технического снабжения реализуется посредством последовательного выполнения взаимосвязанных вычислительных процедур, каждая из которых вносит существенный вклад в формирование итогового решения.

На начальном этапе осуществляется подготовка исходных данных, включающая построение формальной модели транспортной сети. Графовая структура  $G =$

$(V, E)$  формируется на основе пространственных координат вершин и заданной топологии соединений, где весовые коэффициенты рёбер вычисляются как евклидовы расстояния между соответствующими узлами. Для каждого ребра графа рассчитывается уровень риска  $r_e$ , принимаемый равным максимальному из рисков двух вершин, которые это ребро соединяют [11]. Чтобы быстро находить все вершины в радиусе  $R$  от потенциального центра размещения, используется алгоритм пространственного индексирования [16]. Это позволяет избежать полного перебора всех вершин сети и значительно сокращает время расчётов.

Далее формируется множество вершин-кандидатов  $J \subseteq V$  для размещения ЦМТС. Критериями отбора являются:

1. Включаются все вершины, у которых значение риска  $r_i$  (для рассматриваемого сценария) ниже порога  $\tau_c$ .
2. Если в результате фильтрации по риску сеть распадается на несвязные компоненты, в  $J$  добавляются вершины с наименьшим риском из недоступных компонент, чтобы обеспечить возможность полного покрытия сети.

Важнейшим этапом является предварительное вычисление бинарных параметров  $\alpha_{ij}$  для всех вершин-кандидатов  $v_j \in J$  и всех вершин  $v_i \in V$  с помощью модифицированного алгоритма Дейкстры [14]. Этот алгоритм, в отличие от классического, при поиске кратчайших путей от каждой вершины-кандидата  $v_j$  дополнительно проверяет выполнение условия  $\max_{e \in P} r_e \leq \tau$  для всех путей. Пути, нарушающие это условие, отсекаются, даже если их длина меньше  $R$ .

Оценка зон покрытия для каждого потенциальной позиции (кандидата)  $j$  фактически завершается на этапе предварительного расчета параметров  $\alpha_{ij}$ . Множество достижимых вершин  $C(j) \subseteq V$  определяется как все вершины  $v_i$ , для которых  $\alpha_{ij} = 1$ .

Итеративный процесс выбора оптимальных позиций реализует стратегию последовательного максимизирования покрытия неподключенных узлов. На каждой шаге выбирается кандидат  $j \in J$ , покрывающий максимальное число непокрытых вершин:  $j = \operatorname{argmax}_{j \in J} |C(j) \cap V_c|$ , где  $V_c$  – множество вершин, ожидающих покрытия. Процедура продолжается до достижения полного покрытия сети либо исчерпания резерва кандидатных позиций, что гарантирует нахождение субоптимального решения за приемлемое время [17].

Предлагаемый алгоритм характеризуется рядом существенных особенностей, обеспечивающих его эффективность в условиях ограничений, накладываемых требованиями к допустимому уровню риска. Центральным элементом методики является адаптивный механизм формирования потенциальных мест размещения, принципиально отличающийся от традиционных подходов, где используется фиксированный и заранее определённый набор таких мест. В рамках разработанного подхода формирование исходного множества потенциальных мест размещения осуществляется с учетом пространственной неоднородности рисков, что позволяет существенно

сократить вычислительную сложность задачи без потери качества получаемых решений.

Особое внимание уделено процедуре проверки допустимости маршрутов, где классический алгоритм Дейкстры был модифицирован посредством введения дополнительного условия, учитывающего максимальный уровень риска на всем протяжении пути  $\max_{e \in P} r_e \leq \tau$ . Если условие нарушается, путь исключается из рассмотрения, даже если его длина меньше  $R$ .

Данное усовершенствование обеспечивает корректное отсеечение маршрутов, формально удовлетворяющих ограничению по длине, но не соответствующих требованиям безопасности, что принципиально важно для практического применения алгоритма в реальных условиях.

Для обеспечения наглядности получаемых результатов и удобства их анализа разработан инструмент визуализации, позволяющий комплексно оценивать пространственное распределение рисков, зоны действия размещаемых центров и полноту покрытия транспортной сети. Цветовая дифференциация элементов графа в соответствии с уровнем риска и графическое представление областей обслуживания каждого центра значительно упрощают процесс интерпретации результатов и принятия окончательных решений по размещению объектов инфраструктуры.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для демонстрации работы алгоритма рассмотрим результаты оптимизации размещения ЦМТС при радиусе покрытия  $R = 20$  км и пороге риска  $\tau = 0.8$ . Анализ проведен для двух типов сценариев угроз:  $r_i^{(1)}$  (техногенные риски) и  $r_i^{(2)}$  (военные риски).

Алгоритм при риске  $r_i^{(1)}$  обеспечил полное покрытие транспортной сети, разместив 8 ЦМТС (рис. 2).

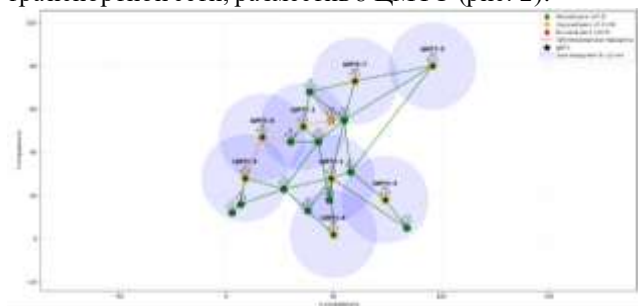


Рис. 2. Распределение ЦМТС при риске  $r_i^{(1)}$

Пространственное распределение ЦМТС демонстрирует следующие закономерности:

1. В северо-западном секторе сети (координаты 38.0, 13.0) расположен ключевой узел, обслуживающий группу вершин  $v_5$ ,  $v_9$  и  $v_{13}$ . Математически зона его действия описывается как:

$$A_9 = \{v \in V | d_p(v, v_9)\} \leq 20 \wedge \max_{e \in P(v, v_9)} r_e \leq 0.8$$

2. Центральная часть сети требует совместного обслуживания двумя ЦМТС, размещенными в вершинах  $v_{11}$  (48.0, 18.0) и  $v_{13}$  (49.0, 28.0), что обусловлено наличием высокорисковых зон с  $r > 0.8$ . В полученном решении оптимальное разделение зон ответственности между ними достигается при выполнении условия:

$$A_{11} \cap A_{13} = \emptyset$$

$$|A_{11} \cup A_{13}| = 7$$

3. Изолированные вершины  $v_{18}$  и  $v_{19}$  в восточной части сети обслуживаются специализированными центрами  $v_{18}$  (74.0, 18.0) и  $v_{19}$  (84.0, 5.0), что подтверждает эффективность алгоритма в условиях пространственной неоднородности сети.

При расширенном распределении рисков  $r_i^{(2)}$  алгоритм [18] потребовал увеличения количества ЦМТС до 11 (рис.3).

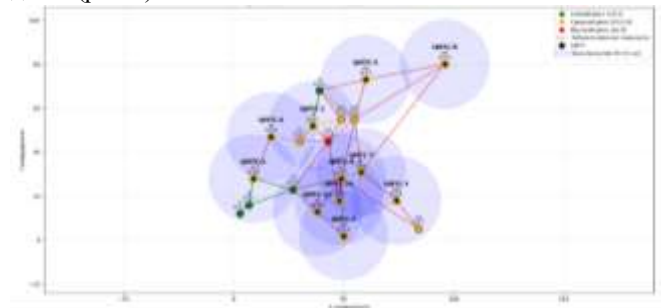


Рис. 3. Распределение ЦМТС при риске  $r_i^{(2)}$

Геометрический анализ решения показывает:

1. Появление дополнительных центров в точках (27.0, 23.0) и (36.0, 52.0) математически обосновано необходимостью обхода новых блокированных маршрутов:

$$\forall v \in \{v_{10}, v_{15}\}, \quad \forall j \in J : a_j = 0$$

2. Введение ЦМТС в точке  $v_{14}$  (50.0, 2.0) компенсирует потерю связанности в южном секторе:

$$\exists v \in V_{\text{юг}} : d_p(v, v_{14}) \leq 20 \text{ км} \wedge \max_{e \in P(v, v_{14})} r_e \leq 0.8$$

При этом «высокорисковой» вершиной является вершина  $v_i$ , для которой  $r_i > \tau$ , где  $\tau$  – установленный порог допустимого риска на пути. Наличие таких вершин приводит к фрагментации сети с точки зрения допустимых маршрутов. Для анализируемого сценария  $r_i^{(1)}$  количество высокорисковых вершин ( $r_i > 0.8$ ) равно 6, а для  $r_i^{(2)}$  – 9, что объясняет увеличение количества требуемых ЦМТС.

Проведенное исследование выявило существенную зависимость количества требуемых центров материально-технического снабжения от уровня риска в транспортной сети. При переходе от сценария  $r_i^{(1)}$  к  $r_i^{(2)}$  наблюдается увеличение количества ЦМТС на 37.5% [19]. Сравнение характеристик решений сведено в таблицу 2.

Таблица 2. Сравнение характеристик решений

| Параметр                | $r_i^{(1)}$ | $r_i^{(2)}$ |
|-------------------------|-------------|-------------|
| Число ЦМТС              | 8           | 11          |
| Покрыто вершин          | 20          | 20          |
| Среднее расстояние (км) | 18.2        | 15.7        |
| Максимальный риск пути  | 0.78        | 0.79        |

Данные подтверждают, что алгоритм динамически реагирует на изменения условий, обеспечивая надежное покрытие даже при росте угроз. Основной компромисс – увеличение количества ЦМТС для сохранения устойчивости системы.

#### V. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И АДАПТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ

Предложенный алгоритм продемонстрировал чувствительность и требуемую реакцию на изменение

параметров риска в рамках данного примера, что подтверждается сравнительным анализом результатов для сценариев  $r_i^{(1)}$  и  $r_i^{(2)}$ . Исследование устойчивости решения выявило существенную зависимость количества требуемых центров материально-технического снабжения от ключевых параметров системы.

Чувствительность алгоритма к изменению радиуса покрытия проявляется в нелинейном росте количества ЦМТС при уменьшении допустимой дальности действия. Сокращение зоны обслуживания с 20 до 15 километров приводит к значительному увеличению количества размещаемых объектов, что обусловлено необходимостью сохранения полного покрытия сети (рис. 4). Следует отметить, что представленная зависимость получена для конкретной транспортной сети и может существенно изменяться в зависимости от структуры графа. Аналогичным образом, ослабление требований к допустимому уровню риска позволяет сократить количество центров, однако сопровождается компромиссом в виде включения в маршруты снабжения потенциально опасных участков [20].

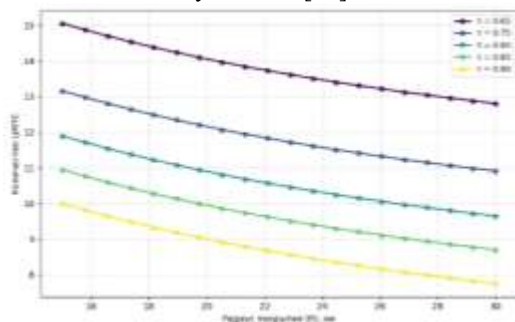


Рис. 4 График зависимости числа ЦМТС от  $R$  и  $t$

Алгоритм успешно адаптируется к изменению пространственного распределения рисков. Увеличение количества высокорисковых вершин с 6 до 9 в сценарии  $r_i^{(2)}$  потребовало существенной реконфигурации системы размещения, включающей не только добавление новых центров, но и перераспределение зон ответственности существующих объектов. При этом сохраняется принцип преимущественного размещения ЦМТС в низкорисковых зонах, что подтверждается статистикой пространственного распределения объектов.

Пространственное распределение центров показывает высокую степень соответствия зонам с повышенными показателями риска, что свидетельствует о работоспособности предложенной методики. Полученные решения демонстрируют практическую эффективность, обеспечивая выполнение всех заданных ограничений, включая требования к безопасному прокладыванию маршрутов и созданию резервных путей снабжения для наиболее ответственных направлений. Необходимое количество разворачиваемых центров объективно обусловлено сложностью исходных условий задачи и введенными ограничениями безопасности.

Перспективы совершенствования алгоритма связаны с разработкой механизмов динамической адаптации к изменяющимся условиям, включая учет временных вариаций параметров риска и интеграцию данных мониторинга состояния транспортной инфраструктуры в

реальном времени. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная методика обеспечивает надежное функционирование системы снабжения даже в условиях возрастания угроз, сохраняя при этом баланс между количеством размещаемых объектов и устойчивостью маршрутов поставок.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило получить решение задачи оптимального размещения центров материально-технического снабжения в условиях динамически изменяющихся параметров риска. Разработанный алгоритм продемонстрировал свою функциональность и чувствительность к изменению входных данных с практической точки зрения, что открывает новые возможности для управления сложными территориально-распределенными системами.

В работе была предложена математическая модель, объединяющая аппарат теории графов, методы пространственного анализа и управление на основе оценки рисков. Ключевым элементом исследования стал механизм адаптивного выбора потенциальных мест размещения (кандидатов), который позволяет добиться снижения вычислительной нагрузки без ухудшения характеристик получаемых решений.

С практической точки зрения важно отметить, что разработанный подход позволяет достичь полного покрытия тестовой сети при оптимальном количестве размещаемых центров. Для сети из 20 вершин в базовом сценарии потребовалось 8 ЦМТС, тогда как в условиях повышенного риска их количество возросло до 11. Такая вариативность подтверждает способность алгоритма адаптироваться к изменяющимся условиям внешней среды. Временные характеристики расчетов свидетельствуют о возможности применения метода в оперативных условиях.

Важно подчеркнуть, что представленный пример является демонстрацией принципа работы метода. Одним из следующих шагов станет проведение серии вычислительных экспериментов на произвольных графах разной размерности и топологии для статистической оценки масштабируемости и надежности алгоритма. Полученные в работе результаты подтверждают принципиальную применимость разработанного подхода, но не характеризуют его эффективность в полной мере для всех типов транспортных сетей.

Перспективы дальнейшего развития исследования видятся в нескольких направлениях. Прежде всего, это интеграция динамической модели, учитывающей временную изменчивость параметров риска. Значительный потенциал имеет разработка многоуровневых моделей для крупных транспортно-коммуникационных узлов (агломераций), характеризующихся сложной топологией. Отдельного внимания заслуживает вопрос создания адаптивных механизмов оперативной переконфигурации сети снабжения в реальном времени.



## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Liu Y., Lei H., Zhang Z., Wu Z. Emergency response facility location in transportation networks: A literature review // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2021. Vol. 8, No. 2. P. 153–169. DOI: 10.1016/j.jtte.2021.03.001.
- [2] Zio E., et al. Network-risk: an open GIS toolbox for estimating the implications of transportation network damage due to natural hazards // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2020. Vol. 20. P. 1421–1438. DOI: 10.5194/nhess-20-1421-2020.
- [3] Поликарпов, Д. С. Критерии определения месторасположения центров материально-технического снабжения / Д. С. Поликарпов // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2024): Сборник трудов XXII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. В 2-х томах, Таганрог, 05–07 декабря 2024 года. – Таганрог: ДиректСайнс (ИП Шкуркин Д.В.), 2024. – С. 461-467.
- [4] Гатауллина, Д. И. Управление рисками в транспортной логистике / Д. И. Гатауллина // XXVIII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика: Материалы докладов. В 3-х томах, Казань, 05–06 декабря 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 169–172.
- [5] Поликарпов Д.С., Косенко Е.Ю. Оптимизация размещения центров материально технического снабжения в условиях динамически изменяющихся целевых критериев // *Изв. вузов. Сев. Кавк. регион. Техн. науки*. 2025. № 3. С. 26–32. DOI: 10.17213/15603644202532632.
- [6] Sundarakani B., Pereira V., Ishizaka A. Robust facility location decisions for resilient sustainable supply chain performance in the face of disruptions // *The International Journal of Logistics Management*. 2020. Vol. 32, No. 2. P. 357–385. DOI: 10.1108/IJLM-12-2019-0333.
- [7] Li Y., et al. A two-stage robust optimization model for emergency service facilities location-allocation problem under demand uncertainty and sustainable constraints // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 86129. DOI: 10.1038/s41598-025-86129-1.
- [8] Близнякова, Е. А. Сравнительный анализ методов поиска кратчайшего пути в графе / Е. А. Близнякова, А. А. Куликов, А. В. Куликов // *Архитектура, строительство, транспорт*. – 2022. – № 1. – С. 80–87. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-1-80-87.
- [9] Kairos: Efficient Temporal Graph Analytics on a Single Machine. ... Temporal graph analytics on persistent memory. *ST Joana Matos Fonseca da Trindade, Jawad Khan*. 2023.
- [10] О принципах расчёта транспортных узлов / П. А. Козлов, С. П. Вакуленко, В. П. Козлова, Н. Ю. Евреенова // *Мир транспорта*. – 2021. – Т. 19, № 4(95). – С. 6–12. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-4-1.
- [11] Li Y., et al. A General Model and Efficient Algorithms for Reliable Facility Location Problem Under Uncertain Disruptions // *INFORMS Journal on Computing*. 2021. Vol. 34, No. 1. P. 407–426. DOI: 10.1287/ijoc.2021.1063.
- [12] Германчук, М. С. Метаэвристические алгоритмы для многоагентных задач маршрутизации / М. С. Германчук, Д. В. Лемтюжников, В. А. Лукьяненко // *Проблемы управления*. – 2020. – № 6. – С. 3–13. – DOI 10.25728/ru.2020.6.1.
- [13] Lasić, T. Optimization of transport network using mathematical methods / T. Lasić, T. Rožić, R. Stanković // *Transportation Research Procedia*. – 2023. – Vol. 73. – P. 5-16. – DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.885.
- [14] Архипова, О. О. Решение транспортной задачи "алгоритмом Дейкстры" / О. О. Архипова, А. Н. Каплунов, Л. Ю. Шевырев // *Тенденции развития науки и образования*. – 2021. – № 69-2. – С. 29–32. – DOI 10.18411/ij-01-2021-51.
- [15] Бородулина, С. А. Влияние рисков внешней среды на реализацию проектов в транспортной сфере / С. А. Бородулина, Г. А. Костин, Л. С. Трофимова // *Экономика и управление*. – 2021. – Т. 27, № 10(192). – С. 796–803. – DOI 10.35854/1998-1627-2021-10-796-803.
- [16] Калюжный, А. В. Алгоритм поиска кратчайшего пути между подвижными объектами транспортной сети / А. В. Калюжный, В. Г. Терехов, С. С. Зыкова // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. – 2020. – № 3(23). – С. 5–10.
- [17] Zhi Wang, Ming Zhong, Yuanyuan Zhu, Tiejun Qian, Mengchi Liu, and Jeffrey Xu Yu. *On More Efficiently and Versatilely Querying Historical -Cores*. PVLDB, 18(5): 1335 - 1347, 2025 doi:10.14778/3718057.3718063.
- [18] Чунихин, С. А. Математическое моделирование оптимальной дислокации распределительных центров в цепях поставок / С. А. Чунихин // *Проблемы формирования единого пространства экономического и социального развития стран СНГ (СНГ-2021): Материалы ежегодной Международной научно-практической конференции*. В 2-х томах, Тюмень, 29 октября 2021 года / Отв. редакторы О.М. Барбаков, Ю.А. Зобнин. Том 2. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – С. 420–424.
- [19] Hosseini-Nasab H., Nasrollahi S., Fakhrazad M.B., Honarva M. 2023. Transportation cost reduction using cross-dock linking, *Journal of Engineering Research*, 11.1, 100015.
- [20] Бараш, А. Л. Оценка риска возникновения опасных ситуаций при перевозках опасных грузов / А. Л. Бараш, Р. Ш. Сенжапов // *Актуальные вопросы перспективных направлений применения автомобильной и специальной техники: Сборник научных трудов VIII Межведомственной научно-практической конференции*, Санкт-Петербург, 18 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Медиапаир, 2024. – С. 32–35.

# Risk-based approach to locating supply centers on the transport network

D. S. Polikarpov, E. Yn. Kosenko

**Abstract**—This article presents a risk-based approach to the placement of logistics supply centers (CMTS) taking into account dynamically changing risks in transport networks. The developed approach combines methods of network analysis, spatial optimization and risk-oriented management, ensuring sustainable supply under uncertainty.

The key feature of the algorithm is the adaptive mechanism for forming a set of potential CMTS placement locations, which, based on a modified shortest path search algorithm, determines coverage areas taking into account specified restrictions on the radius of action and the acceptable risk level. This mechanism ensures the selection of such CMTS placement locations that guarantee supply of nodes along safe routes. The algorithm is applicable to logistics planning in specialized tasks that require prompt deployment of sustainable supply systems (supply of military units, emergency response, etc.).

The practical significance of this work lies in its applicability to planning logistics systems operating in rapidly changing environments. The results are valuable for logistics and infrastructure management professionals, as well as emergency management agencies, ensuring the reliability of supply chains in dynamically changing conditions.

**Keywords**—optimal placement, logistics centers, transportation network, risk-based approach, coverage areas, network analysis, Dijkstra's algorithm.

## REFERENCES

- [1] Liu Y., Lei H., Zhang Z., Wu Z. Emergency response facility location in transportation networks: A literature review // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2021. Vol. 8, No. P. 153–169. DOI: 10.1016/j.jtte.2021.03.001
- [2] Zio E., et al. Network-risk: an open GIS toolbox for estimating the implications of transportation network damage due to natural hazards // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2020. Vol. 20. P. 1421–1438. DOI: 10.5194/nhess-20-1421-2020
- [3] Polikarpov, D. S. Criteria for determining the location of logistics centers // D. S. Polikarpov // Information technology, systems analysis and management (ITSAM-2024): Collection of papers of the XXII All-Russian scientific conference of young scientists, graduate students and students. In 2 volumes, Taganrog, December 5–7, 2024. – Taganrog: DirectScience (IP Shkurkin D.V.), 2024. – P. 461–467.
- [4] Gataullina, D. I. Risk Management in Transport Logistics / D. I. Gataullina // XXVIII All-Russian Postgraduate and Master's Scientific Seminar Dedicated to the Power Engineer's Day: Proceedings of Reports. In 3 volumes, Kazan, December 5–6, 2024. – Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2024. – P. 169–172.
- [5] Polikarpov D.S., Kosenko E.Yu. Optimization of the placement of material and technical supply centers in the context of dynamically changing target criteria // *News of universities. North Caucasus region. Tech. sciences*. 2025. No. 3. pp. 26–32. DOI: 10.17213/15603644202532632
- [6] Sundarakani B., Pereira V., Ishizaka A. Robust facility location decisions for resilient sustainable supply chain performance in the face of disruptions // *The International Journal of Logistics Management*. 2020. Vol. 32, No. 2. P. 357–385. DOI: 10.1108/IJLM-12-2019-0333
- [7] Li Y., et al. A two-stage robust optimization model for emergency service facilities location-allocation problem under demand uncertainty and sustainable constraints // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 86129. DOI: 10.1038/s41598-025-86129-1
- [8] Bliznyakova, E. A. Comparative analysis of methods for finding the shortest path in a graph / E. A. Bliznyakova, A. A. Kulikov, A. V. Kulikov // *Architecture, construction, transport*. - 2022. - No. 1. - P. 80–87. - DOI 10.31660/2782-232X-2022-1-80-87.
- [9] Kairos: Efficient Temporal Graph Analytics on a Single Machine. ... Temporal graph analytics on persistent memory. *ST Joana Matos Fonseca da Trindade, Jawad Khan*. 2023.
- [10] On the principles of calculating transport hubs / P. A. Kozlov, S. P. Vakulenko, V. P. Kozlova, N. Yu. Evreenova // *World of Transport*. - 2021. - Vol. 19, No. 4 (95). - P. 6–12. - DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-4-1.
- [11] Li Y., et al. A General Model and Efficient Algorithms for Reliable Facility Location Problem Under Uncertain Disruptions // *INFORMS Journal on Computing*. 2021. Vol. 34, No. 1. P. 407–426. DOI: 10.1287/ijoc.2021.1063
- [12] Germanchuk, M. S. Metaheuristic algorithms for multi-agent routing problems / M. S. Germanchuk, D. V. Lemtyuzhnikova, V. A. Lukyanenko // *Problems of Control*. - 2020. - No. 6. - P. 3–13. - DOI 10.25728/pu.2020.6.1.
- [13] Lasić, T. Optimization of transport network using mathematical methods / T. Lasić, T. Rožić, R. Stanković // *Transportation Research Procedia*. - 2023. - Vol. 73. - P. 5–16. - DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.885.
- [14] Arkhipova, O. O. Solving the transport problem using the "Dijkstra algorithm" / O. O. Arkhipova, A. N. Kaplunov, L. Yu. Shevryev // *Trends in the Development of Science and Education*. - 2021. - No. 69-2. - P. 29–32. - DOI 10.18411/jj-01-2021-51.
- [15] Borodulina, S. A. The influence of external environmental risks on the implementation of projects in the transport sector / S. A. Borodulina, G. A. Kostin, L. S. Trofimova // *Economics and Management*. - 2021. - Vol. 27, No. 10 (192). - P. 796–803. - DOI 10.35854/1998–1627-2021-10-796-803.
- [16] Kalyuzhny, A. V. Algorithm for finding the shortest path between moving objects of the transport network / A. V. Kalyuzhny, V. G. Terekhov, S. S. Zykova // *Intelligent technologies in transport*. - 2020. - No. 3 (23). - P. 5–10.
- [17] Zhi Wang, Ming Zhong, Yuanyuan Zhu, Tiejun Qian, Mengchi Liu, and Jeffrey Xu Yu. *On More Efficiently and Versatilely Querying Historical -Cores*. PVLDB, 18(5): 1335 – 1347, 2025 doi:10.14778/3718057.3718063
- [18] Chunikhin, S. A. Mathematical modeling of the optimal location of distribution centers in supply chains / S. A. Chunikhin // *Problems of forming a single space for economic and social development of the CIS countries* (CIS-2021): Proceedings of the annual International scientific and practical conference. In 2 volumes, Tyumen, October 29, 2021 / Responsible. editors O. M. Barbakov, Yu. A. Zobnin. Vol. 2. - Tyumen: Tyumen Industrial University, 2022. - P. 420–424.
- [19] Hosseini-Nasab H., Nasrollahi S., Fakhrazad M.B., Honarva M. 2023. Transportation cost reduction using cross-dock linking, *Journal of Engineering Research*, 11.1, 100015.
- [20] Barash, A. L. Risk assessment of hazardous situations during transportation of dangerous goods / A. L. Barash, R. Sh. Senzhapov // *Actual issues of promising areas of application of automotive and special equipment*: Collection of scientific papers of the VIII Interdepartmental scientific and practical conference, St. Petersburg, April 18, 2024. – Saint Petersburg: Mediapapir, 2024. – P. 32–35.