

УДК 621.391, 004.94, 519.876.5

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.43.4.014](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.014)

## Имитационная модель обслуживания вызовов в спутниковой сети с учетом использования частотного ресурса

Д.Ю. Пономарев✉, А.А. Демичева, К.Э. Гаипов

*Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева,  
Красноярск, Российская Федерация*

**Резюме.** В работе рассматривается имитационная модель мультисервисной спутниковой сети. В исследуемой сети предоставляемыми услугами являются передача речи и данных. В зависимости от абонентского оборудования, помеховой обстановки и размещения спутниковых систем изменяются требования к запрашиваемым частотным ресурсам сети, и определяются возможности полезной нагрузки космических аппаратов по выделению заданной полосы пропускания. В данной работе при разработке имитационной модели учитываются процессы частотного предоставления ресурсов для каждого вызова. В связи с высокой сложностью процессов обработки вызовов в спутниковых сетях для оценки их характеристик на различных этапах разработки и проектирования применяются различные виды моделирования. При этом аналитическое представление процессов, происходящих в таких сетях, связано с некоторыми трудностями. В данной работе используется имитационное моделирование в среде *GPSS Studio*, и основной целью является разработка алгоритмов моделирования процессов установления соединения и передачи информации в спутниковой сети и оценка вероятностно-временных характеристик данной сети с использованием разработанного алгоритма. Программная реализация алгоритма продемонстрировала возможности *GPSS Studio* и позволила получить результаты для оценки вероятности потерь вызовов на различных участках сети. Полученные результаты могут быть использованы как при анализе существующих спутниковых сетей, так и при проектировании и разработке новых технологий исследуемых сетей.

**Ключевые слова:** спутниковая сеть, имитационное моделирование, алгоритм обслуживания, вероятность потерь, частотный ресурс.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

**Для цитирования:** Пономарев Д.Ю., Демичева А.А., Гаипов К.Э. Имитационная модель обслуживания вызовов в спутниковой сети с учетом использования частотного ресурса. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1453> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.014

## Simulation model of call service in a satellite network with consideration to frequency resource utilization

D.Yu. Ponomarev✉, A.A. Demicheva, K.E. Gaipov

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk,  
the Russian Federation*

**Abstract.** The paper considers a simulation model of a multiservice satellite network. The network under review provides services for voice and data transmission. Depending on the subscriber equipment, interference environment and location of satellite systems, the requirements for the queried frequency resources of the network are adjusted, and the capabilities of the spacecraft payload to allocate a given bandwidth are determined. This study takes into account the processes of resource frequency allocation for each call when developing a simulation model. Due to the high complexity of call processing in

satellite networks, various types of modeling are used to assess their characteristics at various stages of development and design. At the same time, the analytical representation of the processes occurring in such networks is associated with some difficulties. In this paper, simulation modeling is used in the GPSS Studio environment, and the main goal is to develop algorithms for modeling the processes of connection establishing and transmitting information in a satellite network and evaluating the probabilistic and time characteristics of this network using the algorithm developed. The software implementation of the algorithm has demonstrated the capabilities of *GPSS Studio* and allowed us to obtain results for estimating the probability of call losses in various parts of the network. The findings can be used both in the analysis of existing satellite networks and in the design and development of new technologies of the networks under review.

**Keywords:** satellite network, simulation modeling, maintenance algorithm, probability of losses, frequency resource.

**Acknowledgements:** the research was carried out as part of the scheme of strategic and academic leadership “Priority-2030” at Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

**For citation:** Ponomarev D.Yu., Demicheva A.A., Gaipov K.E. Simulation model of call service in a satellite network with consideration to frequency resource utilization. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1453> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.014 (In Russ.).

## Введение

Спутниковые сети связи позволяют решать задачи обеспечения инфокоммуникационным ресурсом в глобальном смысле. Большой толчок к использованию спутниковых технологий для передачи данных был получен при запуске в эксплуатацию сети *Starlink* [1]. Аналогичные проекты ведутся в нашей стране и за рубежом [2-5]. Современное состояние демонстрирует широкие возможности по областям применения спутниковых сетей, и это не только предоставление широкополосного доступа к информационным ресурсам, но и решение задач картографирования, изучения климата, управления автономными устройствами и т. д. [2, 3].

Цифровизация технологий привела к тому, что все информационные потоки в инфокоммуникационных сетях передаются в цифровой форме вне зависимости от предоставляемой услуги (услуги, предоставляемые телефонной сетью общего пользования – ТфОП или сетью передачи данных – СПД). Однако в спутниковых сетях связи, в отличие от наземных, значительно большую роль играет физический канал передачи, обладающий ограниченным частотным ресурсом и вносящий задержки, которые в основном определяются расстоянием между передающим и приемным оборудованием. Спутниковый канал передачи также вносит задержки, наибольшие значения которых существуют в сетях, использующих системы, располагаемые на высоких (геостационарных или высокоэллиптических) орбитах.

С целью снижения влияния задержек в спутниковых сетях используются орбитальные группировки, размещаемые на низких (до 500 км) высотах [1, 4, 5], или формируются разновысотные спутниковые системы [3, 6-8]. В таком случае обслуживание обеспечивается движущимися относительно земной поверхности спутниковыми системами, в основном ретрансляторами. Следовательно, в зависимости от того, какой конкретно космический аппарат находится в зоне видимости, необходимо обеспечить распределение его частотного ресурса для заданного вида обслуживания и определенного числа абонентов.

Ограниченность частотного ресурса при значительно большем, чем в наземных радиосетях числе пользователей приводит к повышению вероятности потери вызовов.

Со стороны абонента данные потери возникают как на первом этапе обслуживания (при запросе ресурсов абонентской линии), так и на следующем этапе (при попытке занятия ресурсов фидерной или межспутниковой линии). Аналогичная ситуация возникает и со стороны земной станции [5, 6, 8, 9]. Кроме потерь по вызовам при передаче информации в спутниковом канале возникают и потери пакетов (кадров, сегментов).

С целью оценки вероятностей потерь, возникающих в спутниковых сетях связи, необходимо использовать аналитические или имитационные модели. Однако необходимость учета большого числа деталей процедур установления соединения значительно усложняет аналитическое описание процессов обслуживания информационных потоков в спутниковых сетях. Имитационное моделирование с достаточным уровнем адекватности позволяет отразить множество нюансов процедур установления соединений и передачи информации в спутниковых сетях связи [4, 7, 8, 10-12].

В имитационных моделях процессов обслуживания информационных потоков в спутниковых сетях можно обеспечить отображение занятия ресурсов спутниковой сети, адекватное поведению пользователя, реализовать детальную проработку процедур установления соединений, оценить загрузку частотного и наземного ресурса, обеспечить совмещение в одной модели распределения полосы пропускания и распределения трафика [4, 6, 7, 9, 10-12].

Целью данной работы является разработка имитационной модели для исследования процессов обслуживания вызовов в спутниковой сети связи с учетом использования частотного ресурса абонентских и фидерных линий и возможностью оценки числа потерянных вызовов и пакетов.

### Предварительные сведения

В качестве объекта исследования рассматривается спутниковая сеть связи, обеспечивающая услуги передачи данных и речи. При передаче данных скорость доступа в рассматриваемой сети может изменяться в пределах от 2 Мбит/с до 100 Мбит/с, а максимальная скорость передачи речевой информации равна 64 кбит/с (определяется используемым кодеком). В качестве инструмента имитационного моделирования выбрана среда *GPSS Studio*.

С целью установления состава процедур, реализуемых в имитационной модели, были рассмотрены стандарты Европейского института *ETSI* (*European Telecommunications Standards Institute*), посвященные технологиям *GMR*, *3G*, *DVB-S2X*, *GSM*. На основе проведенного анализа стандартов определены основные процедуры для моделирования информационных потоков в  $K$  частотных кластерах (каждый кластер состоит из заданного числа частотных зон  $N$ ) моделируемой сети: входящий речевой вызов, исходящий речевой вызов, передача данных (ПД) в прямом направлении, ПД в обратном направлении, регистрация абонентского терминала (АТ) в направлении от абонента, обновление местоположения АТ в направлении от земной станции (ЗС), проверка доступа к сети (запрос к регистру аутентификации), проверка доступа к услугам (запрос к базе данных абонентов).

Базовыми процедурами, которые создают основную нагрузку, являются процедуры обработки входящего/исходящего речевого вызова и передачи данных в прямом/обратном направлениях. В таком случае общий состав имитационной модели будет иметь вид, представленный на Рисунке 1, на котором базовые процедуры обозначены как процедура 1, процедура 2, процедура 3 и процедура 4.

Соединения между абонентскими терминалами и спутниками обеспечиваются абонентскими линиями (АЛ), а связь между спутниками и земными станциями

осуществляется через фидерные линии (ФЛ). Каждой ФЛ соответствует определенное множество АЛ. Земные станции используют услуги присоединения к другим сетям (ТфОП и СПД).

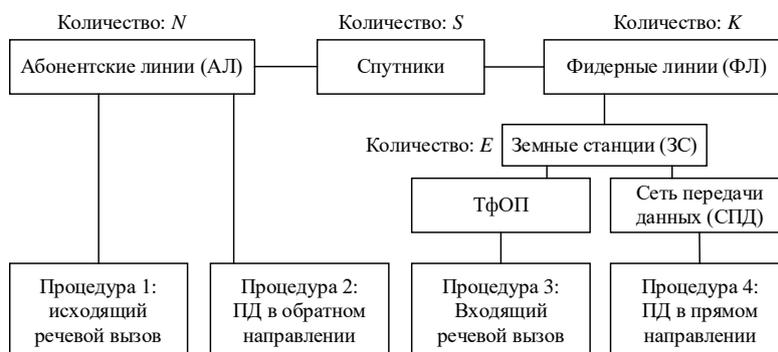


Рисунок 1 – Общий состав имитационной модели  
Figure 1 – Generalized structure of simulation model

При обслуживании вызовов в моделируемой сети общий состав процедур (этапы обслуживания) можно представить в виде следующего набора процессов [9]: запрос частотного ресурса, предоставление частотного ресурса или отказ в предоставлении ресурса, запрос ресурса ЗС или АЛ в зависимости от направления передачи, предоставление ресурса ЗС/АЛ или отказ в предоставлении ресурса, сеанс передачи данных или речевое соединение, запрос на освобождение, освобождение.

При формировании требований по количеству абонентов, которым предоставляется доступ в зоне обслуживания, необходимо оценить диаметр данной зоны. Например, для сети *Starlink* в зоне обслуживания с диаметром 20 км число абонентов составляет 120–130 терминалов [1], что позволяет снизить нагрузку на целевую аппаратуру космического аппарата. В разработанной имитационной модели используется блок генератора трафика (в дальнейшем планируется проводить исследования и с непуассоновскими потоками) с переменным количеством абонентов со средним значением 1000 и средней нагрузкой от каждого абонента 0,015 Эрл<sup>1</sup>.

В связи с тем, что частотный ресурс абонентских и фидерных линий занимает дискретно в соответствии с протоколом взаимодействия (например, с шагом 0,2 МГц) при разработке имитационной модели в среде *GPSS* используются групповые объекты на уровне доступа. При этом учитывается, что при организации сеансов передачи речи необходимо сформировать двухсторонний тракт, а в сеансе передачи данных создается одно направление.

В качестве исходных данных для формирования имитационной модели процессов обслуживания вызовов в спутниковой сети с учетом распределения частотных ресурсов рассматриваются следующие характеристики и параметры:

- время моделирования;
- число ЗС;
- количество кластеров (равно числу ФЛ);
- количество зон в кластере (количество АЛ на одну ФЛ);
- число абонентов в каждой зоне;
- пропускная способность АЛ (прямое/обратное направление);

<sup>1</sup> РД 45.162-2001. Ведомственные нормы технологического проектирования. Комплексы сетей сотовой и спутниковой подвижной связи общего пользования.

- пропускная способность ФЛ (прямое/обратное направление);
- среднее число вызовов в час от одного абонента к/от сети связи общего пользования (ССОП);
- минимальный/максимальный объем данных в байтах, передаваемых к/от ССОП за один сеанс (случайно распределенная величина);
- число каналов с ССОП для каждой ЗС для ТфОП/СПД;
- идентификатор ФЛ-ЗС (КА перемещаются, и необходимо задать зону обслуживания для определенного КА в заданный интервал времени);
- размер пакета для передачи речи/данных;
- размер буфера для передачи речи/данных;
- запрашиваемая полоса для АЛ в МГц (случайно распределенная величина).

С целью перемещения по модели для каждого транзакта формируется определенный набор параметров. Параметры записываются при генерации транзактов в блоке *Generate* и, в основном, в дальнейшем их значение меняться уже не будет. При необходимости возможно введение в модель дополнительных блоков с целью изменения параметров, например для моделирования хэндовера. Общий набор параметров транзактов, используемых в разработанной модели, представлен в Таблице 1.

После генерации в блоке *Generate* транзакт получает признак процедуры в виде параметра данной процедуры (входящий/исходящий речевой вызов, передача данных в прямом или обратном направлении). Это позволяет в дальнейшем разделить потоки разного вида при обслуживании и определить вероятностно-временные характеристики каждой процедуры. Количество транзактов для каждой процедуры определяется как среднее число процедур данного типа в единицу времени, например среднее число вызовов в час.

Далее необходимо сформировать требования по запрашиваемой пропускной способности для каждого вызова как от АТ, так и от ЗС. В основном это определяется видом процедуры: передача речи или данных. В таком случае задается постоянная скорость передачи (*CBR – constant bit rate*, для передачи речи) или объем передаваемых данных (для передачи данных).

Таблица 1 – Параметры транзактов имитационной модели спутниковой сети  
Table 1 – Parameters of satellite network simulation model transactions

Параметр	Зависимость
Параметр процедуры	Определяется исходными данными: сколько в среднем процедур производится в единицу времени
Параметр скорости	Определяется услугой и функцией распределения объема информации
Параметр АЛ	Определяется местонахождением абонента
Параметр ФЛ	Определяется местонахождением абонента
Параметр спутника	Определяется местонахождением абонента и спутника
Параметр ЗС	Определяется местонахождением абонента и спутника

В связи с большой зоной обслуживания каждый вызов должен быть связан с определенной АЛ, которая на определенном интервале времени производит обслуживание некоторой территории на земной поверхности. С этой целью для каждого вызова определен параметр абонентской линии.

Каждая абонентская линия обслуживается определенным спутником, который, в свою очередь, на заданном интервале связан с соответствующей ЗС посредством ФЛ. Таким образом, для каждого вызова также задаются параметры спутника, земной станции и фидерной линии.

После задания всех параметров транзакт проходит все этапы обслуживания в модели сети в соответствии с заданной процедурой и покидает модель через блок *Terminate*.

### Основные моделируемые процедуры

В соответствии с Рисунком 1 базовыми процедурами являются: исходящий речевой вызов от абонента с подключением к ТфОП, исходящая передача данных от абонента с подключением к СПД, входящий речевой вызов к абоненту из ТфОП, входящая передача данных к абоненту из СПД [7, 9].

Общая схема алгоритма процедуры «исходящий речевой вызов» представлена на Рисунке 2а. На Рисунке 2б представлен обобщенный алгоритм процедуры обслуживания входящего к абоненту вызова. Аналогичные алгоритмы используются и при передаче данных (Рисунок 3).

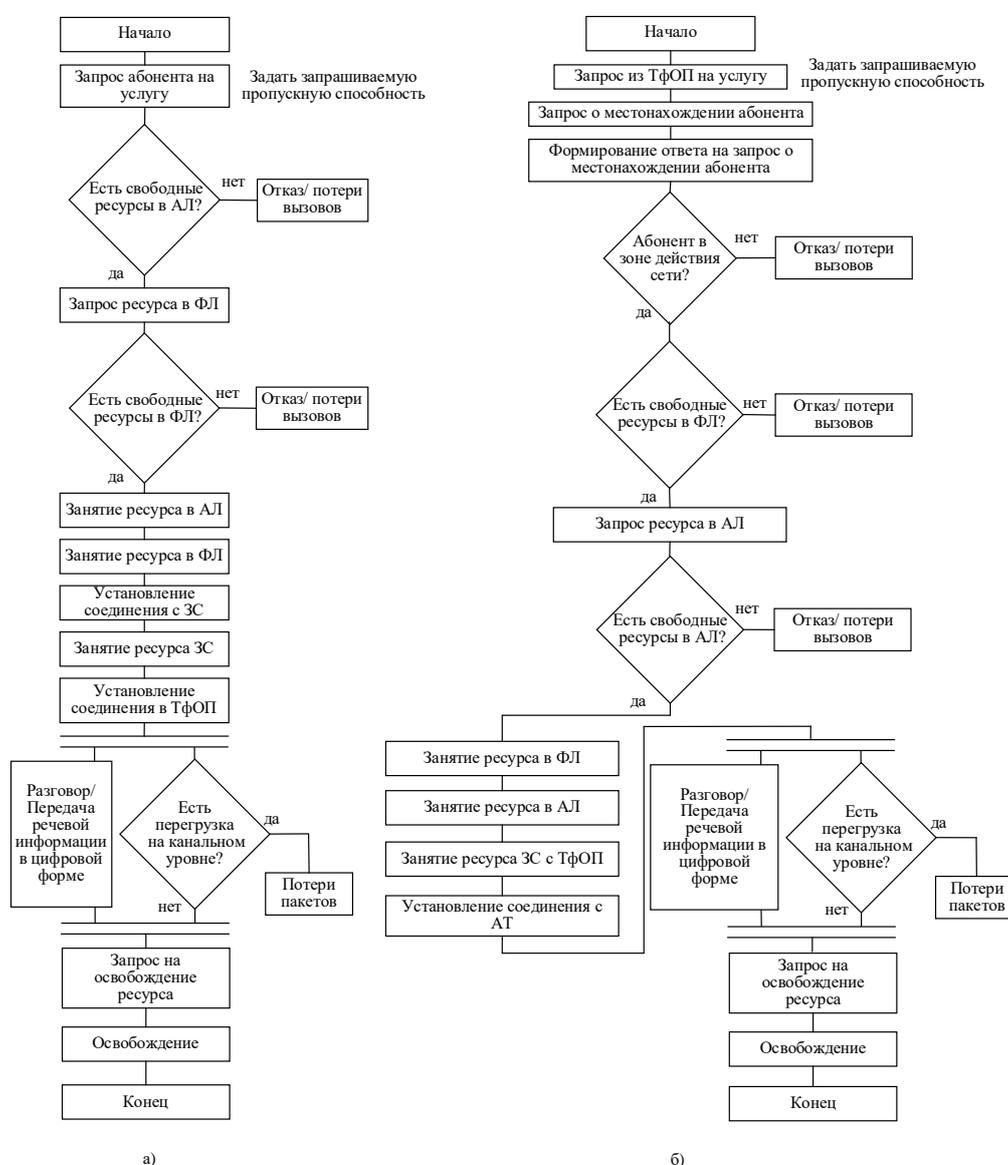


Рисунок 2 – Общая схема процедур: «исходящий речевой вызов» (а) и «входящий речевой вызов» (б)

Figure 2 – Generalized scheme of procedures: outgoing and incoming voice call

На первом шаге алгоритма формируется запрос от абонента, которому надо присвоить параметры в соответствии с Таблицей 1 и задать требуемую для данного вызова пропускную способность (полосу пропускания). В начале работы алгоритма основными переменными являются запрашиваемая пропускная способность и номер АЛ, в которой формируется запрос.

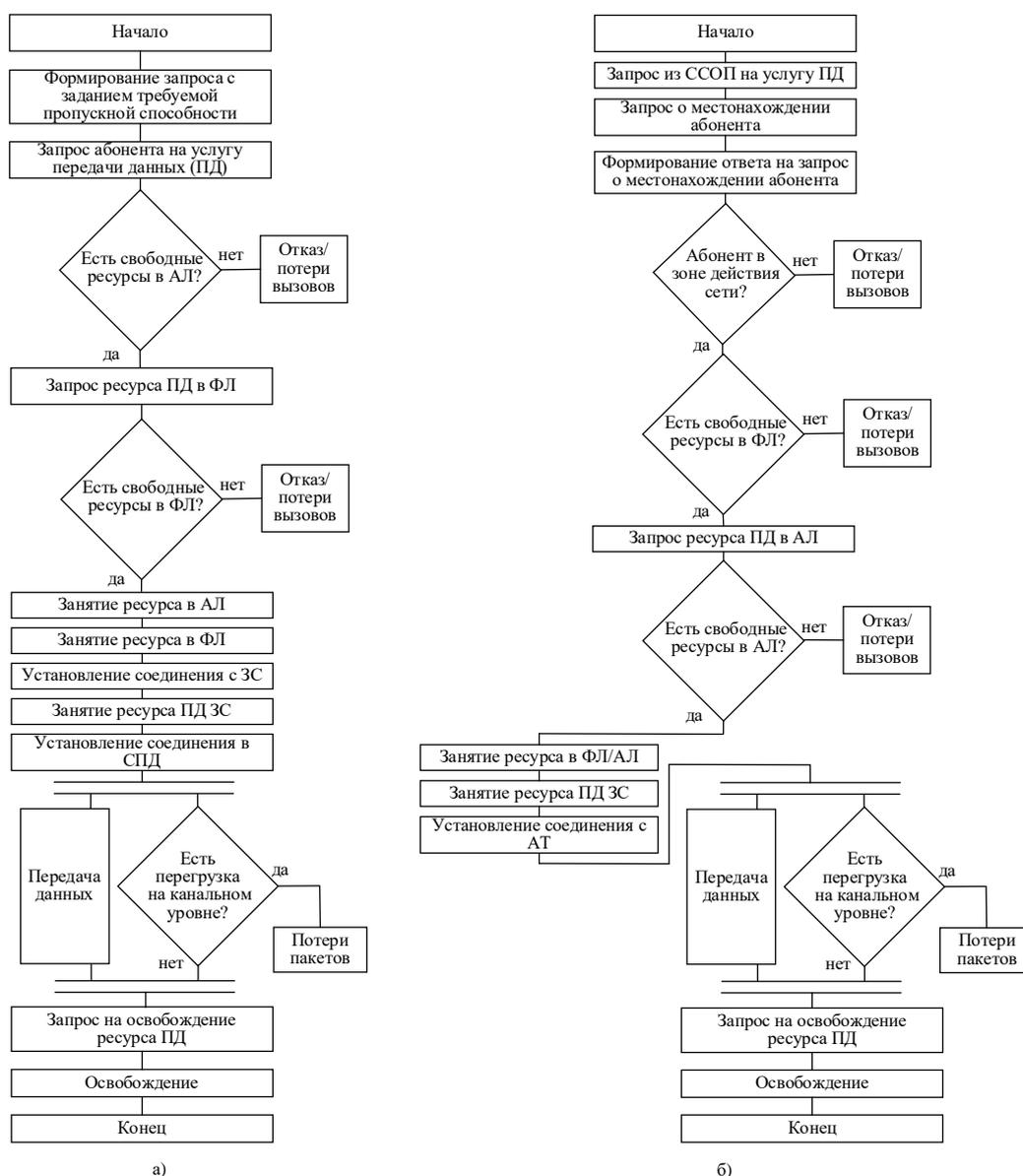


Рисунок 3 – Общая схема процедур: «передача данных в обратном направлении» (а) и «передача данных в прямом направлении» (б)

Figure 3 – Generalized scheme of procedures: outgoing and incoming data transfer

Частотный ресурс АЛ ограничен, при этом к нему имеют доступ все абоненты, которые находятся на данном интервале времени в области обслуживания этой абонентской линии. Поэтому при сравнении запрашиваемой пропускной способности и свободных ресурсов данной АЛ определяется, будет ли вызов продолжать обслуживание или будет потерян. При реализации протокола взаимодействия АТ и сети в полном объеме возможно проведение дополнительных процедур согласования скоростей, при

котором отказ будет происходить только в случае исчерпания всех возможностей сети по предоставлению обслуживания (выбор кодека, постановка в очередь и т. д.).

При дальнейшем процессе передачи вызова производится проверка наличия свободных ресурсов фидерной линии как агрегатора для нескольких АЛ, включенных в один кластер. На этом шаге потери вызова также возможны в случае отсутствия свободных ресурсов, но уже фидерной линии. Фидерная линия для каждого интервала времени использует подключение к заданной земной станции.

После проверки свободных ресурсов фидерной и абонентской линии и получения разрешения на их использование вызов производит занятие ресурсов ФЛ и АЛ и передается на земную станцию, которая относительно ресурса спутниковых линий обладает значительно большим ресурсом по подключению к наземным сетям (ТфОП и СПД), поэтому потери вызовов на участке ЗС-ТфОП и ЗС-СПД в данной модели не рассматриваются.

Таким образом, общая схема алгоритма процедуры состоит из запросов ресурсов определенного типа и проверок на наличие свободных ресурсов для обслуживания данного вида вызовов. При отсутствии свободных частотных ресурсов возникают потери вызовов, а при перегрузке приемного буфера возникают потери пакетов. При обслуживании речевых вызовов каналы занимают одновременно в двух направлениях с целью установления двустороннего соединения.

Также в работе представлен обобщенный алгоритм процедуры обслуживания входящего к абоненту вызова. В таком случае предварительно требуется определить доступность и местонахождение абонента, что и отражено на схеме (Рисунок 2б).

Аналогичные рассмотренным выше алгоритмы используются и при передаче данных. На Рисунке 3 представлена общая схема алгоритмов процедур «передача данных в прямом/обратном направлении». Следует отметить, что и для речевого вызова, и для сеансов передачи данных учитываются как потери вызовов при отсутствии частотных ресурсов, так и потери пакетов в процессе осуществления передачи речевой информации в цифровой форме или при передаче данных, что позволяет оценить качество обслуживания на канальном уровне.

### **Объекты и переменные, используемые в имитационной модели**

Для проведения имитационного моделирования выбрана среда *GPSS Studio* как обеспечивающая поддержку языка *GPSS* и позволяющая решать задачи построения моделей большого масштаба.

Для всех схем процедур (Рисунки 2, 3) имитация запросов, занятий каналов и устройств, их освобождение моделируются блоками временной задержки (*advance*); для проверки условий, например при ограничении мест ожидания начала обслуживания в очереди, используются блоки тестирования (*test*). В качестве моделей частотных ресурсов используются групповые объекты (для частотных ресурсов), для моделирования распределения ресурсов наземных сетей применяются многоканальные устройства.

Исходя из алгоритмов моделируемых процедур, частотный ресурс спутниковой сети распределяется в частотных зонах (абонентские линии) с занятием полосы пропускания определенной ширины, которые соответствуют одному кластеру (фидерной линии). Для абонентских и фидерных линий также определен признак направления: прямое и обратное.

Основными модулями программы модели являются:

- модуль инициализации (задание постоянных, определение функций распределения, описание ресурсов моделей земных станций, установление параметров таблиц, матриц и начальных значений переменных);

- модули моделей зон кластеров;
- модуль моделей земных станций;
- блок таймера.

В модуле инициализации определяются значения постоянных величин (пропускная способность ФЛ и АЛ прямого и обратного направлений), задаются распределения для объема передаваемых данных и запрашиваемые полосы пропускания для каждого вызова, устанавливаются параметры ресурсов моделей земных станций, описываются таблицы и матрицы, задаются начальные значения переменных.

Входные параметры и выходные характеристики для описания состояния линий (фидерных и абонентских) представлены в виде объектов *GPSS* – матриц. Для их создания используются команда *MATRIX* с указанием имени матрицы и ее размерности. В разработанной модели используются два типа матриц для кластеров: первый тип (*M1*) необходим для описания параметров абонентских линий в кластере, а второй тип (*M2*) содержит информацию о загруженности каждой абонентской линии в кластере.

В матрицах первого типа записаны параметры абонентских линий и фиксируются значения их некоторых характеристик: доступная пропускная способность – свободная полоса пропускания, число потерянных вызовов и т. д.

Сведения о загруженности абонентских линий, содержащиеся в таблицах типа *M2*, позволяют определить наиболее загруженные участки и при необходимости произвести перераспределение имеющегося частотного ресурса внутри кластера. В таком случае необходимо изменить параметры, содержащиеся в матрице типа *M1*.

В связи с тем, что в имитационной модели для имитации работы с частотным ресурсом полезной нагрузки космических аппаратов используются групповые объекты (*group*), то для каждой группы формируется таблица, которая содержит информацию о числе транзактов в определенной группе (как для ФЛ, так и для АЛ) с распределением этого числа по заданному количеству частотных классов. Для этого используются системные числовые атрибуты (СЧА) *GT – group transaction count* (число транзактов в группе). Таким образом, таблица позволяет оценить сколько ресурсов каждой линии задействовано и для какого числа обслуживаемых вызовов.

Кроме описанных таблиц, в имитационной модели с целью оценки загруженности частотных ресурсов используются таблицы, содержащие информацию о загрузке для абонентских и фидерных линий, которая определяется как отношение занятой пропускной способности линии к максимальному значению полосы пропускания линии заданного типа.

После модуля инициализации формируются модули зон кластеров. Внутри модуля зоны вложены процедуры обслуживания вызовов в соответствии с Рисунками 2–3. Состав каждой процедуры соответствует следующему набору для каждого кластера в отдельности: занятие АЛ в прямом направлении, занятие АЛ в обратном направлении, занятие ФЛ в прямом направлении, занятие ФЛ в обратном направлении.

Каждая из четырех процедур, представленных на Рисунке 1, может быть сформирована из этого набора. Например, процедура «исходящий вызов КК» состоит из программных процедур в следующей последовательности (в связи с особенностями организации телефонных каналов соединение устанавливается в двух направлениях):

- 1) занятие АЛ в обратном направлении;
- 2) занятие ФЛ в обратном направлении;
- 3) занятие ФЛ в прямом направлении;

4) занятие АЛ в прямом направлении.

При этом в каждой процедуре определяется интервал между вызовами; присваиваются определенные параметры (принадлежность к зоне, требуемая полоса пропускания, номер процедуры, объем передаваемых данных) и вводятся блоки задержки для имитации формирования запросов и получения ответов на них.

Модуль моделей земных станций в отличие от имитации частотного ресурса групповыми объектами *GPSS* содержит многоканальные устройства *storage*, которые являются моделями наземных каналов связи с ТфОП и СПД. В имитационной модели передача вызова на обслуживание земной станцией производится с помощью подпрограммы. После выхода из подпрограммы производится вывод транзакта из системы в зависимости от процедуры (Рисунки 2–3). При этом отдельные наборы блоков обеспечивают сохранение статистических данных об обслуженных и потерянных вызовах и пакетах. Для моделирования процессов обслуживания на земной станции разработаны процедуры для двух видов трафика: речевой передачи и передачи данных. Одним из параметров процедуры является параметр направления передачи *direct*. Для прямого направления параметр равен *to\_ab*, для обратного – *from\_ab*.

Текст модели завершается блоком таймера, в котором учитывается заданное время моделирования (по умолчанию – сутки) и задается единица измерения для всех временных параметров модели (секунды).

### Численные результаты

После обработки полученных результатов можно провести анализ изменения различных характеристик с целью улучшения качества работы моделируемой сети. В качестве примера в данной работе рассматривается спутниковая сеть, состоящая из трех кластеров (по три частотных зоны в каждом) и трех земных станций. Таким образом, в сети формируются три фидерных и девять абонентских линий.

С целью оценки возможностей разработанной модели в качестве примера рассмотрим зависимости характеристик сети от изменения верхнего предела переменной *bandwidth\_AL\_f*, определяющей ширину запрашиваемой полосы пропускания АЛ в прямом направлении в МГц.

Предварительно пределы изменения вышеуказанной переменной были определены на интервале от 10 до 40 МГц. Однако в результате проведенных экспериментов было получено, что вероятность получения обслуживания для всей сети в целом (отношение обслуженных вызовов к общему числу поступивших) резко снижается уже на участке 10–15 МГц, и даже в начальной точке (10 МГц) вероятность обслуживания составила всего лишь 0,13, что, естественно, не соответствует требованиям к качеству обслуживания [2–4]<sup>2</sup>. Поэтому была добавлена точка 5 МГц. Результаты моделирования представлены на Рисунке 4.

<sup>2</sup> РД 45.162-2001. Ведомственные нормы технологического проектирования. Комплексы сетей сотовой и спутниковой подвижной связи общего пользования.

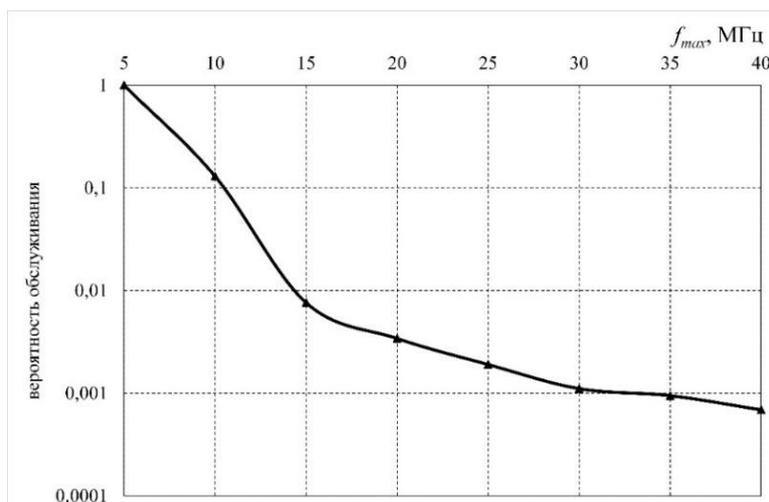


Рисунок 4 – Вероятность обслуживания для всей сети в целом  
Figure 4 – Service probability for the network under review

Низкий уровень рассматриваемой вероятности связан с ограниченностью частотных ресурсов и несоответствием интенсивности трафика и выделяемым при этом ресурсам для каждого вызова. Интенсивность трафика определяется числом абонентов и заданным значением среднего числа вызовов от абонентов сети в единицу времени, поэтому в дальнейших исследованиях эти величины не изменяются. При этом распределение трафика по кластерам (ФЛ и АЛ) равномерное.

В связи с тем, что резкое изменение вероятности обслуживания находится на участке от 5 до 10 МГц было проведено имитационное моделирование для данного интервала. Результат предоставлен на Рисунке 5.

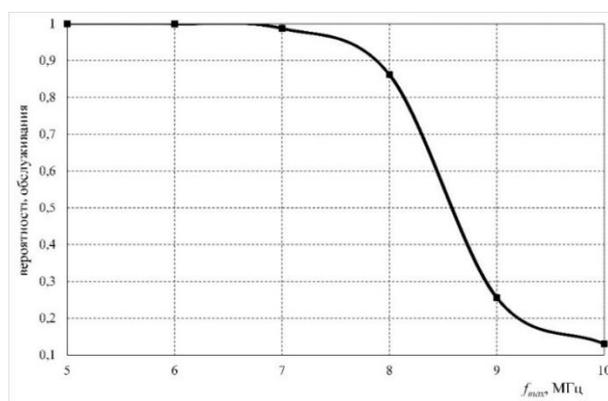


Рисунок 5 – Вероятность обслуживания для всей сети в целом для интервала изменяемого параметра от 5 до 10 МГц  
Figure 5 – Service probability for the network under review for a variable parameter interval of 5 to 10 MHz

Из Рисунка 5 видно, что при запрашиваемой ширине полосы от 5 до 8 МГц вероятность обслуживания превышает значение 0,85, а потом достаточно быстро снижается. Отсюда можно сделать вывод о том, что использование верхнего предела исследуемого параметра выше 8 МГц приводит к увеличению числа вызовов с большой запрашиваемой полосой пропускания и повышению уровня отказов в обслуживании. Это позволяет сделать вывод о необходимости выбора запрашиваемой полосы пропускания,

не превышающей определенного порога при заданном числе пользователей и создаваемой ими нагрузке.

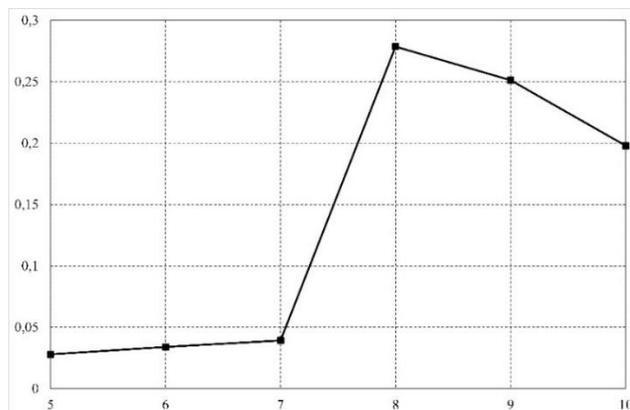


Рисунок 6 – Зависимость средней загрузки АЛ первого кластера для интервала изменяемого параметра от 5 до 10 МГц

Figure 6 – Average utilization of the subscriber line in the first cluster for a variable parameter interval of 5 to 10 MHz

Этот вывод подтверждается и исследованием зависимости средней загрузки АЛ первого кластера (Рисунок 6), из которого видно, что полоса пропускания АЛ используется не полностью, но при этом не только не растет при дальнейшем увеличении изменяемого параметра, но даже начинает уменьшаться.

Аналогичный результат был получен и для фидерной линии первого кластера. Зависимость загрузки данной ФЛ от верхнего предела полосы пропускания АЛ в прямом направлении представлена на Рисунке 7.

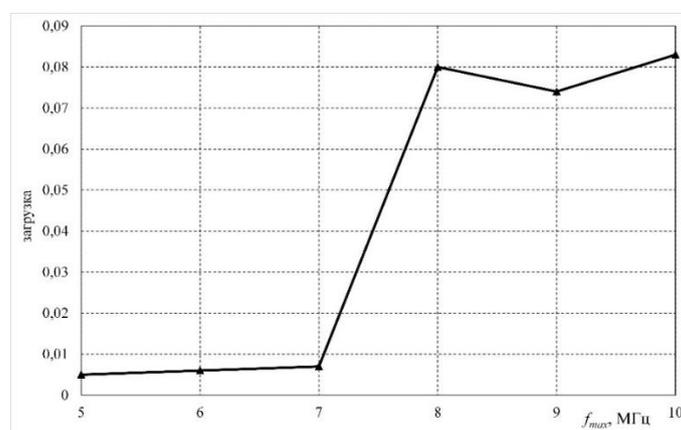


Рисунок 7 – Зависимость загрузки ФЛ в прямом направлении для интервала изменяемого параметра от 5 до 10 МГц

Figure 7 – Utilization of the feeder line in the first cluster for a variable parameter interval of 5 to 10 MHz

Однако в связи с тем, что фидерная линия агрегирует потоки и большая часть вызовов не поступает на данный этап обслуживания, то загрузка рассматриваемой линии с учетом большей полосы пропускания еще меньше. Но при этом потери, связанные с занятостью фидерной линии, продолжают расти, асимптотически приближаясь к уровню 0,5, что продемонстрировано на Рисунке 8.

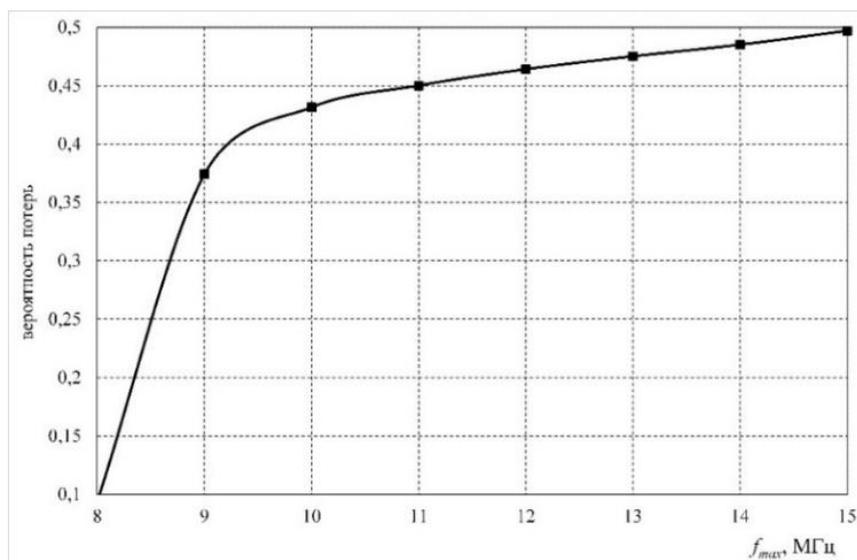


Рисунок 8 – Зависимость потерь вызовов, связанных с занятостью ФЛ, от верхнего предела полосы пропускания АЛ в прямом направлении  
Figure 8 – Dependence of call losses associated with feeder line occupancy from the upper limit of the forward subscriber line bandwidth

Как видно из Рисунка 8 половина вызовов теряется, что недопустимо при обслуживании информационных потоков. Это снова приводит к выводу об ограничении максимального значения запрашиваемой полосы пропускания при использовании частотных ресурсов спутниковой сети.

### Заключение

Современные спутниковые сети представляют собой сложный для анализа объект, так как кроме общеизвестных процессов, описываемых методами теории массового обслуживания, содержат множество плохо аналитически описываемых процедур как на физическом, так и на канальном и сетевом уровнях. В таком случае целесообразнее проводить исследования на имитационных моделях, особенно если основы протоколов и интерфейсов, которые используются в спутниковой сети, уже известны и требуется обеспечить их модификацию с целью повышения эффективности работы исследуемых спутниковых сетей.

Разработанная в данной статье имитационная модель позволяет учесть практически все этапы обслуживания вызовов в спутниковой сети: от запроса соединения до передачи пакетов на канальном уровне. Особенностью разработанной имитационной модели является возможность оценки влияния ограниченности частотного ресурса на характеристики качества обслуживания в спутниковой сети. Более того, модель позволяет получить информацию о том, занятость какого вида ресурса привела к данному числу потерянных вызовов. Это демонстрируют и представленные в работе численные результаты.

В заключение следует отметить, что несмотря на то, что разработанная имитационная модель использует четко определенные алгоритмы взаимодействия, путем изменения текста программы в *GPSS Studio* можно ввести все необходимые изменения и для других протоколов и интерфейсов. Достоинством разработанной модели также является инвариантность к числу кластеров исследуемой спутниковой сети и числу частотных зон в каждом кластере.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пехтерев С.В., Макаренко С.И., Ковальский А.А. Описательная модель системы спутниковой связи *Starlink. Системы управления, связи и безопасности*. 2022;4:190–255. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255.
2. Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Тимофеев Ю.А. Перспективные сервисы многоспутниковых космических систем. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2021;8(1):59–68. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.59.68.
3. Камнев Е., Гриценко А., Анпилогов В. Системы широкополосного доступа на основе высокоэллиптических спутников: российские проекты. *Технологии и средства связи. Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2019»*. 2019;72–75.
4. Иванов В.И. Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в негеостационарной спутниковой системе связи с межспутниковыми линиями. *Системы управления, связи и безопасности*. 2018;3:69–105.
5. Чепурнов П.А., Жуковский А.В., Стешковой А.С. Обобщенный алгоритм функционирования абонентского терминала в сети низкоорбитальной системы широкополосной спутниковой связи *OneWeb. Информация и космос*. 2021;2:45–55.
6. Пантенков Д.Г. Моделирование и сравнительный анализ своевременности передачи информации от источника к получателю в двухуровневой системе спутниковой связи с использованием космических аппаратов на низких и геостационарной орбитах. *Системы управления, связи и безопасности*. 2020;4:192–219.
7. Пономарев Д.Ю., Гаипов К.Э. Имитационная модель комбинированной спутниковой сети. *Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА»*. 2021;2(3):64–69.
8. Акмоллов А.Ф., Ковальский А.А., Ефимов С.Н. Предложения по созданию и функционированию многоспутниковой системы связи на основе разновысотной орбитальной группировки. *Труды учебных заведений связи*. 2020;6(1):22–31. DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-1-22-31.
9. Пономарев Д.Ю. Функциональные и математические модели распределения трафика в комбинированной спутниковой сети. *Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА»*. 2021;2(4):29–37.
10. Алтухов А.А., Зеленевский Ю.В., Филатов В.И. Имитационное моделирование спутниковой системы связи с изменяемой орбитальной структурой. *Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли*. 2022;14(1):21–27. DOI: 10.36724/2409-5419-2022-14-1-21-27.
11. Пономарев Д.Ю. Моделирование спутниковой сети в среде *GPSS World*. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1152>.
12. Шелковский Д. В., Черников А. А. Имитационное моделирование функционирования сегмента сети связи с коммутацией пакетов. *Вопросы радиоэлектроники*. 2019;12:75–82. DOI: 10.21778/2218-5453-2019-12-75-82.

## REFERENCES

1. Pekhterev S.V., Makarenko S.I., Koval'skij A.A. Descriptive Model of Starlink satellite communication system. *Systems of Control, Communication and Security = Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti*. 2022;4:190–255. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255. (In Russ.).
2. Potiupkin A.Yu., Volkov S.A., Timofeev Yu.A. Promising services of multi-satellite space systems. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems = Raketno-*

- kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*. 2021;8(1):59–68. DOI:10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.59.68. (In Russ.).
3. Kamnev E., Gritsenko A., Anpilov V. Broadband access systems based on highly elliptical satellites: Russian projects. *Tekhnologii i sredstva svyazi. Special'nyi vypusk = Communication Technologies & Equipment*. 2019;72–75. (In Russ.).
  4. Ivanov V.I. Algorithm of centralized multipath routing with load balancing for nongeostationary telecommunication satellite system with intersatellite links. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2018;3:69–105. (In Russ.).
  5. Chepurnov P.A., Zhukovskii A.V., Steshkovoi A.S. Generalized algorithm for the operation of a subscriber terminal in the network of the low-orbit broadband satellite communication system *OneWeb*. *Informaciya i kosmos = Information and Space*. 2021;2:45–55. (In Russ.).
  6. Pantenkov D. G. simulation and comparative analysis of transmission timeliness source-to-recipient information in a two-tier system satellite communications using spacecraft in low and geostationary orbits. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2020;4:192–219. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10407. (In Russ.).
  7. Ponomarev D.Yu., Gaipov K.Ye. Imitacionnaya model' kombinirovannoi sputnikovoi seti. *Vestnik Voennogo innovacionnogo tehnopolisa*. 2021;2(3):64–69. (In Russ.).
  8. Akmolov A.F., Kovalskii A.A., Efimov S.N. Creation and functioning suggestions for the multi-satellite communication system based on different height orbital grouping. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Telecommunication Universities*. 2020;6(1):22–31. DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-1-22-31. (In Russ.).
  9. Ponomarev D. Funkcional'nye i matematicheskie modeli raspredelenija trafika v kombinirovannoj sputnikovoj seti. *Vestnik Voennogo innovacionnogo tehnopolisa*. 2021;2(4):29–37. (In Russ.).
  10. Altuhov A.A., Zelenevskij Ju.V., Filatov V.I. Simulation of a satellite communication system with a variable orbital structure. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli = High Technologies in Earth Space Research. H&ES Research*. 2022;14(1):21–27. DOI: 10.36724/2409-5419-2022-14-1-21-27. (In Russ.).
  11. Ponomarev D.Y. The satellite network modeling in GPSS World. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(2). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1152>. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.006. (In Russ.).
  12. Shelkovyi D.V., Chernikov A.A. Simulation modeling of packet switching network segment functioning. *Voprosy radioelektroniki = Questions of Radio Electronics*. 2019;12:75–82. DOI: 10.21778/2218-5453-2019-12-75-82. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Пonomarev Дмитрий Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Спутниковые телекоммуникационные системы», Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация.  
e-mail: [ponomarevdu@yandex.ru](mailto:ponomarevdu@yandex.ru)

**Dmitriy Yu. Ponomarev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher at Satellite Telecommunication Systems Research Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

ORCID: [0000-0003-1639-5935](https://orcid.org/0000-0003-1639-5935)

ELIBRARY ID: 145995

**Демичева Алена Алексеевна**, младший научный сотрудник, научная лаборатория «Спутниковые телекоммуникационные системы», Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация,

*e-mail:* [demichevaalena@yandex.ru](mailto:demichevaalena@yandex.ru)

ORCID: [0000-0003-0980-1616](https://orcid.org/0000-0003-0980-1616)

**Alena A. Demicheva**, Junior Researcher at Satellite Telecommunication Systems Research Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

**Гаипов Константин Эдуардович**, кандидат технических наук, и.о. руководителя, научная лаборатория «Спутниковые телекоммуникационные системы», Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация,

*e-mail:* [gaipovke@yandex.ru](mailto:gaipovke@yandex.ru)

ORCID: [0000-0003-4146-5763](https://orcid.org/0000-0003-4146-5763)

**Konstantin E. Gaipov**, Candidate of Technical Sciences, Acting Head of Satellite Telecommunication Systems Research Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 31.10.2023; принята к публикации 22.11.2023.*

*The article was submitted 09.10.2023; approved after reviewing 31.10.2023; accepted for publication 22.11.2023.*