

# МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА С ПРЕДФРАКТАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-4-12

**Кочкаров Расул Ахматович,**  
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия, [rasul\\_kochkarov@mail.ru](mailto:rasul_kochkarov@mail.ru)

**Чиров Денис Сергеевич,**  
Московский технический университет связи и информатики, Россия, Москва, [d.s.chirov@mtuci.ru](mailto:d.s.chirov@mtuci.ru)

**Тимошенко Александр Васильевич,**  
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Россия, Москва, [u567ku78@gmail.com](mailto:u567ku78@gmail.com)

**Казанцев Андрей Михайлович,**  
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Россия, Москва, [kazantsev.andrei@gmail.com](mailto:kazantsev.andrei@gmail.com)

**Manuscript received** 20 November 2024;  
**Accepted** 30 December 2024

**Ключевые слова:** теоретико-графовая модель, структурно-функциональная устойчивость, пространственно-распределенная система мониторинга, информационные средства, оптимизационная задача

В статье рассмотрен вопрос обеспечения структурно-функциональной устойчивости и целостности пространственно-распределенной системы мониторинга в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. Предложено концептуальное представление системы мониторинга в виде сети с многоуровневым информационным взаимодействием и определены особенности решаемой задачи. Для исследования вопроса структурно-функциональной устойчивости предложено использовать многоуровневый предфрактальный граф, динамически изменяющийся во времени и отражающий иерархическую структуру системы мониторинга. Такое представление позволяет учитывать недетерминированность как весовых характеристик каналов связи, так и структуры рассматриваемой системы. Отмечена важность выделения промежутков времени между изменениями структуры системы мониторинга в связи с необходимостью разделения двух типов временных шкал: топологического времени, описывающего редкие, но значительные изменения в структуре графа, и операционного времени, в котором происходят частые и менее значительные изменения характеристик ребер и узлов графа. Предложена модель пространственно-распределенной системы мониторинга с предфрактальной динамической структурой, которая реализует задачу многокритериальной оптимизации с учётом приоритизации информационных каналов. При этом отмечено, что сочетание робастного подхода с двухвременными шкалами в многокритериальной оптимизации создаёт баланс между адаптивностью к быстрым изменениям и устойчивостью к крупным событиям. Это приводит к повышению общей эффективности и надёжности системы, позволяя ей эффективно функционировать в условиях сложной и изменчивой среды, характерной для систем с предфрактальной структурой. Согласованное управление на всех уровнях и временных шкалах: интеграция влияния разных уровней и временных шкал позволяет оптимизировать систему в целом, а не только её отдельные части.

#### Информация об авторах:

**Кочкаров Расул Ахматович,** Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, доцент кафедры, к.э.н., доцент, Москва, Россия. ORCID: 0000-0003-3186-3901

**Чиров Денис Сергеевич,** Московский технический университет связи и информатики, заведующий кафедрой, д.т.н., профессор, Москва, Россия. ORCID: 0000-0001-8509-4373

**Тимошенко Александр Васильевич,** Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, профессор кафедры, д.т.н., профессор, Москва, Россия. ORCID: 0000-0002-9791-142X

**Казанцев Андрей Михайлович,** Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, доцент кафедры, к.т.н., Москва, Россия. ORCID: 0000-0003-3608-8238

#### Для цитирования:

Кочкаров Р.А., Чиров Д.С., Тимошенко А.В., Казанцев А.М. Модель пространственно-распределенной информационной системы непрерывного мониторинга с предфрактальной динамической структурой в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 4-12.

#### For citation:

R. A. Kochkarov, D. S. Chirov, A. V. Timoshenko, A. M. Kazantsev, "Model of spatially distributed information system of continuous monitoring with pre-fractal dynamic structure under the influence of destabilizing factors," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.1, pp. 4-12. (in Russian)

**Введение**

Современные технологии связи и передачи данных позволяют формировать пространственно-распределенные системы информационного мониторинга (ПРИСМ) с большим количеством разнородных информационных средств (ИС) [1], позволяющих контролировать объекты различной природы на обширных территориях с разными климатическими и ландшафтными особенностями. Вопрос о развитии подобных систем в Российской Федерации стоит особенно остро и актуален ввиду значительной территориальной распределенности, в том числе в труднодоступных и климатически неблагоприятных условиях, в которых отсутствует развитая система коммуникации, что значительно затрудняет применение современных методов мониторинга и диагностирования. Особенности применения ПРИСМ является возможность задействовать устройства мониторинга как наземного, воздушного базирования, так и космических систем [2-7], что накладывает более высокие требования по решению информационно-емких задач, направленных на повышение производительности и повышения интенсивности передачи потоков информации, ее полноте и качеству.

Структура и параметры ПРИСМ, в виду воздействия как внутренних факторов (отсутствие электромагнитной доступности, отказ аппаратуры приема-передачи и т.п.), так и внешних дестабилизирующих факторов (преднамеренные помехи, физическое воздействие и др.) [8], постоянно меняются во времени, что соответствует формированию динамической сети [9-11].

В настоящее время при моделировании как функционирования, так и организации информационного взаимодействия сложной многоэлементной системы находят свое применение математический аппарат теории вероятности и графов, систем массового обслуживания и др. [12-17], что позволяет оценить структурно-функциональную устойчивость системы (сети информационного взаимодействия) в целом на основе связности и готовности каналов передачи данных. Однако, данные модели не в полной мере описывают способы реконфигурации сети в условиях приоритизации передаваемой информации, а также выполняются в отложенном режиме ввиду высокой вычислительной сложности используемых алгоритмов [18-22].

Поэтому актуальным является развитие научно-методического аппарата моделирования информационного взаимодействия элементов ПРИСМ в части повышения оперативности оценки структурно-функциональной устойчивости ПРИСМ.

Цель статьи – разработать модель пространственно-распределенной системы мониторинга, позволяющую производить оценку состояния системы в режиме реального времени в условиях воздействия дестабилизирующих факторов с учетом приоритизации информационных каналов на основе решения задачи обеспечения структурно-функциональной устойчивости и целостности.

**Концептуальное представление ПРИСМ в виде сети с многоуровневым информационным взаимодействием**

В рамках статьи ПРИСМ рассматривается в виде иерархической многоуровневой модели, представляющей собой физическую структуру сети передачи данных в виде средств мониторинга и каналов связи между ними, динамически

изменяющуюся во времени. Каждому средству ставится в соответствие телекоммуникационная аппаратура, которая обеспечивает передачу информационных потоков и команд управления в системе и характеризуется такими показателями как пропускная способность, надежность, производительность, задержки в передаче информации и т.д. Варианты функциональных взаимосвязей между средствами ПРИСМ показаны на рисунке 1.

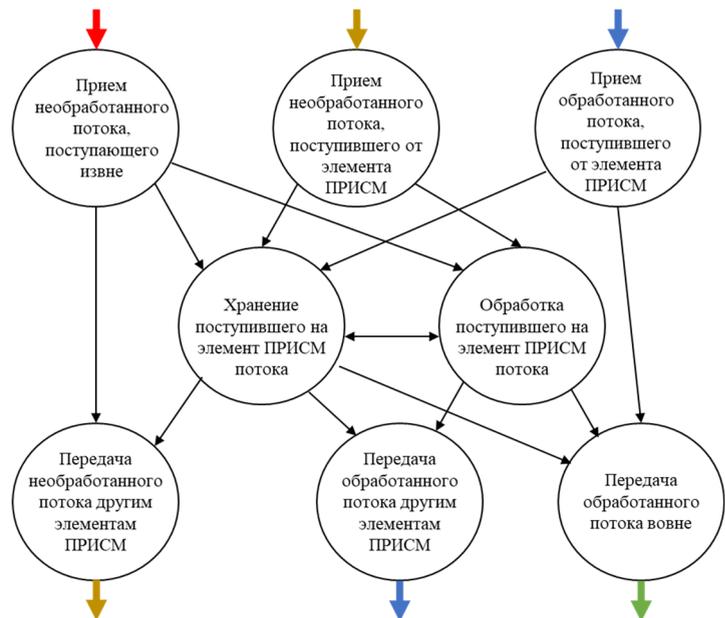


Рис. 1. Функциональные взаимосвязи между средствами ПРИСМ

В качестве примера изменения структурной динамики ПРИСМ (в упрощенном виде) представим сеть, в которой циркулирует два потока информации – управления и текущих данных мониторинга обстановки (рис. 2). Каждое средство системы характеризуется объемом хранимой информации  $V_i, i = \overline{1,8}$ , интенсивностью ее обработки  $k_{i\sigma}$ , где  $i = \overline{1,8}$  – номер элемента сети,  $\sigma \in [p, c]$  – тип информации ( $p$  – информация управления,  $c$  – данные мониторинга обстановки) и передачи  $w_{ij\sigma}$ , где  $i = \overline{1,8}, j = \overline{1,8}, i \neq j$ . Информация о текущей обстановке поступает на вход системы через средства 1 и 7, обрабатывается (средствами 1-4, 7 и 8 с интенсивностью  $\varphi_i\sigma$ ), распределяется 5-м средством и доводится по потребителя информации (средство 6).

Схематичное представление структурной динамики ПРИСМ показано на рисунке 3.

Содержательная постановка задачи оценки состояния ПРИСМ в режиме реального времени в условиях воздействия дестабилизирующих факторов на предмет многоуровневого информационного взаимодействия с учетом приоритизации информационных каналов имеет следующие особенности [23]:

- если объем поступающей информации превышает возможности средств мониторинга по ее обработке, хранению и передаче, то происходит потеря неиспользуемых данных;
- суммарное время обработки и передачи информации ограничивается длительностью интервала постоянства структуры ( $L = l \in L: 0 \leq l < +\infty$ ), которая варьируется в процессе функционирования ПРИСМ.

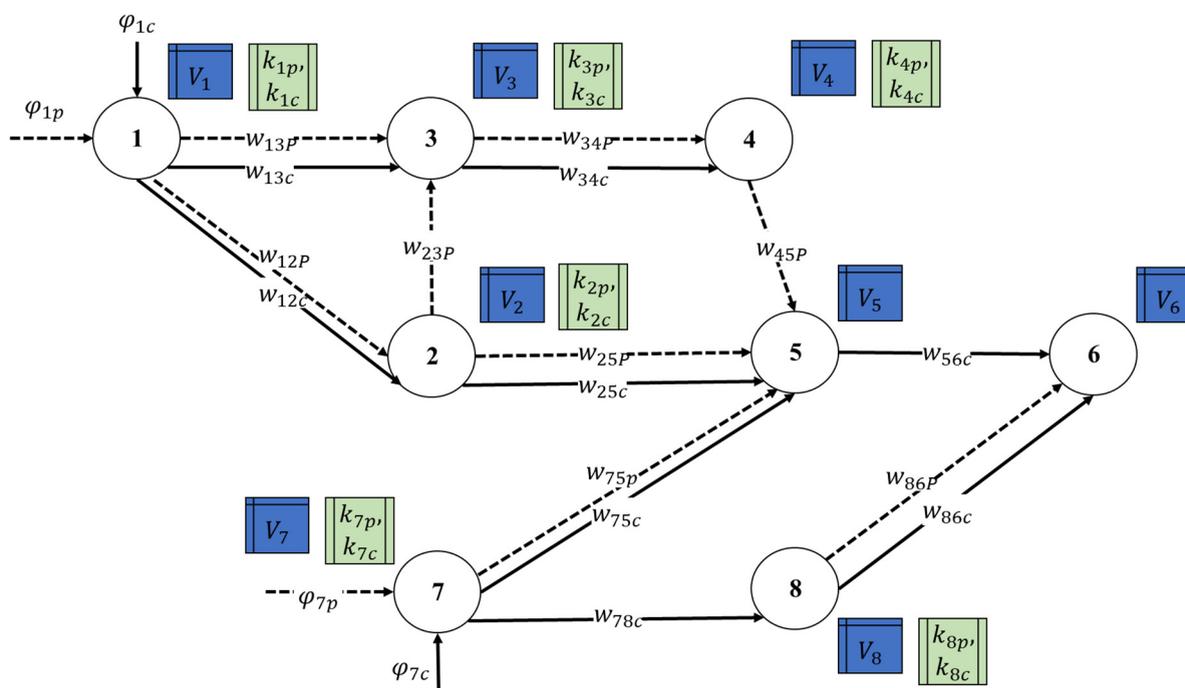


Рис. 2. Схематичное представление ПРИСМ в виде сети с двумя потоками разнородной информации

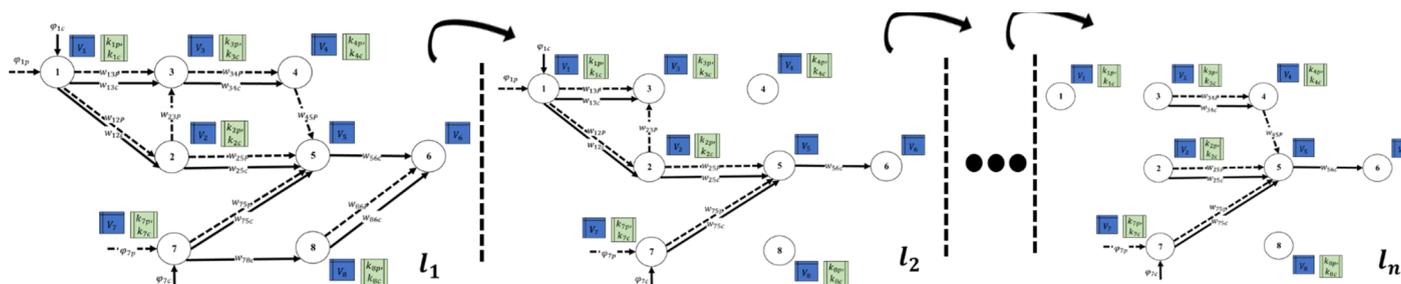


Рис. 3. Схематичное представление структурной динамики ПРИСМ

В целом задача сводится к математической постановке многокритериальной задачи на графах, которая включает множество допустимых решений, многокритериальную функцию, правила сравнения и выбора альтернативных решений. Однако решение классической многокритериальной задачи на графах не полностью охватывает цели, поставленные в рамках статьи – оперативная оценка структурно-функциональной устойчивости и целостности в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

В частности, для моделирования ПРИСМ с многоуровневым информационным взаимодействием в условиях дестабилизирующих факторов требуется учитывать следующие особенности:

- применение динамических графов со специальными свойствами самоподобия и неоднородности, что позволяет моделировать системы с высокой степенью структурной сложности и устойчивости динамически изменяющийся во времени [24-27];

- введение многовзвешенной модели ребер графа, где каждому ребру  $e_{ij} \in G_F$  приписан вектор весов  $w_{ij}(t)$ , зависящий от множественных характеристик (пропускной способности, задержки, надежности и др.) изменяющихся во времени [28, 29].

### Описание структуры ПРИСМ в виде динамического графа со свойствами самоподобия

Для описания структуры ПРИСМ в виде предфрактального динамического графа рассмотрим ориентированный граф. Это начальное представление позволяет эффективно моделировать направленное взаимодействие между средствами и учесть динамические изменения в структуре системы, что в дальнейшем обеспечивает возможность применения специальных свойств для более точного анализа и оценки ее состояния и функционирования.

Пусть система ПРИСМ описывается ориентированным графом  $G = (V, E)$ , где  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – множество вершин, представляющих средства системы, оснащенные телекоммуникационным оборудованием (датчики, сервера, точки обработки данных и т.д.);  $E = \{e_{ij}\} \subseteq V \times V$  – множество ребер (каналов связи) между средствами.

Каждое ребро  $e_{ij} \in E$  взвешено вектором недетерминированных весов  $w_{ij} = [w_{ij}^1, w_{ij}^2, \dots, w_{ij}^k]$  с коэффициентом подобия  $\theta \in (0,1)$ :  $0 < \theta < a/b$ , где  $a, b > 0$  – действительные числа и  $a < b$ , где каждый вес представляет одно из свойств канала связи:

$w_{ij}^1$  – пропускная способность канала;  
 $w_{ij}^2$  – задержка передачи данных;  
 $w_{ij}^3$  – надёжность (вероятность отказа);  
 $w_{ij}^4$  – стоимость использования канала (ресурсы, энергия и т.д.);  
 ...  
 $w_{ij}^k$  – любое другое значимое свойство канала.

При этом недетерминированные веса могут быть представлены одним из трех видов неопределенности – интервальное число, нечеткое множество и временной ряд [30]:

- 1) интервальное число  $w(e^{(l)}) = [w, \bar{w}] \subseteq [\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b]$ ;
- 2) нечеткое множество  $w(e^{(l)}) = \{(w_l, \mu(w_l)) | w_l \in [\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b]\}$  с множеством значений  $\{w_l\}$  и  $\mu(w_l)$  – функцией принадлежности, заданной на отрезке  $[0,1]$ ;
- 3) временной ряд  $w(e^{(l)}) = w_l(e) = \langle w_l \rangle$ , значения  $w_l$  которого лежат на отрезке  $[\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b]$ .

На множестве допустимых решений  $X = X(G) = \{x\}$ :  $x = (V_x, E_x)$ , задается векторно-целевая функция, позволяющая производить оценку состояния ПРИСМ в условиях воздействия дестабилизирующих факторов:

$$F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_M(x), \dots, F_{M+T}(x)) \quad (1)$$

в которой:

$$F_i(x) = op[\omega_i(e)] \rightarrow extr, i = 1, 2 \dots M \quad (2)$$

$$F_i(x) = op[\psi_i(v, e)] \rightarrow extr, i = M + 1, M + 2, \dots, M + T \quad (3)$$

Критерии  $F_i(x)$ ,  $i = \overline{1, M}$  из (2) являются весовыми, а критерии  $F_i(x)$ ,  $i = \overline{M + 1, M + T}$  из (3) – топологическими и задаются аналогично критериям ВЦФ (1). Решением задачи является элемент  $x^0$  из  $X$ , в котором векторно-целевая функция  $F$  принимает предпочтительные значения по критериям  $F_i(x)$ ,  $i = \overline{1, M + T}$ .

Структурная динамика ПРИСМ в следствие воздействия дестабилизирующих факторов представляется в виде ориентированного динамического графа  $G = (V, E)$ . Обозначим  $t$  дискретный момент времени, соответствующий топологическому моменту времени графа  $G(t) = (V(t), E(t))$ , тогда структура графа меняется под влиянием внешних факторов, таких как:

- добавление новых узлов или каналов ( $V(t + 1) = V(t) \cup \{v_{new}\}$ ,  $E(t + 1) = E(t) \cup \{e_{new}\}$ );
- удаление узлов или каналов ( $V(t + 1) = V(t) \setminus \{v_{lost}\}$ ,  $E(t + 1) = E(t) \setminus \{e_{lost}\}$ );
- изменение весов ребер в зависимости от нагрузки или внешних воздействий ( $w_{ij}(t + 1) = f(w_{ij}(t))$ , дестабилизирующие факторы).

Изменения в структуре графа (например, появление или удаление узлов и ребер) чаще всего происходят в зависимости от:

- «крупных событий»: таких как сбои, атаки, изменения конфигурации системы или внешние факторы (например, географические изменения или инфраструктурные обновления).
- «инфраструктурные изменения»: изменения, связанные с добавлением новых узлов или каналов связи, выходом из строя оборудования или отключением определённых компонентов системы.

– «внешние дестабилизирующие факторы»: которые могут приводить к непредсказуемым изменениям в топологии сети [31].

Предфрактальные динамические графы обладают следующими специальными свойствами:

– кластеризация, где каждая вершина или подгруппа вершин может быть организована в предфрактальные структуры, что добавляет масштабируемость и устойчивость в сетевую архитектуру;

– иерархичность, граф ПРИСМ представляется в виде многоуровневой сети. На каждом уровне происходит самоподобное разделение на подгруппы узлов и каналов. Например, на самом верхнем уровне могут размещаться узлы-центры, которые координируют работу подгрупп на нижнем уровне [8].

С точки зрения предфрактального графа  $G_F$  его структура формируется с помощью рекурсивного добавления подграфов:

$G_F^{(0)} = G_0$  – базовая структура графа (например, простая решётка или дерево);

$G_F^{(k+1)} = f(G_F^{(k)})$  – предфрактальный граф на уровне  $k + 1$ , где функция  $f$  определяет процесс рекурсивного замещения вершин для формирования фрактальной структуры.

Таким образом, предфрактальный граф на уровне  $k$  содержит множество узлов и ребер, организованных по выбранному шаблону, и выражается в виде:

$$G_F^{(k)} = \bigcup_{i=1}^{N_k} G_F^{(k-1)} \oplus \{\text{соединяющие ребра}\},$$

где  $N_k$  – количество копий подграфов на уровне  $k$ , а оператор  $\oplus$  обозначает добавление новых ребер для соединения подграфов.

Как и в модели на ориентированном динамическом графе, для каждого ребра  $e_{ij} \in G_F$  добавляется вектор весов  $w_{ij}$ . Однако, в предфрактальном графе веса могут зависеть от уровня (иерархии) ( $w_{ij}^{(k)}$  – вес ребра на уровне  $k$ ). Таким образом, для более высоких уровней присущи разные характеристики ребер, такие как более высокая пропускная способность или надежность, чем на нижних уровнях:

$$w_{ij}^{(k+1)} = f(w_{ij}^{(k)}),$$

где  $f$  – функция, определяющая зависимость весов от уровня (ранга иерархии). Например, на более высоких уровнях может быть меньшая задержка, так как узлы обеспечивают более эффективное распределение данных.

Так как граф динамический, то  $G_F(t) = (V(t), E(t))$ . Однако, в отличие от детерминированных изменений, интервал времени, в течение которого структура графа остаётся неизменной, может быть недетерминированным.

Важность выделения промежутков между изменениями структуры заключается также в необходимости разделения двух типов временных шкал:

- топологическое время ( $\Delta T$ ), которое описывает редкие, но значительные изменения в структуре графа;
- операционное время ( $\Delta t$ ), в котором происходят частые и менее значительные изменения характеристик ребер и узлов (например, изменение пропускной способности или задержки).

Исходя из этого, наиболее подходящим методом решения задачи многокритериальной оптимизации является иерархическая многокритериальная оптимизация с недетерминированными весами, основанная на робастной оптимизации [32-36]. Этот метод позволяет:

- учитывать многокритериальность системы, где необходимо оптимизировать несколько показателей (задержка, надёжность, пропускная способность и т.д.);
- обрабатывать недетерминированность весов, вызванную изменениями характеристик рёбер и топологии сети [37-40];
- интегрировать обе временные шкалы, обеспечивая эффективную адаптацию на операционном уровне и устойчивость на топологическом уровне, обеспечивать робастность решений, то есть их устойчивость к наихудшим сценариям изменений.

На каждом уровне предфрактального графа структура связи может отличаться, как и характеристики рёбер, такие как пропускная способность, задержка, надёжность и стоимость. Следовательно, веса рёбер для каждого уровня  $k$  изменяются с учетом обеих временных шкал и неопределенности.

1. На операционном уровне:

$$w_{ij}^{(k)}(t + \Delta t) = f_{op}^k(w_{ij}^{(k)}(t), w_{ij}^{(k)}(t - \Delta t), \dots, w_{ij}^{(k)}(t - n\Delta t)) + \varepsilon_{ij}^{k,op}(t),$$

где  $f_{op}^k$  – функции временных рядов на уровне  $k$  для операционной шкалы,  $\varepsilon_{ij}^{k,op}(t)$  – случайные возмущения, моделирующие неопределенность на операционной шкале.

2. На топологическом уровне:

$$w_{ij}^{(k)}(T + \Delta T) = f_{top}^k(w_{ij}^{(k)}(T), w_{ij}^{(k)}(T - \Delta T), \dots, w_{ij}^{(k)}(T - m\Delta T)) + \varepsilon_{ij}^{k,top}(T),$$

где  $f_{top}^k$  – функции временных рядов на уровне  $k$  для топологической шкалы,  $\varepsilon_{ij}^{k,top}(T)$  – случайные возмущения, моделирующие неопределенность на топологической шкале.

Для каждого уровня  $k$  определим свою многокритериальную функцию  $F^{(k)}$ , учитывающую характеристики рёбер, временные изменения и неопределённость [41, 42]:

$$F^k(G_F^{(k)}(t, T)) = \begin{bmatrix} F_1^k((G_F^{(k)}(t, T))) \\ F_2^k((G_F^{(k)}(t, T))) \\ F_3^k((G_F^{(k)}(t, T))) \end{bmatrix}$$

где  $G_F^{(k)}(t, T)$  – отражает состояние системы на уровне  $k$  с учетом обеих временных шкал;  $F_1^k$  – пропускная способность,  $F_2^k$  – задержка,  $F_3^k$  – надёжность.

Агрегированная робастная многокритериальная функция оптимизационной задачи формулируется следующим образом:

$$\min_x \max_{w \in W} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \lambda_i^{(k)} F_i^k(x, w_{ij}^{(k)}(t + \Delta t), w_{ij}^{(k)}(T + \Delta T)) \right\} \quad (1)$$

где  $x$  – вектор решений (например, маршрутов);  $W$  – множество возможных значений весов, определяемое на основе неопределённости на обеих временных шкалах;  $\lambda_i^{(k)}$  – весовые

коэффициенты для каждого критерия  $i$  на уровне  $k$ ;  $w_{ij}^{(k)}(t + \Delta t)$  и  $w_{ij}^{(k)}(T + \Delta T)$  – веса рёбер с учетом изменений на операционной и топологической временных шкалах соответственно.

В качестве примера оптимизации ПРИСМ на разных уровнях с учётом робастности и двух временных шкал, рассмотрим следующий сценарий. ПРИСМ включает три уровня системы связи:

Уровень 1: локальные узлы с высокой скоростью и низкой задержкой, которые подвержены частым операционным изменениям.

Уровень 2: региональные узлы с умеренной пропускной способностью и средней задержкой, подверженные как операционным, так и топологическим изменениям.

Уровень 3: центральные узлы с высокой надёжностью, но более высокой задержкой и стоимостью, где топологические изменения оказывают значительное влияние.

Моделирование весов с учётом двух временных шкал и робастности для уровня 2:

- операционные изменения:

$$w_{ij}^{(2)}(t + \Delta t) = 0.7w_{ij}^{(2)}(t) + 0.2w_{ij}^{(1)}(t) + \varepsilon_{ij}^{2,op}(t);$$

- топологические изменения:

$$w_{ij}^{(2)}(T + \Delta T) = 0.5w_{ij}^{(2)}(T) + 0.3w_{ij}^{(3)}(T) + \varepsilon_{ij}^{2,top}(T).$$

Выбор весовых коэффициентов  $\lambda_i^{(k)}$  между уровнями играют важную роль в многокритериальной оптимизации, так как они определяют приоритеты для различных уровней и критериев. Например, если на уровне 1 важна минимизация задержки, то  $\lambda_2^{(1)}$  будет иметь больший вес, тогда как на уровне 3 может быть приоритетной надёжность, что увеличит значение  $\lambda_3^{(3)}$ .

Решение задачи заключается в оптимизации решения  $x$  в формуле (1), которое минимизирует максимальное значение целевой функции при наихудших сценариях изменений весов на обеих временных шкалах. Формально выделяются три подкласса задач из  $_{nd}Z_t$  на предфрактальных графах, взвешенных недетерминированными весами ( $nd$  – «non-deterministic»):  $_{ts}Z_t$  – взвешенных временными рядами ( $ts$  – «time-series»);  $_{fu}Z_t$  – взвешенных нечеткими множествами ( $fu$  – «fuzzy»),  $_{in}Z_t$  – взвешенных интервалами ( $in$  – «interval»). В дальнейшем предлагается исследование индивидуальных многокритериальных задач на многовзвешенном предфрактальном графе с недетерминированными весами, где для каждой задачи необходимо разработать алгоритмы поиска решений, определить вычислительные сложности алгоритмов и оценки критериев:

- задача размещения центра ( $_{nd}Z_1$ ) – алгоритмы  $_{in}\alpha$ ,  $_{fu}\alpha$ ,  $_{ts}\alpha$ ;
- задача размещения медианы ( $_{nd}Z_2$ ) – алгоритмы  $_{in}\beta$ ,  $_{fu}\beta$ ,  $_{ts}\beta$ ;
- задача выделения остовного леса ( $_{nd}Z_3$ ) – алгоритмы  $_{in}\chi$ ,  $_{fu}\chi$ ,  $_{ts}\chi$ ;
- задача покрытия цепями ( $_{nd}Z_9$ ) – класс алгоритмов  $_{in}\aleph$ ,  $_{fu}\aleph$ ,  $_{ts}\aleph$ ;
- задача ранговыми звездами ( $_{nd}Z_{10}$ ) – алгоритмы  $_{in}\aleph^3$ ,  $_{fu}\aleph^3$ ,  $_{ts}\aleph^3$ .

Интеграция робастного подхода и двух временных шкал, включая явный учёт топологической временной шкалы в многокритериальной оптимизации, позволяет эффективно управлять сложной динамикой системы с предфрактальной структурой. Это обеспечивает ряд важных преимуществ [43]:

- система быстро реагирует на частые и мелкие изменения в характеристиках рёбер, поддерживая высокую производительность и эффективность в условиях динамичной среды;

- надёжность системы сохраняется при редких, но существенных изменениях структуры сети, что критически важно для долгосрочной стабильности и непрерывности работы;

- повышается надёжность принимаемых решений за счёт моделирования наихудших сценариев и учета вариативности параметров, что позволяет минимизировать риски и нежелательные последствия изменений.

- интеграция влияния разных уровней и временных шкал способствует оптимизации системы в целом, а не только ее отдельных частей, обеспечивая гармоничную и эффективную работу всей структуры.

Таким образом, сочетание робастного подхода с двухвременными шкалами в многокритериальной оптимизации создаёт баланс между адаптивностью к быстрым изменениям и устойчивостью к крупным событиям. Это приводит к повышению общей эффективности и надёжности системы, позволяя ей эффективно функционировать в условиях сложной и изменчивой среды, характерной для систем с предфрактальной структурой. Согласованное управление на всех уровнях и временных шкалах: интеграция влияния разных уровней и временных шкал позволяет оптимизировать систему в целом, а не только её отдельные части.

### Заключение

ПРИСМ с предфрактальной динамической структурой представляет собой инновационный подход к решению задач многокритериальной оптимизации, который обеспечивает более полное и эффективное решение благодаря нескольким ключевым преимуществам.

Во-первых, предфрактальная динамическая структура системы мониторинга позволяет создать гибкую и адаптивную архитектуру, которая может эволюционировать в ответ на изменения внешних условий и внутренних требований. Эта структура характеризуется многоуровневыми и взаимосвязанными элементами, что способствует лучшему управлению и координации различных аспектов мониторинга. Гибкость такой архитектуры важна для многокритериальной оптимизации, так как позволяет системе эффективно интегрировать и анализировать информацию по множеству критериев, которые могут меняться со временем.

Во-вторых, пространственная распределённость системы мониторинга обеспечивает эффективное распределение ресурсов и оперативный доступ к данным, что особенно важно для многокритериальной оптимизации. Распределённая архитектура позволяет системе эффективно обрабатывать и анализировать информацию, поступающую из различных источников и регионов, что способствует более точному и своевременному принятию решений. Приоритизация информационных каналов в такой системе позволяет сосредоточить внимание на наиболее критичных аспектах, улучшая общую эффективность мониторинга и оптимизации.

В-третьих, предфрактальная структура способствует лучшему управлению сложными взаимосвязями и взаимодействиями между различными элементами системы. Это позволяет системе мониторинга учитывать и моделировать сложные зависимости и влияния, что особенно важно в условиях многокритериальной оптимизации. Способность системы учитывать и анализировать сложные данные и их взаимосвязи способствует более глубокому пониманию и управлению многокритериальными задачами, что повышает точность и эффективность оптимизации.

В-четвертых, приоритизация информационных каналов в пространственно-распределённой системе позволяет эффективно управлять потоками данных, фокусируя ресурсы на наиболее важных и актуальных задачах. Это улучшает структурно-функциональную устойчивость системы, обеспечивая её способность адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям, сохраняя при этом высокую эффективность и надёжность.

Таким образом, модель ПРИСМ с предфрактальной динамической структурой представляет собой мощный инструмент для решения задач многокритериальной оптимизации. Её способность обеспечивать гибкость, эффективное распределение ресурсов, учёт сложных взаимосвязей и приоритизацию информационных каналов позволяет существенно повысить структурно-функциональную устойчивость системы, что в свою очередь способствует более эффективному и точному решению оптимизационных задач в сложных и изменяющихся условиях.

### Литература

1. Шевцов В.А., Казанцев А.М., Тимошенко А.В., Кочкаров Р.А., Прокopcина С.В. Показатель структурной эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределённой системы мониторинга // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 2. С. 124-131. DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.2.019.
2. Ненашев В.А., Сенцов А.А. Пространственно-распределённые системы радиолокационного и оптического мониторинга: монография. СПб: ГУАП, 2022. 191 с.
3. Зюзин А.В., Кныш М.В., Разиньков С.Н., Тимошенко А.В. Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно-распределённой системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 3. С. 600-609.
4. Казанцев А.М., Кныш М.В., Макаров М.К. Выбор рационального состава группы радиоинформационных сенсоров пространственно-распределённой системы мониторинга // Труды МАИ: сетевой журн. 2022. №127. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-ratsionalnogo-sostava-gruppy-radioinformatsionnyh-sensorov-prostranstvenno-raspredelelennoy-sistemy-monitoringa>
5. Акиншин Р.Н., Шевченко Д.В., Чернышков А.И. Обобщённая модель пространственно-распределённой системы обработки информации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. №9-1. С. 32-38.
6. Чиров Д.С., Лобов Е.М. Выбор сигнально-кодовой конструкции для командно-телеметрической линии радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами средней и большой дальности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №10. С. 21-28.

7. Чиров Д.С., Лобова Е.О. Компенсатор дисперсионных искажений широкополосных сигналов декаметрового диапазона, построенный на базе банка цифровых фильтров. Теория и эксперимент // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №4. С. 57-65.
8. Макаренко С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 337 с.
9. Масленников О.В., Некоркин В.И. Адаптивные динамические сети // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. Вып. 7. С. 745-756.
10. Kochkarov R., Kochkarov A. Introduction to the Class of Prefractal Graphs. Mathematics. 2022. Vol. 10, No. 14. P. 2500. DOI 10.3390/math10142500.
11. Буслев А.П., Кучелев Д.А., Яшина М.В. Динамические системы и математические модели графика информации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №3. С. 22-38.
12. Рыжиков Ю.И. Численные методы теории очередей: учебное пособие. СПб.: Лань, 2019. 512 с.
13. Молев А.А., Тутов К.Д. Имитационная модель функционирования системы сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.1>
14. Chirov D.S., Kandaurova E.O. Identification of Available Trunking Communication Systems in Heterogeneous Cognitive Radio Access Networks // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Russia, 2019, pp. 1-7, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813969.
15. Kovtun V., Izonin I., Gregus M. Model of functioning of the centralized wireless information ecosystem focused on multimedia streaming. Egyptian Informatics Journal. 2022. Vol. 23. Iss. 4, pp. 89-96, <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.06.009>.
16. Кругликов С.В., Филипченко И.В., Зализко А.Ю., Бекиш А.Р. Модель беспроводной сети передачи данных динамической информационно-управляющей системы // Информатика. 2019. Т. 16. № 1. С. 58-74.
17. Borodin V.V., Kletskov D.A., Timoshenko A.V., Shevtsov V.A. Multi-Agent Dynamic Model of the Multi-Criteria Information Interaction of Structural Elements of a Self-Organizing Data Transmission Network of a Ground-Air Monitoring System. J. Comput. Syst. Sci. Int. 2022. Vol. 61, pp. 990-1002 <https://doi.org/10.1134/S1064230722060053>
18. Михайлов Р.Л., Макаренко С.И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. №4 (12). С. 69-79.
19. Voevodin V. A model for assessing the functional stability of information infrastructure elements for conditions of exposure to multiple computer attacks. Informatics and Automation. 2023. Iss. 22. Vol. 3, pp. 691-715.
20. Aziz T., Lin Z., Waseem M., Liu S. Review on optimization methodologies in transmission network reconfiguration of power systems for grid resilience // Int Trans Electr Energ Syst. 2021. Vol. 31. Iss. 3. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12704>
21. Pereira E.C., Barbosa C.H.N.R., Vasconcelos J.A. Distribution Network Reconfiguration Using Iterative Branch Exchange and Clustering Technique. Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 5. 20 p. <https://doi.org/10.3390/en16052395>
22. Abu-Elanien A.E.B., Salama M.M.A., Shaban K.B. Modern network reconfiguration techniques for service restoration in distribution systems: A step to a smarter grid // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57. Iss. 4. Pp. 3959-3967, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.03.011>
23. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Москвин Б.В., Григорьев К.Л. Модифицированная модель гибкого перераспределения технологических операций информационного взаимодействия // Изв. Вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11. С. 25-30.
24. Айзерман М.А., Гусев Л.А., Петров С.В., Смирнова И.М., Тененбаум Л.А. Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики) // Исследования по теории структур. М.: Наука, 1988. С. 5-76.
25. Кочкаров А.А., Салтагаров М.Б., Кочкаров Р.А. Моделирование разрушения сложных систем с ациклической структурой // Управление большими системами: сборник трудов. 2007. № 17. С. 103-120.
26. Chen L., Wang L., Zeng C., Liu H., Chen J. DHGEEP: A Dynamic Heterogeneous Graph-Embedding Method for Evolutionary Prediction. Mathematics. 2022. Vol. 10. Iss. 22. <https://doi.org/10.3390/math10224193>
27. Zang X., Tang B. Self-supervised Dynamic Graph Embedding with evolutionary neighborhood and community. Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 228. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120409>.
28. Форд Л., Фалкерсон Д. Потоки в сетях. М.: Мир, 1966. 276 с.
29. Wang Y., Yuan Y., Ma Y., Wang G. Time-Dependent Graphs: Definitions, Applications, and Algorithms. Data Science and Engineering. 2019. Vol. 4. Pp. 352-366. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41019-019-00105-0>
30. Кочкаров Р.А., Кочкаров А.А., Казанцев А.М. Многокритериальная задача сетевого планирования разработки сложной технической системы // Хроноэкономика. 2019. № 1(14). С. 10-14.
31. Касьянов В.Н., Касьянова Е.В. Модель атрибутированных иерархических графов с портами для визуализации сложно структурированной информации // Преподавание информационных технологий в российской Федерации: Сборник научных трудов Двадцать первой открытой Всероссийской конференции, Нижний Новгород, 18-19 мая 2023 года. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2023. 10 С.
32. Kunjur A., Krishnamurthy S. A robust multi-criteria optimization approach. Mechanism and Machine Theory. 1997. Vol. 32. Iss. 7, pp. 797-810. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(97\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(97)00007-4).
33. Nejadseyfi O., Geijselaers H.J.M., van den Boogaard A.H. Robust optimization based on analytical evaluation of uncertainty propagation. Engineering Optimization. 2018. Vol. 51 No. 9, pp. 1581-1603. DOI: 10.1080/0305215X.2018.1536752.
34. Немировский А.С. Основные концепции и результаты робастной оптимизации в применении к линейному программированию с неточными данными // Cloud of science. 2014. Т. 1. № 2. С. 180-190.
35. Belenky A., Fedin G., Kornhauser A. Robust mathematical models associated with negotiating financial investments in large-scale transportation projects. IFORS 2017 Technical Program. 2017. P. 115.
36. Пролубников А.В. Подходы к решению задач дискретной оптимизации с интервальной целевой функцией // Вычислительные технологии. 2021, Т. 26. № 6. С. 82-109. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.6.007
37. Прокофьев В.С., Малышев В.А. Нечеткие алгоритмы планирования распределения ресурсов системы управления военного назначения // Вестник Воронежского иниверситета высоких технологий 2008. № 3. С. 50-53.
38. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8. No. 3, pp. 338 353.
39. Кофман А. Введение в теорию нечётких множеств. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
40. Ягер Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей: последние достижения. М.: Радио и связь, 1986. 408 с.
41. Дорожко И.В., Осипов Н.А. Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами с использованием априорной информации // Труды СПИИРАН. 2012. № 1(20). С. 165-185,
42. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 144 с.
43. Сирота А.А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. М.: Техносфера, 2006. 280 с.

## MODEL OF SPATIALLY DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM OF CONTINUOUS MONITORING WITH PRE-FRACTAL DYNAMIC STRUCTURE UNDER THE INFLUENCE OF DESTABILIZING FACTORS

**Rasul A. Kochkarov**, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia, [rasul\\_kochkarov@mail.ru](mailto:rasul_kochkarov@mail.ru)

**Denis S. Chirov**, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [d.s.chirov@mtuci.ru](mailto:d.s.chirov@mtuci.ru)

**Alexander V. Timoshenko**, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia, [u567ku78@gmail.com](mailto:u567ku78@gmail.com)

**Andrey M. Kazantsev**, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia, [kazantsev.andrei@gmail.com](mailto:kazantsev.andrei@gmail.com)

### Abstract

The article considers the issue of ensuring structural and functional stability and integrity of spatially distributed monitoring system under the influence of destabilizing factors. The conceptual representation of the monitoring system in the form of a network with multilevel information interaction is proposed and the features of the problem to be solved are determined. To investigate the issue of structural and functional stability, it is proposed to use a multilevel pre-fractional graph, dynamically changing in time and reflecting the hierarchical structure of the monitoring system. This representation will allow to take into account the non-determinism of both the weight characteristics of communication channels and the structure of the system under consideration. The importance of distinguishing time intervals between changes in the structure of the monitoring system is noted due to the need to separate two types of time scales: topological time, which describes rare but significant changes in the graph structure, and operational time, in which there are frequent and less significant changes in the characteristics of edges and nodes of the graph. A model of a spatially distributed monitoring system with a pre-fractional dynamic structure is proposed, which implements the problem of multi-criteria optimization taking into account the prioritization of information channels. It is noted that the combination of robust approach with two-temporal scales in multicriteria optimization creates a balance between adaptability to rapid changes and robustness to large events. This leads to improved overall system performance and reliability, allowing the system to function effectively in the complex and volatile environment characteristic of pre-fractional systems. Coordinated management across levels and time scales: integrating the influence of different levels and time scales allows optimizing the system as a whole, not just its individual parts.

**Keywords:** graph-theoretic model, structural and functional stability, spatially distributed monitoring system, information means, optimization problem

### References

- [1] V. A. Shevtsov, A. M. Kazantsev, A. V. Timoshenko, R. A. Kochkarov, S. V. Prokopchina, "Indicator of structural efficiency of information interaction management in heterogeneous data transmission network of spatially distributed monitoring system", *Bulletin of Voronezh State Technical University* (English translation of *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*), vol. 20, no. 2, 2024, pp. 124-131 (In Russian)
- [2] A. V. Zyuzin, M. V. Knysh, S. N. Razinkov, A. V. Timoshenko, "Justification of the ways of construction and assessment of the efficiency of application of a spatially distributed system of information sensors for monitoring the situation," *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, vol. 22, no. 3, pp. 600-609, 2022. DOI: [doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609) (In Russian)
- [3] A. M. Kazantsev, M. V. Knysh, M. K. Makarov, "Selection of a rational composition of a group of radio information sensors of a spatially distributed monitoring system," *Proceedings of MAI*, no. 127, 2022. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-ratsionalnogo-sostava-gruppy-radioinformatsionnyh-sensirov-prostranstvenno-raspredeleynoy-sistemy-monitoringa> (In Russian)
- [4] V. A. Nenashev, A. A. Sentsov, "Spatially distributed systems of radar and optical monitoring: monograph," St. Petersburg: GUAP, 2022, 191 p. (In Russian)
- [5] R. N. Akinshin, D. V. Shevchenko, A. I. Chernyshkov, "Generalized model of the spatially distributed information processing system," *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, no. 9-1, pp. 32-38, 2017 (In Russian)
- [6] D. S. Chirov, E. M. Lobov, "Choice of signal-code constructure for the command-telemetry radio communication line with medium and long range unmanned aerial vehicles," *T-Comm*, 2017, vol. 11, no.10, pp. 21-28. (in Russian)
- [7] D. S. Chirov, E. O. Lobova, "Wideband HF signals dispersion distortion compensator based on digital filter banks. Theory and approbation," *T-Comm*, 2020, vol. 14, no.4, pp. 57-65. (in Russian)
- [8] S. I. Makarenko, "Models of communication system under conditions of deliberate destabilizing influences and reconnaissance: a monograph," St. Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii, 2020, 337 p. (In Russian)
- [9] O. V. Maslennikov, V. I. Nekorkin, "Adaptive dynamical networks," vol. 187, no. 7, pp. 745-756, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3367/ufne.2016.10.037902> (In Russian)
- [10] R. Kochkarov, A. Kochkarov, "Introduction to the Class of Prefractal Graphs," *Mathematics*, vol. 10, no. 14, p. 2500, 2022. DOI: [10.3390/math10142500](https://doi.org/10.3390/math10142500).
- [11] A. P. Buslaev, D. A. Kuchelev, M. V. Yashina, "Dynamical systems and mathematical models of information traffic," *T-Comm*, 2018, vol. 12, no.3, pp. 22-38. (in Russian)
- [12] Yu. I. Ryzhikov, "Numerical methods of queueing theory: textbook," St. Petersburg: Lan, 2019, 512 p. (In Russian)
- [13] A. A. Molev, K. D. Titov, "Simulation model of ultra-wideband radio communication system under the influence of interference," *Journal of Radio Electronics* (English translation of *Zhurnal Radioelektroniki*), no. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.1> (In Russian)
- [14] D. S. Chirov, E. O. Kandaurova, "Identification of Available Trunking Communication Systems in Heterogeneous Cognitive Radio Access Networks," *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Russia, 2019, pp. 1-7, DOI: [10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813969](https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813969).
- [15] V. Kovtun, I. Izonin, M. Gregus, "Model of functioning of the centralized wireless information ecosystem focused on multimedia streaming," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 89-96, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.06.009>.
- [16] S. V. Kruglikov, I. V. Filipchenko, A. Y. Zalizko, A. R. Bekish, "A model of a wireless data network of dynamic information-controlling system," *Informatics*, vol. 16, no. 1, pp. 58-74 (In Russian)
- [17] V. V. Borodin, D. A. Kletsikov, A. V. Timoshenko, V. A. Shevtsov, "Multi-Agent Dynamic Model of the Multi-Criteria Information Interaction of Structural Elements of a Self-Organizing Data Transmission Network of a Ground-Air Monitoring System," *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, vol. 61, pp. 990-1002, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064230722060053>
- [18] R. L. Mikhailov, S. I. Makarenko, "Estimation of stability of a communication network under the influence of destabilizing factors," *Radio engineering and telecommunication systems* (English translation of *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemi*), no. 4 (12), pp. 69-79, 2013 (In Russian)

- [19] V. Voevodin, "A model for assessing the functional stability of information infrastructure elements for conditions of exposure to multiple computer attacks," *Informatics and Automation*, no. 22, vol. 3, pp. 691-715, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15622/ia.22.3.8> (In Russian)
- [20] T. Aziz, Z. Lin, M. Waseem, S. Liu, "Review on optimization methodologies in transmission network reconfiguration of power systems for grid resilience," *Int Trans Electr Energy Syst.*, vol. 31, no. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12704>
- [21] E. C. Pereira, C. H. N. R. Barbosa, J. A. Vasconcelos, "Distribution Network Reconfiguration Using Iterative Branch Exchange and Clustering Technique," *Energies*, vol. 16, no. 5, 20 p, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052395>
- [22] A. N. Pavlov, D. A. Pavlov, B. V. Moskvina, K. L. Grigoriev, "Modified model of flexible redistribution of technological operations of information interaction," *Journal of Instrument Engineering* (English translation of *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*), vol. 57, no. 11, pp. 25-30, 2014 (In Russian)
- [23] A. E. B. Abu-Elanien, M. M. A. Salama, K. B. Shaban, "Modern network reconfiguration techniques for service restoration in distribution systems: A step to a smarter grid," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, pp. 3959-3967, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.03.011>
- [24.] M. A. Aizerman, L. A. Gusev, S. V. Petrov, I. M. Smirnova, L. A. Tenenbaum, "Dynamic approach to the analysis of structures described by graphs (basics of graph dynamics)," *Research on structure theory* (English translation of *Issledovaniya po teorii struktur*), Moscow: Science, 1988, pp. 7-76
- [25] A. A. Kochkarov, M. B. Salpagarov, R. A. Kochkarov, "Modeling of destruction of complex systems with acyclic structure," *Large-Scale Systems Control*, no. 17, pp. 103-120, 2007 (In Russian)
- [26] L. Chen, L. Wang, C. Zeng, H. Liu, J. Chen, "DHGEEP: A Dynamic Heterogeneous Graph-Embedding Method for Evolutionary Prediction," *Mathematics*, vol. 10, no. 22, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10224193>
- [27] X. Zang, B. Tan, "Self-supervised Dynamic Graph Embedding with evolutionary neighborhood and community," *Expert Systems with Applications*. vol. 228, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120409>.
- [28] R. A. Kochkarov, A. A. Kochkarov, A. M. Kazantsev, " Multicriteria problem of network planning of development of a complex technical system," *HronoEconomics*, no. 1(14), pp. 10-14, 2019 (In Russian)
- [29] L. Ford, D. Falkerson, "Flows in networks," Moscow: Mir, 1966, 276 p. (In Russian)
- [30] Y. Wang, Y. Yuan, Y. Ma, G. Wang, "Time-Dependent Graphs: Definitions, Applications, and Algorithms," *Data Science and Engineering*, vol. 4, pp. 352-366, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41019-019-00105-0>
- [31] V. N. Kasyanov, E. V. Kasyanova, "Model of Attributed Hierarchical Graphs with Ports for Visualization of Complexly Structured Information," *Teaching Information Technology in the Russian Federation: Collection of scientific papers of the Twenty-first Open All-Russian Conference*, Nizhny Novgorod, May 18-19, 2023. Nizhny Novgorod: Publishing house of N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 10 p., 2023 (In Russian)
- [32] A. Kunjur, S. Krishnamurthy, "A robust multi-criteria optimization approach," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 32, no. 7, pp. 797-810, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(97\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(97)00007-4).
- [33] O. Nejadseyfi, H. J. M. Geijselaers, A.H. van den Boogaard, "Robust optimization based on analytical evaluation of uncertainty propagation," *Engineering Optimization*, vol. 51, no. 9, pp. 1581-1603, 2018. DOI: 10.1080/0305215X.2018.1536752.
- [34] A. S. Nemirovskiy, "Basic concepts and results of robust optimization in application to linear programming with imprecise data," *Cloud of science*, vol. 1, no. 2, pp. 180-190, 2014 (In Russian)
- [35] A. Belenky, G. Fedin, A. Kornhauser, "Robust mathematical models associated with negotiating financial investments in large-scale transportation projects," *IFORS 2017 Technical Program*, 115 p., 2017.
- [36] A. V. Prolubnikov, "Approaches to discrete optimization problems with interval objective function," *Computational technologies*, vol. 26, no. 6, pp. 82-109, 2021. (In Russian)
- [37] V. S. Prokofiev, V. A. Malyshev, "Fuzzy algorithms for planning the distribution of military control system resources," *Scientific Journal Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*, no. 3, pp. 50-53, 2008 (In Russian)
- [38] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.
- [39] A. Kofman, "Introduction to the theory of fuzzy sets," Moscow: Radio and Communications, 1982, 432 p. (In Russian)
- [40] R. R. Yager, "Fuzzy sets and the theory of possibilities: Recent achievements," Moscow: Radio and Communications, 1986, 408 p. (In Russian)
- [41] I. Dorozhko, N. Osipov, "Technique of synthesis of optimal strategies for diagnostics of the automated control systems of complex technical objects with the use of aprioristic information," *SPIIRAS Proceedings*, vol. 1(20), pp. 165-185, 2012. DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.20.9>
- [42] V. D. Nogin, "Decision-making in a multi-criteria environment: a quantitative approach," Moscow: FIZMATLIT, 2002, 144 p. (In Russian)
- [43] A. A. Sirota, "Computer modeling and efficiency assessment of complex systems," Moscow: Technosphaera, 2006, 280 p. (In Russian)

#### Information about authors:

**Rasul A. Kochkarov**, Financial University under the Government of the Russian Federation, Associate Professor of the Department, Associate Professor, PhD in Economics, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0003-3186-3901

**Denis S. Chirov**, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0001-8509-4373

**Alexander V. Timoshenko**, Financial University under the Government of the Russian Federation, Professor of the Department, Professor, Doctor of Technical Sciences, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0002-9791-142X

**Andrey M. Kazantsev**, Financial University under the Government of the Russian Federation, Associate Professor of the Department, Associate Professor, PhD (technical sciences), Moscow, Russia. ORCID: 0000-0003-3608-8238