

*На правах рукописи*

**БОРОДАКИЙ Владимир Юрьевич**

**Исследование и разработка методов и средств обоснования  
архитектуры информационных систем сетевидного типа  
специального назначения**

05.13.13 – Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2009

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Забродин Лев Дмитриевич

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор Самуйлов Константин Евгеньевич  
кандидат технических наук, с.н.с. Каргин Владимир Николаевич

Ведущая организация:  
Институт проблем информатики РАН (ИПИ РАН)

Защита диссертации состоится « 25 » ноября 2009 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.03 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, Каширское шоссе, 31, тел: (495)324-84-98, 323-95-26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 115409, Каширское шоссе, 31, диссертационные советы МИФИ.

Автореферат разослан «    » октября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор

Шумилов Ю.Ю

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Современная концепция ведения военных действий базируется на новых технологиях, в первую очередь – на информационно-телекоммуникационных технологиях, которые позволяют обеспечить максимально высокие показатели управления такие, как оперативность принятия решений и эффективность взаимодействия участвующих в военных действиях формирований. В рамках осуществления концепции «сетевцентрической войны», развивается и соответствующая концепция построения центров обработки данных (ЦОД), как составной части АСУ специального назначения. По сути, данная концепция состоит в информационной интеграции всех участвующих в военных действиях подсистем (единые базы данных разведывательной информации, единые системы и инструментарии планирования операций и др.) на базе единой сети передачи данных.

Сетевцентрическая концепция требует объединения всех современных разработок и методологий построения и проектирования распределённых систем, начиная от парадигм проектирования распределённого программного обеспечения (например, GRID, SOA) и заканчивая использованием перспективных средств, отвечающих за передачу данных (например, технология MPLS). Существенно, что применение новой концепции порождает большой объем передаваемой информации, но при этом нерешенным остается вопрос с ограниченной пропускной способностью каналов передачи данных систем специального назначения, что существенно влияет на показатели качества функционирования системы в целом. Из опыта военных операций «Буря в пустыне» и «Свобода Ираку» известно, что из-за ограниченной пропускной способности сетевой инфраструктуры, МО США собственными средствами осуществляло передачу до 20% информации (обслуженная нагрузка), а остальные 80% информации (избыточная нагрузка) передавались через системы связи общего пользования (альтернативные сети), в которых также наблюдались сбои из-за перегрузок.

В диссертационной работе исследуются и разрабатываются методы и средства обоснования архитектуры информационных систем сетевцентрического типа специального назначения. Решаются задачи размещения ЦОД в сетевцентрической системе (СС) специального назначения и оценки качества функционирования системы в условиях ограниченной пропускной способности каналов передачи данных.

На данный момент существуют два класса моделей и методов для исследования проблемы построения СС. Один класс относится к решению задач дискретной оптимизации размещения центров и покрытия множеств и имеет многочисленные приложения. Другой класс описывает вероятностные модели телекоммуникационных сетей, которые в современной терминологии принято называть мультисервисными моделями. Специфика построения СС требует применения моделей обоих типов, что влечет необходимость проведения комплексных исследований для обеспечения большей адекватности

и достоверности планируемых результатов. Значительный вклад в развитие соответствующих методов сделали следующие отечественные и зарубежные ученые и специалисты: Башарин Г.П., Вишневецкий В.М., Емеличев В.А., Журавлев Ю.И., Самуйлов К.Е., Соколов И.А., Шоргин С.Я., Joshi D, Kelly F., Kleinrock L., Ross K., Spohn M. другие. Все вышеизложенное обосновывает актуальность темы диссертационной работы.

Объектом исследований диссертационной работы является архитектура информационных систем сетецентрического типа специального назначения, построенная на базе ЦОД в составе оборудования телекоммуникационной сети с ограниченной пропускной способностью каналов передачи данных (звеньев сети).

Предметом исследований работы являются методы и средства обоснования и построения архитектуры СС в условиях ограниченных пропускных способностей каналов передачи данных, а также методы анализа показателей качества функционирования СС.

Цель диссертационной работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка моделей и методов, предназначенных для решения задачи размещения ЦОД на телекоммуникационной сети с ограниченной пропускной способностью. Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены перечисленные ниже основные задачи.

- Разработка формальной модели размещения ЦОД на графе сети СС и модели обслуживания трафика абонентов в условиях ограниченной пропускной способности звеньев сети.
- Разработка методов для анализа показателей качества функционирования СС, включая построение и анализ вероятностной модели отдельного звена сети и метод расчета величины обслуженной системой нагрузки.
- Разработка алгоритмов и инструментальных программных средств для расчета структурных и нагрузочных параметров сетецентрической системы.
- Разработка методики сбора исходных данных, расчета параметров сетевой инфраструктуры СС и показателей качества ее функционирования.
- Организация и проведение вычислительного эксперимента для анализа структурных и нагрузочных параметров сетевой инфраструктуры СС.

Методы исследования. В работе использованы методы теории графов, теории оптимизации, теории алгоритмов, теории вероятностей и теории телетрафика, методы математического моделирования.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждена вычислительным экспериментом и практической реализацией разработанных методов на телекоммуникационной сети специального назначения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана модель СС в виде графа сети и сформулирована задача размещения центров обработки данных.

2. Исследован и модифицирован метод решения задачи размещения центров на графе сети СС в условиях ограничений на пропускные способности звеньев сети.
3. Построена вероятностная модель и разработаны методы анализа основных вероятностных характеристик сетцентрической системы – вероятности блокировки запросов абонентов и величины обслуженной сетью нагрузки.
4. Разработаны алгоритмы, инструментальные программные средства и методика для сбора данных, расчета структурных и нагрузочных параметров СС.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Графовая модель СС и формализованная задача размещения ЦОД. Модель обслуживания трафика, с учетом случайного характера потока запросов абонентов и объема передаваемых блоков данных.
2. Метод решения задачи размещения центров на графе сети СС в условиях ограничений на пропускные способности звеньев сети.
3. Вероятностная модель функционирования СС, метод и алгоритм расчета ее основных вероятностных характеристик – вероятности блокировки запросов абонентов и величины обслуженной сетью нагрузки.
4. Алгоритмы и инструментальные программные средства для численного решения задачи размещения ЦОД и расчета показателей качества СС.
5. Инженерная методика для поддержки процесса проектирования СС в части расчета и анализа ее структурных и нагрузочных параметров. Результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие, что в зависимости от величины предложенной нагрузки абонентов, часть нагрузки не может быть пропущена из-за ограниченной пропускной способности сети.

Практическая ценность работы. Математические модели, методы, вычислительные алгоритмы и программное обеспечение, разработанные в диссертационной работе, предназначены для расчета и анализа структурных и нагрузочных параметров сетцентрической системы при решении задачи размещения узлов АСУ специального назначения на сети с каналами с ограниченной пропускной способностью. Результаты работы могут быть использованы при проектировании СС специального назначения для обоснованного выбора структурных параметров и прогнозной оценки качества функционирования.

Реализация результатов работы. Работа проводилась в рамках ОКР «Акация-М» и ОКР «Наработка», выполняемых в соответствии с планами ФГУП «Концерн «СИСТЕМПРОМ». Реализация результатов работы подтверждена актом о внедрении.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на:

- научной сессии МИФИ «Информатика и процессы управления. Компьютерные системы и технологии» (Москва, 2006, 2007, 2008 г.г.);
- VIII всероссийской научно-технической конференции «Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования» (Тамбов, 2006 г.);

- IX Международной конференции «Интеллектуальные системы и компьютерные науки» механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, 2006 г.);
- V Всероссийской научной конференции «Проблемы развития системы специальной связи и специального информационного обеспечения государственного управления России» (Орёл, 2007 г.);
- XXXVIII военно-научной конференции «Проблемы развития информационных технологий в системе ВКО РФ» (Тверь, 2009 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 7 – в трудах всероссийских и международных конференций и 2 статьи – в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования научных положений диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 115 наименований, 2-х приложений. Основной текст диссертации содержит 140 страниц текста, 41 рисунка (из них 16 графиков), 24 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, кратко изложены содержание и полученные автором основные результаты, охарактеризованы их научная новизна и практическая ценность.

В главе 1 проведены исследования и анализ задач, возникающих при построении СС.

Показано, что сетцентрическая концепция ведения военных действий, являясь, по сути, концепцией информационной интеграции участвующих в конфликте формирований, основана на архитектуре, включающей три базовые компоненты - подсети: подсеть сенсоров (sensors), подсеть органов принятия решений (decision makers) и подсеть средств воздействия (effectors). Сенсоры обеспечивают получение информации обо всех сторонах ведения боевых действий – состояние, положение, характер действий своих сил и средств; состав, положение и состояние сил и средств противника; результаты и условия ведения боевых действий и т.д. Органы принятия решений реализуют функции анализа ситуации, принятия и реализации решений по управлению сенсорами и средствами воздействия. Средства воздействия выполняют огневое, радиоэлектронное и иное воздействие на вскрытые объекты противника. Таким образом, как объект исследований диссертационной работы, СС представляет собой распределенную информационно-вычислительную сетевую среду, имеющую в своем составе абонентские узлы (вычислительные станции сенсоров и средств воздействия), ЦОД (сервера автоматизированных систем анализа и принятия решений) и телекоммуникационное оборудование (маршрутизаторы, линии связи и пр.).

В соответствии с основными задачами диссертационной работы исследованы сетевые технологии, обеспечивающие эффективное решение задач

маршрутизации и управления потоками данных в сетевом центре системы. Наиболее перспективной для решения этих задач является многопротокольная технология коммутации по меткам (MPLS), разработанная для обеспечения качества передачи информации в IP-сетях.

Основным результатом главы, полученным на основании обзора и анализа литературных источников, является постановка общей задачи оптимизации архитектуры СС, суть которой заключается в следующем.

Известны основные структурные и нагрузочные параметры инфраструктуры СС:

- структура базовой сети передачи данных, пропускная способность звеньев сети, алгоритмы маршрутизации информационных потоков;
- точки присоединения абонентских узлов к базовой сети, пропускные способности абонентских линий;
- нагрузочные параметры трафика, передаваемого между абонентскими узлами и ЦОД.

Задача состоит в построении СС по критериям оптимальности оперативности управления и информированности в условиях распределенной инфокоммуникационной среды с ограниченными пропускными способностями каналов передачи данных. В качестве целевой функции оптимизации показателей качества функционирования СС выбрана величина обслуженной нагрузки, т.е. той части информации, которая может быть пропущена сетью в условиях ограниченной пропускной способности ее звеньев. Выбранный показатель качества СС зависит от числа и места размещения (привязка к узлам сети) ЦОД. Поэтому критериями исследуемой задачи являются:

- минимум числа ЦОД в структуре СС;
- максимум переданной информации (обслуженной системой нагрузки).

Глава 2 посвящена построению формальной модели, описывающей функционирование основных элементов сетевой инфраструктуры СС, выбору и обоснованию методов анализа и алгоритмического обеспечения решаемых задач. Пример сети СС показан на рис. 1.

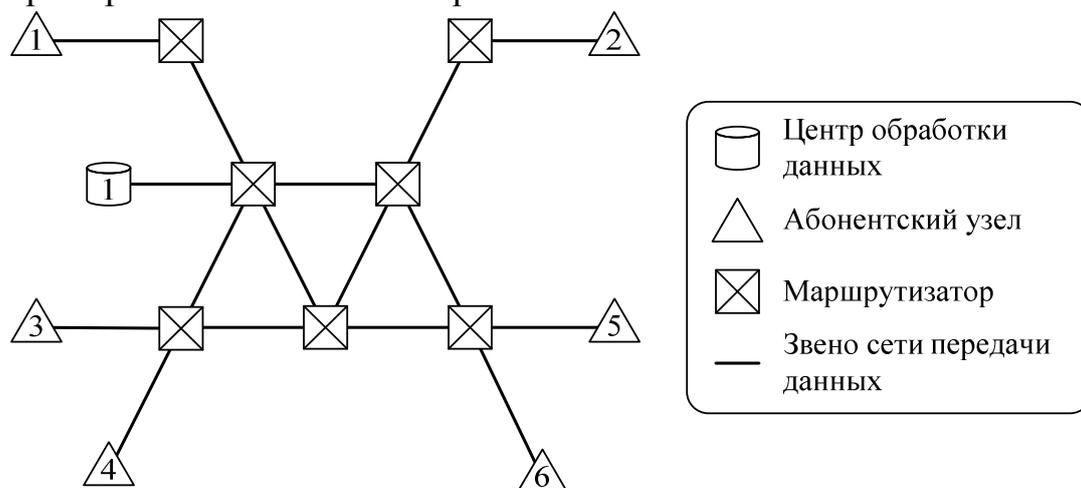


Рис. 1. Пример сети СС

Исследуемую систему удобно представить в виде графа  $G(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ ,  $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ , где каждой вершине соответствует узел СС (абонент, маршрутизатор или узел предполагаемого размещения ЦОД), а ребрам – звенья телекоммуникационной сети. На множестве вершин графа  $G$  введем разбиение  $\mathcal{V} = \mathcal{V}_S \cup \mathcal{V}_R \cup \mathcal{V}_T$  такое, что  $\mathcal{V}_T$  – множество вершин, соответствующих узлам размещения ЦОД;  $\mathcal{V}_S$  – множество вершин, соответствующих абонентским узлам;  $\mathcal{V}_R$  – множество вершин, соответствующих транзитным маршрутизаторам. Пример графа показан на рис. 2.

Формулировку задачи проведем в два этапа. На первом этапе, следуя известной постановке задачи  $(k, r)$ -размещения центров, используются следующие обозначения:  $C(x_i, x_j)$  – пропускная способность ребра  $(x_i, x_j) \in \mathcal{E}$ ;  $d(x_i, x_j)$  – минимальное расстояние между вершинами  $x_i \in \mathcal{V}$  и  $x_j \in \mathcal{V}$ ;  $\mathcal{V}_C$  – множество вершин предполагаемого размещения центров ( $\mathcal{V}_T \subseteq \mathcal{V}_C$ );  $r$  – ограничение на расстояние от вершины графа до центра;  $\mathcal{M}_c := \{s : s \in \mathcal{V}_S, d(s, c) \leq r\}$  – множество достижимости для вершины  $c \in \mathcal{V}_C$ ;  $\omega_c$  – стоимость включения вершины  $c \in \mathcal{V}_C$  в множество  $\mathcal{V}_T$ ;  $k_s$  – ограничение снизу на число центров для вершины  $s \in \mathcal{V}_S$ ;  $k = \max_{s \in \mathcal{V}_S} (k_s)$ ;  $1(\cdot)$  – функция-индикатор.

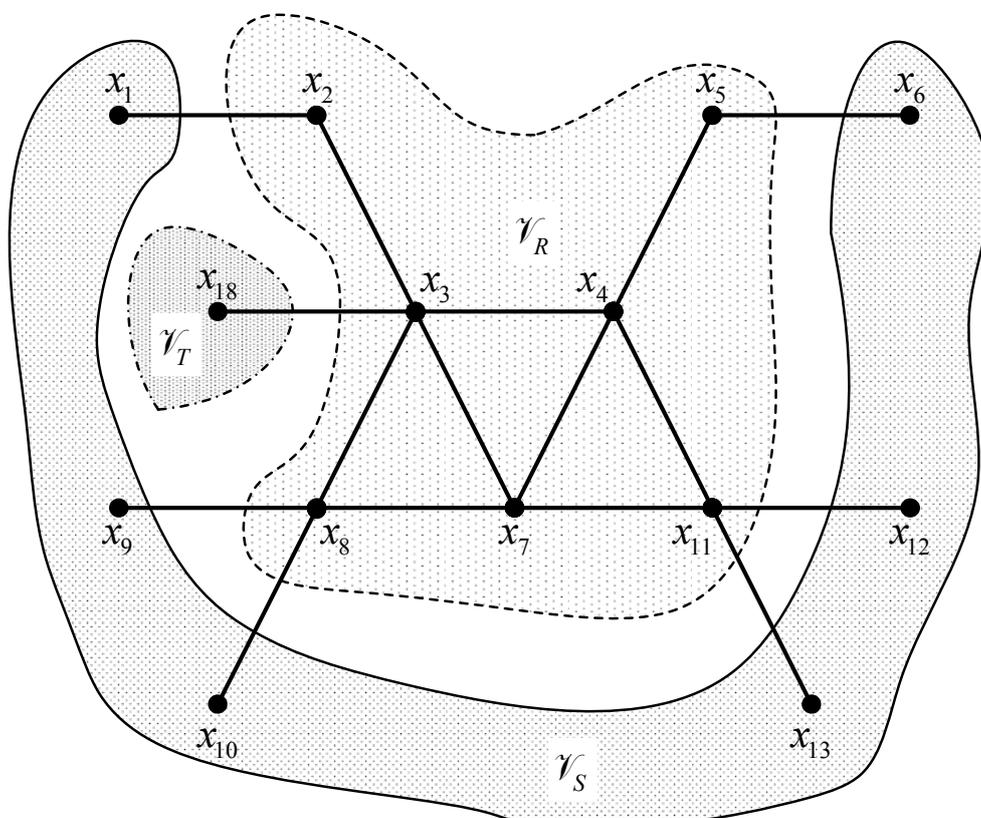


Рис. 2. Пример графа сетевых систем

Тогда задача размещения центров на графе сетцентрической системы может быть записана в следующем виде:

$$\sum_{x_i \in \mathcal{V}_C} 1(x_i \in \mathcal{V}_T) \omega_{x_i} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_{x_i \in \mathcal{V}_C} 1(x_j \in \mathcal{M}_j) 1(x_i \in \mathcal{V}_T) \geq k_j, \quad x_j \in \mathcal{V}_S, \quad (2)$$

Вторым этапом является формулировка задачи оптимизации показателей качества СС. В качестве такого параметра в диссертационной работе выбрана величина обслуженной системой нагрузки, которая создается передаваемыми по запросам абонентов из ЦОД потоками блоков данных и которую требуется максимизировать. Общая задача оптимизации обслуженной нагрузки в СС записывается в виде:

$$\tilde{a} := \sum_{s \in \mathcal{V}_S} \sum_{t \in \mathcal{V}_T} \sum_{l_i(s,t) \in \mathcal{L}(s,t)} \sum_{n \in \mathcal{V}} a_{in}(s,t) (1 - B_{in}(s,t)) \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$B(s) := 1 - \prod_{n \in \mathcal{V}} \left( 1 - \prod_{t \in \mathcal{V}_T} \prod_{l_i(s,t) \in \mathcal{L}(s,t)} B_{in}(s,t) \right) \leq B^*, \quad s \in \mathcal{V}_S, \quad (4)$$

где  $\tilde{a}$  – величина обслуженной системой нагрузки;  $B(s)$  – вероятность блокировки передачи блока данных абонента  $s \in \mathcal{V}_S$ ;  $B^*$  – требование к качеству обслуживания абонентов (ограничение на вероятность блокировки).

Таким образом, в главе 1 диссертационной работы получена одна из возможных формулировок общей задачи оптимизации СС с целевыми функциями (1), (3) и системой ограничений (2), (4). Данная задача является NP-сложной, а метод ее решения в настоящее время не известен. В разделе 2.2 диссертационной работы предложена модификация алгоритма М. Спона для решения задачи (1)-(2) размещения центров и разработан пример, иллюстрирующий работу алгоритма.

#### *Алгоритм $(k, r)$ -размещения центров в сетцентрической системе*

- 1: для всех  $c \in \mathcal{V}_C$  выполнять
- 2:       вычислить  $\mathcal{M}_c$
- 3:    $\mathcal{V}_T \leftarrow \emptyset$ ,  $\mathcal{V}_I \leftarrow \emptyset$ ,  $\gamma \leftarrow 0$
- 4: пока  $\mathcal{V}_S \setminus \mathcal{V}_I \neq \emptyset$  выполнять
- 5:       для всех  $c \in \mathcal{V}_C$  выполнять
- 6:               если  $|(\mathcal{V}_S \setminus \mathcal{V}_I) \cap \mathcal{M}_c| / \omega_c \geq \gamma$ , то
- 7:                        $\gamma \leftarrow |(\mathcal{V}_S \setminus \mathcal{V}_I) \cap \mathcal{M}_c| / \omega_c$
- 8:                        $v \leftarrow c$
- 9:        $\mathcal{V}_T \leftarrow \mathcal{V}_T \cup \{v\}$
- 10:        $\mathcal{V}_C \leftarrow \mathcal{V}_C \setminus \{v\}$
- 11:       для всех  $s \in (\mathcal{V}_S \setminus \mathcal{V}_I) \cap \mathcal{M}_v$  выполнять
- 12:                $k_s \leftarrow k_s - 1$

13: если  $k_s = 0$ , то

14:  $\mathcal{V}_s \leftarrow \mathcal{V}_s \setminus \{s\}$

Для достижения цели исследований предлагается инженерный подход проектирования инфраструктуры СС, который состоит из двух последовательно решаемых задач.

1. Решается задача оптимального размещения ЦОД по критерию минимизации их количества ЦОД в пределах директивных расстояний от центров до абонентских узлов с использованием метрики протокола OSPF. Результатом расчетов являются данные о размещении центров на графе сети, маршруты и оценка величин пропущенных потока с учетом ограничений на пропускные способности звеньев сети.
2. Имея данные о размещении центров и маршрутизации потоков, решается задача оценки показателей качества функционирования СС: вероятностей блокировок передачи блоков данных и величины обслуженной системой нагрузки.

В главе 3 построена модель, позволяющая получить формулы для расчета вероятностных характеристик исследуемой СС – вероятности блокировки запросов абонентов, а также величины обслуженной системой нагрузки.

Для обоснования задачи вероятностного анализа СС пример графа, которой показан на рис. 2, вводится следующая система обозначений:  $\mathcal{N}$  – множество предоставляемых ЦОД типов данных;  $\theta_n$  – длина блока данных  $n$ -типа ( $n$ -блока);  $b$  – требование к минимальному значению ширины полосы пропускания, для передачи блока данных любого типа;  $\lambda_n(s, t)$  – интенсивность потока запросов  $s$ -абонента в  $t$ -центр на передачу  $n$ -блока;  $a_n(s, t) := \lambda_n(s, t)\theta_n$  – нагрузка, создаваемая  $n$ -блоками между  $s$ -абонентом и  $t$ -центром (предложенная нагрузка);  $\mathcal{L}(s, t)$  – множество маршрутов между  $s$ -абонентом и  $t$ -центром;  $l_i(s, t)$  –  $i$ -маршрут доставки информации между  $s$ -абонентом и  $t$ -центром;  $a_{in}(s, t)$  – доля предложенной  $n$ -блоками нагрузки на  $l_i(s, t)$ -маршруте;  $a_i(s, t) := \sum_{n \in \mathcal{N}} a_n(s, t)$  – предложенная нагрузка на  $l_i(s, t)$ -маршруте;  $\mathcal{E}_i(s, t)$  – множество звеньев  $l_i(s, t)$ -маршрута;  $B_{in}(s, t)$  – вероятность блокировки  $n$ -блока на  $l_i(s, t)$ -маршруте.

Пример схемы модели СС показан на рис. 3, где проиллюстрированы введенные выше обозначения. Эти обозначения были использованы выше в формулировке задачи оптимизации обслуженной нагрузки абонентов. Из формулы (3) видно, что, при известных значениях величин предложенных нагрузок  $a_{in}(s, t)$  и известных множествах маршрутов  $\mathcal{L}(s, t)$ , задача оценки величины обслуженной нагрузки  $\tilde{a}$  сводится к вычислению вероятностей блокировок  $B_{in}(s, t)$ . Эти вероятности в предположении, что блокировки на всех звеньях  $l_i(s, t)$ -маршрута происходят независимо в совокупности, можно представить в виде

$$B_{in}(s,t) \approx 1 - \prod_{e \in \xi_i(s,t)} (1 - B_{in}^e(s,t)), \quad n \in \mathcal{N}, l_i(s,t) \in \mathcal{L}(s,t), t \in \mathcal{V}_T, s \in \mathcal{V}_S, \quad (5)$$

где  $B_{in}^e(s,t)$  – вероятность блокировки запроса на передачу  $n$ -блока на  $e$  звене маршрута  $l_i(s,t)$ .

Предположение о независимости блокировок лежит в основе известного метода приближенного расчета вероятностей блокировок – метода просеянной нагрузки, изначально разработанного Ф. Келли для сетей с коммутацией каналов. Данный подход предполагает наличие точного метода для расчета вероятностей блокировок  $B_{in}^e(s,t)$  на отдельном звене сети. Литературный обзор и обоснование применения метода просеянной нагрузки к анализу вероятностных характеристик СС проведено в разделе 3.3, а в разделе 3.2 диссертационной работы построена модель отдельного звена сети СС и получены формулы для вычисления искомых вероятностных характеристик.

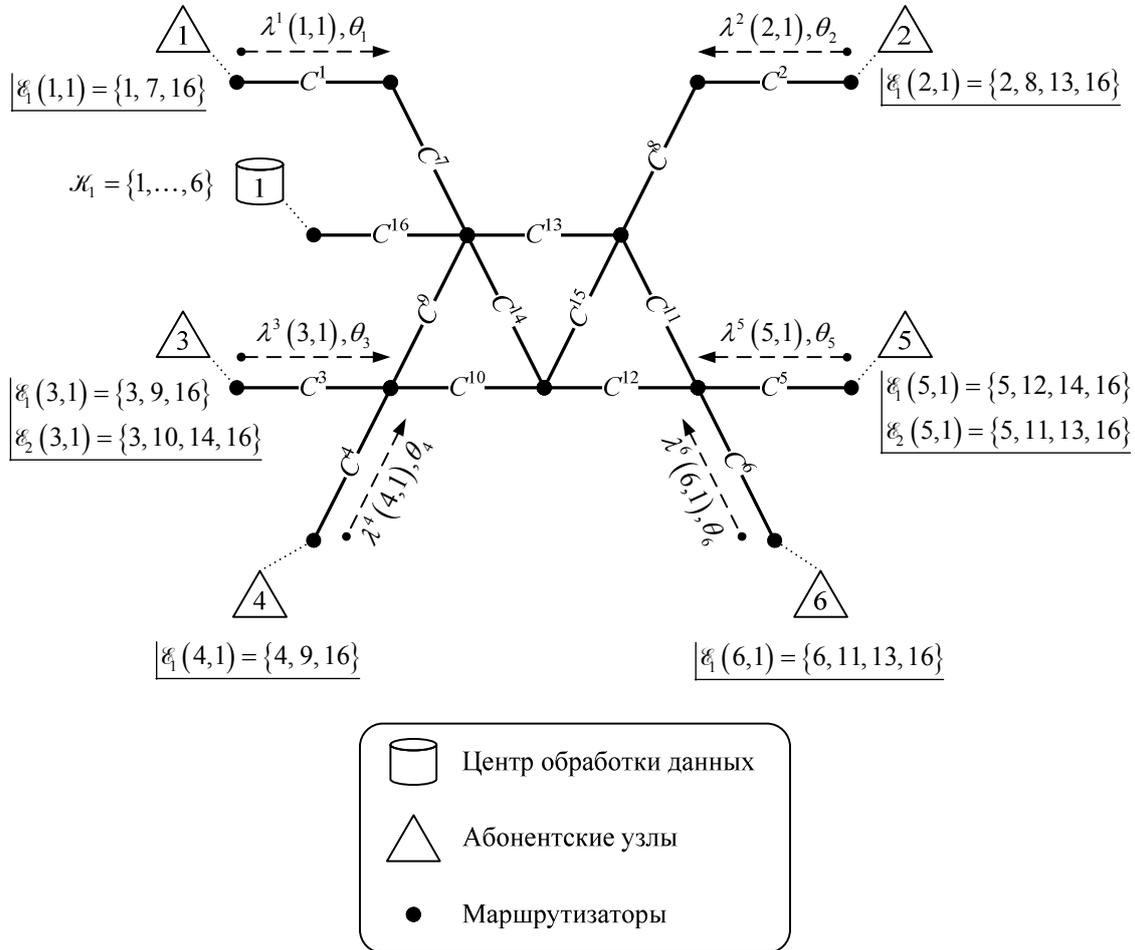


Рис. 3. Схема модели сетецентрической системы

Показано, что для любого отдельно взятого звена сети вероятность  $B_{in}(s,t)$  вычисляется по формуле

$$B_{in}^e(s,t) = B^e = \frac{(a^e)^{\lfloor C^e/b \rfloor} (C^e - a^e)}{(C^e)^{\lfloor C^e/b \rfloor + 1} - (a^e)^{\lfloor C^e/b \rfloor + 1}}, \quad e \in \mathcal{E}, \quad (6)$$

где  $C^e$  – измеряемая в условных единицах емкость  $e$ -звена и  $a^e$  – величина поступающей на  $e$ -звено предложенной нагрузки. Тогда «просеянная» нагрузка  $a^e$  равна предложенной на  $e$ -звено нагрузке, которая не была потеряна на других звеньях маршрута, т. е.

$$a^e = \sum_{s \in \mathcal{V}_S} \sum_{t \in \mathcal{V}_T} \sum_{i: l_i(s,t) \in \mathcal{L}(s,t)} \sum_{n \in \mathcal{N}} a_{in}(s,t) \prod_{e \in \xi_i(s,t) \setminus \{e\}} (1 - B^e), \quad e \in \mathcal{E}. \quad (7)$$

Таким образом, вычисление вероятностей  $B_{in}(s,t)$  сводится к нахождению решения системы трансцендентных уравнений (6)–(7). Это решение может быть найдено методом простых итераций по предлагаемому ниже алгоритму.

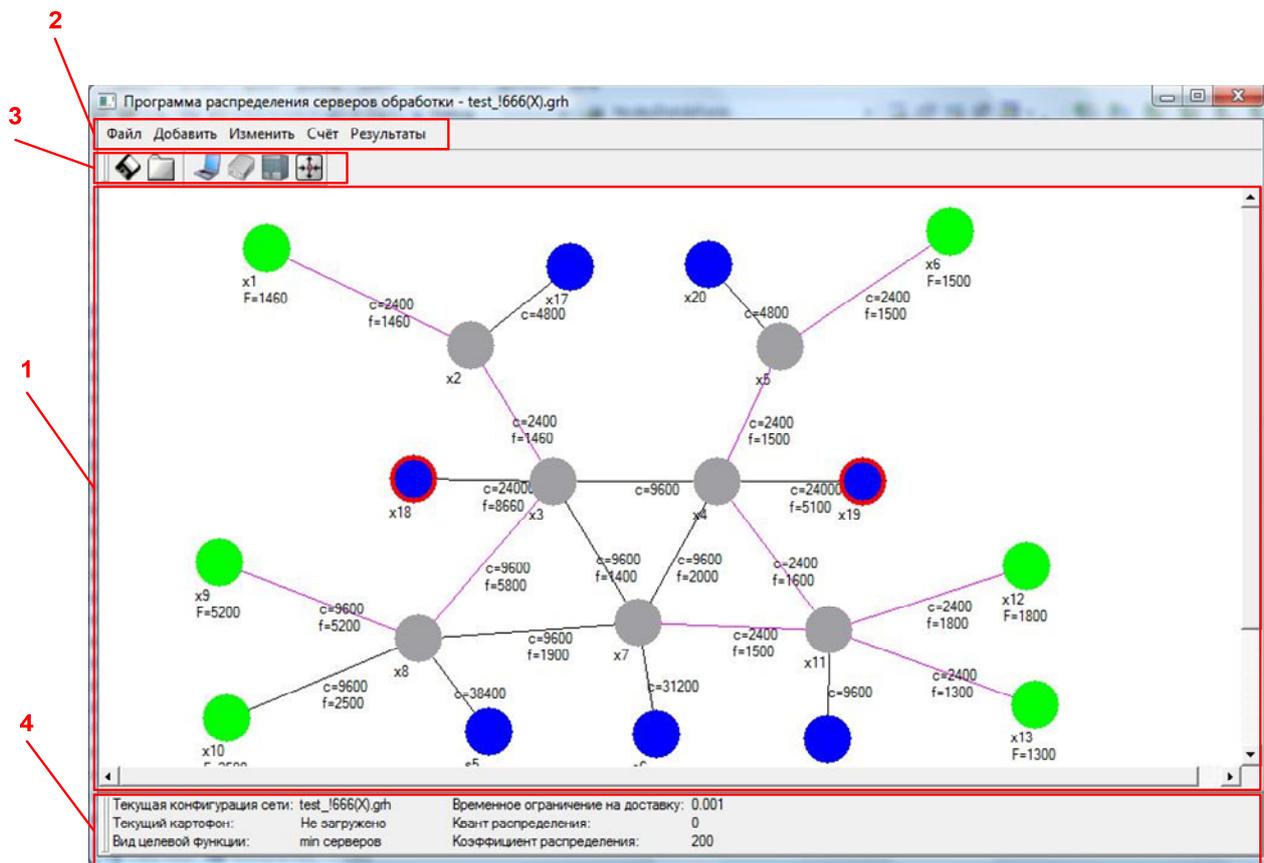
*Алгоритм реализации метода просеянной нагрузки для сети СС*

- 1:  $\varepsilon \leftarrow \bar{\varepsilon}$  (например,  $\bar{\varepsilon} = 10^{-2}$ )
- 2:  $B^e \leftarrow \bar{B}^e$ ,  $e \in \mathcal{E}$  (например,  $\bar{B}^e = 0,5$ )
- 3: пока  $\varepsilon > \varepsilon_0$  (например,  $\varepsilon_0 = 10^{-5}$ ), выполнять
- 4:  $a^e \leftarrow \sum_{s \in \mathcal{V}_S} \sum_{t \in \mathcal{V}_T} \sum_{i: l_i(s,t) \in \mathcal{L}(s,t)} \sum_{n \in \mathcal{N}} a_{in}(s,t) \prod_{e \in \xi_i(s,t) \setminus \{e\}} (1 - B^e)$ ,  $e \in \mathcal{E}$
- 5:  $\tilde{B}^e \leftarrow \frac{(a^e)^{\lfloor C^e/b \rfloor} (C^e - a^e)}{(C^e)^{\lfloor C^e/b \rfloor + 1} - (a^e)^{\lfloor C^e/b \rfloor + 1}}$ ,  $e \in \mathcal{E}$
- 6:  $\varepsilon \leftarrow \sum_{e \in \mathcal{E}} |\tilde{B}^e - B^e|$
- 7:  $B^e \leftarrow \tilde{B}^e$ ,  $e \in \mathcal{E}$
- 8:  $B_{in}^*(s,t) \leftarrow 1 - \prod_{e \in \xi_i(s,t)} (1 - B^e)$ ,  $n \in \mathcal{N}$ ,  $i: l_i(s,t) \in \mathcal{L}(s,t)$ ,  $t \in \mathcal{V}_T$ ,  $s \in \mathcal{V}_S$
- 9: вернуть  $B_{in}^*(s,t)$ ,  $n \in \mathcal{N}$ ,  $i: l_i(s,t) \in \mathcal{L}(s,t)$ ,  $t \in \mathcal{V}_T$ ,  $s \in \mathcal{V}_S$

В главе 4 изложены результаты разработки инструментальных программных средств, инженерной методики анализа параметров СС, а также результаты организации и проведения вычислительного эксперимента. Методика анализа параметров СС, включает следующие основные этапы.

1. Разработка состава исходных данных и формулировка требований к проектируемой СС.
2. Анализ структурных параметров СС, определение критериев проектирования.
3. Анализ характеристик трафика абонентов, расчет структуры системы с учетом размещения ЦОД, расчет маршрутных параметров трафика.
4. Разработка исходных данных и расчет показателей качества функционирования системы.
5. Оценка величины обслуженной и избыточной нагрузки, анализ возможностей ее пропуска через альтернативные сети общего пользования.

На рис. 5 показано главное окно разработанного инструментального программного средства с примером решения задачи  $(2, 0.001)$ -размещения ЦОД в сети СС.



- 1) Окно отображения и отрисовки элементов исследуемых систем.
- 2) Панель меню с выбором действий.
- 3) Тулбар с часто используемыми действиями.
- 4) Панель с информацией об основных параметрах исследуемой системы.

Рис. 5. Главное окно инструментального программного средства с примером решения задачи  $(2, 0.001)$ -размещения ЦОД в СС.

В диссертационной работе детально описаны разработанные интерфейсы пользователя, а также изложены особенности реализации модулей программно-инструментального комплекса с использованием языка C++, среды разработки MS Visual Studio 2003 и библиотеки QT 3.3.4.

На базе разработанных в диссертационной работе моделей, алгоритмов и программных средств организован и проведен вычислительный эксперимент с целью анализа структурных и вероятностных характеристик СС. Разработана методика сбора и обработки исходных данных, получение которых сопряжено с определенными трудностями, связанными с невозможностью точного прогнозирования нагрузочных параметров СС, отсутствием регламента сбора полной информации о передаваемых потоках данных, «размазанностью» информации мониторинга системы по компонентам, возможной секретностью состава и характеристик используемых компонент в средствах КСА. Одним из

вариантов получения исходной информации является обработка протоколов работы системы, которые собираются, в частности, при проведении КШУ для фиксации всех действий АСУ СН. Эти протоколы представляют собой сводные таблицы, содержащие для каждого абонентского узла сведения о передаваемых данных, в объеме: номенклатура, размер, количество посылок (таблица 1). Исходными данными, не поддающимися описанию и определению из протоколов, являются: множество передающих узлов (множество  $V_R$ ) и информационные взаимосвязи передающих узлов. Подобная ситуация складывается из-за того что структура сети передачи данных обычно скрыта от пользователей подобных сетей. В диссертационной работе эта проблема решалась с помощью консультаций с экспертами, т.е. путем проведения сбора и анализа данных методом экспертных оценок.

Таблица 1. Фрагмент протокола с исходными данными СС

Абоненты	Тип блока данных, $k$	Наименование передаваемого блока данных	Размер передаваемого блока данных, $\theta$ , кбайт	Количество переданных блоков данных, $n$ , штук
2	1	Организационные указания	31	4
	2	Классификаторы	454	8
	3	Слой пользовательских карт ГИС №1	29	4
	4	Слой пользовательских карт ГИС №2	219	4

Проведен численный анализ вероятностных характеристик СС для исходных данных, полученных в соответствии с разработанной в диссертации методикой. Решаются задачи (1, 0.001)- и (2, 0.001)-размещения в СС, граф которой показан на рис. 2. Предполагается, что один из абонентов системы ( $x_{13}$ ) увеличивает интенсивность потока запросов к ЦОД от значения 1.3 кбит/с до максимального значения 2.4 кбит/с пропускной способности звена, которым он присоединен к сети. Такое поведение одного из абонентов влияет на маршрутизацию потоков в сети и на значения исследуемых вероятностных характеристик. Исследуются четыре задачи размещения ЦОД - (1, 0.001)-, (2, 0.001)-, (1, 0.002)- и (2, 0.002)-размещение. Если в первом и во втором случае, по результатам расчетов требуется 1 и 2 ЦОД соответственно, то в последних – за счет увеличения директивного времени передачи данных в 2 раза и из-за приближенных вычислений по «жадному» алгоритму размещения – число ЦОД возрастает до 3.

Для каждого из решений задачи размещения центров вычислялись: вероятности блокировок запросов абонентов на передачу блоков данных,

величина обслуженной и избыточной нагрузки. На рис. 6 показаны итоговые графики суммарной величины обслуженной в СС нагрузки для каждой из рассматриваемых задач размещения.

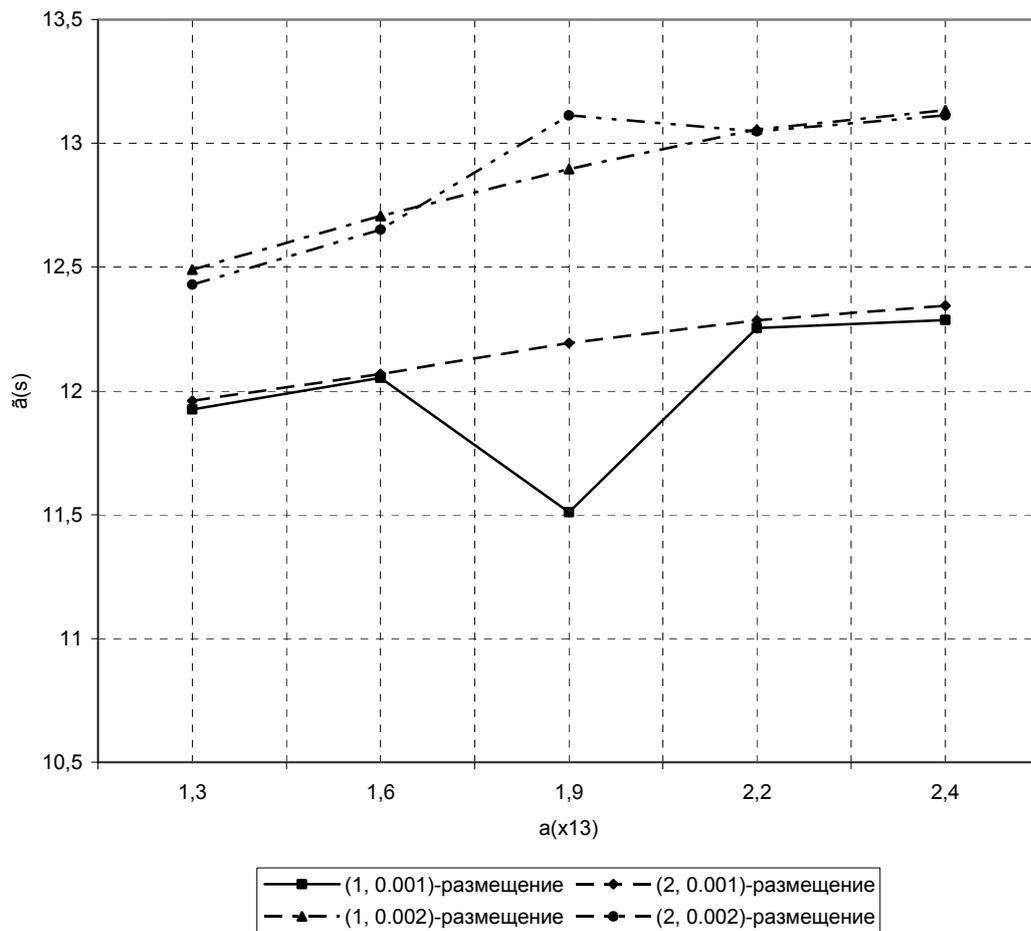


Рис. 6. Суммарная обслуженная нагрузка абонентов в СС

Анализ полученного в диссертационной работе графического материала, показал следующие основные особенности поведения параметров качества функционирования исследуемой СС:

1. Вероятности блокировок запросов абонентов принимают значения до 37% для задачи (1, 0.001)-размещения, до 29% для задачи (2, 0.001)-размещения и до 7% для задачи (1, 0.002)- и (2, 0.002)-размещения и в зависимости от величины предложенной нагрузки.
2. Величины обслуженной нагрузки абонентов принимают значения в интервале от 0.59 до 5.15 кбит/с, а величины избыточной нагрузки составляют от 0.02 до 1.31 кбит/с для задачи (1, 0.001)-размещения.
3. Величины обслуженной нагрузки абонентов принимают значения в интервале от 0.96 до 5.16 кбит/с, а величины избыточной нагрузки составляют до 1 кбит/с для задачи (2, 0.001)-размещения.
4. Величины обслуженной нагрузки абонентов принимают значения в интервале от 1.08 до 5 кбит/с, а величины избыточной нагрузки составляют от 0.1 до 0.63 кбит/с для задачи (1, 0.002)-размещения.

5. Величины обслуженной нагрузки абонентов принимают значения в интервале от 1.02 до 4.98 кбит/с, а величины избыточной нагрузки составляют от 0.1 до 0.67 кбит/с для задачи (2, 0.002)-размещения.
6. Суммарное значение величины избыточной нагрузки составляет максимум 2.85 кбит/с для задачи (1, 0.001)-размещения, 2.51 кбит/с – для задачи (2, 0.001)-размещения, 1.73 кбит/с для задачи (1, 0.002)-размещения и 1.74 кбит/с для задачи (2, 0.002)-размещения.

Результаты эксперимента подтверждают, что в зависимости от величины предложенной нагрузки абонентов, значительная (до 50%) часть нагрузки не может быть пропущена из-за ограниченной пропускной способности звеньев сети. Эта нагрузка должна быть пропущена через альтернативные сети передачи данных, или, в противном случае, часть (до 37%) запросов абонентов не будет обслужена.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ сетевидческой концепции ведения военных действий показал, что при решении задачи размещения ЦОД в инфраструктуре СС необходимо учитывать объемы потоков данных, передаваемых в условиях ограниченной пропускной способности телекоммуникационной составляющей и характеристики трафика абонентов. Формальная модель сетевой инфраструктуры СС построена в виде графа, на котором решается задача  $(k,r)$ -размещения центров с учетом ограничений на пропускную способность ребер. Величины потоков определяются в соответствии с моделью трафика, учитывающей случайный характер потока запросов абонентов системы, типы и объемы передаваемых центрами блоков данных.
2. Сформулирована общая задача оптимизации СС, целевыми функциями которой являются минимальное число ЦОД и максимальное значение обслуженной нагрузки, зависящие от маршрутизации потоков и вероятностей блокировок запросов абонентов. Предложена методика, состоящая из двух этапов: на этапе 1 решается задача размещения ЦОД по критерию минимизации расстояния от абонентских узлов; на этапе 2 решается задача оценки величины обслуженной системой нагрузки.
3. В терминах теории телетрафика построена вероятностная модель обслуживания трафика и разработан метод анализа вероятностных характеристик СС. Формулы для отдельного звена сети получены в аналитическом виде, удобном для анализа сетевой модели с учетом маршрутизации трафика.
4. Разработаны алгоритмы и инструментальные программные средства для численного решения задачи размещения ЦОД и расчета показателей качества СС. Разработана инженерная методика для поддержки процесса проектирования СС в части расчета и анализа ее структурных и

нагрузочных параметров. Методика была апробирована при расчёте СС с исходными данными близкими к реальным.

5. Показано, что количество ЦОД в СС оказывает влияние на показатели качества обслуживания абонентов. Однако, наличие ограничений на пропускные способности сети и ограниченных возможностей для маршрутизации потоков данных, снижает степень этого влияния и не приводит к резкому снижению величины избыточной (не пропущенной) нагрузки. Результаты вычислений подтверждают, что в зависимости от величины предложенной нагрузки абонентов, часть нагрузки не может быть пропущена из-за ограниченной пропускной способности звеньев сети. Эта нагрузка должна быть пропущена через альтернативные сети передачи данных, или, в противном случае, часть запросов абонентов не будет обслужена. Результаты диссертации внедрены в рамках выполнения ОКР и участвовали в государственных испытаниях, что подтверждено актом о внедрении.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бородакий В.Ю., Окороченко Г.Е. Организация очередей для системы передачи сообщений // Научная сессия МИФИ-2006. Т.12 Информатика и процессы управления. Компьютерные системы и технологии. М.: МИФИ, 2006. С. 164
2. Бородакий В.Ю., Окороченко Г.Е. О размещении центральных узлов в распределённых системах обработки сообщений // Научная сессия МИФИ-2008: Сб. науч. Тр. В 15 т. М.: МИФИ, 2008.- Т. 12. С. 137-139.
3. Окороченко Г.Е., Бородакий В.Ю. Имитационная модель для оценки функционирования систем передачи сообщений // Материалы докладов VIII всероссийской научно-технической конференции «Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования», Часть II. Тамбов, 26-28 апреля 2006 г. С. 59-64
4. Окороченко Г.Е., Бородакий В.Ю. Исследование работы системы передачи сообщений с помощью имитационной модели // Материалы IX Международной конференции «Интеллектуальные системы и компьютерные науки» (Москва, 23-27 октября 2006г.), том 2, часть 2, М.: Изд-во механико-математического факультета МГУ, 2006, С. 215-217
5. Окороченко Г.Е., Бородакий В.Ю. Анализ средств имитационного моделирования распределённых информационных систем // Научная сессия МИФИ-2007: Сб. научных трудов, М.: Изд-во МИФИ, 2007.- Т. 12. с.129-131
6. Окороченко Г.Е., Бородакий В.Ю. Вопросы моделирования вычислительных систем в задачах анализа и синтеза автоматизированных систем // Сборник трудов V Всероссийской научной конференции «Проблемы развития системы специальной связи и специального информационного обеспечения государственного управления России», г. Орёл, 2007 г. С. 78-84

7. Бородакий В.Ю. Задача оптимального распределения в сетцентрических системах // XXXVIII военно-научная конференция «Проблемы развития информационных технологий в системе ВКО РФ», Сборник научных трудов, Тверь, 2009 г. С.43-47
8. Бородакий В.Ю. Вероятностная модель обслуживания трафика в системе сетцентрического типа // Информатика и ее применения. – 2009. – Т.3. вып. 3. – С. 34-38 (из перечня ВАК)
9. Бородакий В.Ю. Разработка модели и метода решения задачи размещения центров обработки данных в сетцентрической системе // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – 2009. –№ 3. – С. 25-33 (из перечня ВАК)