

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СЕТЯХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА БАЗЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА НИЗКИХ И СРЕДНИХ КРУГОВЫХ ОРБИТАХ

**Маслов Александр Александрович,**  
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская область, г. Долгопрудный, Россия, [maslov.aa@mipt.ru](mailto:maslov.aa@mipt.ru)

**Себекин Геннадий Валериевич,**  
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская область, г. Долгопрудный, Россия, [sebekin.gv@mipt.ru](mailto:sebekin.gv@mipt.ru)

**Степанов Михаил Сергеевич,**  
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, [m.s.stepanov@mtuci.ru](mailto:m.s.stepanov@mtuci.ru)

**Степанов Сергей Николаевич,**  
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, [s.n.stepanov@mtuci.ru](mailto:s.n.stepanov@mtuci.ru)

**Щурков Алексей Олегович,**  
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская область, г. Долгопрудный, Россия, [shchurkov.ao@mipt.ru](mailto:shchurkov.ao@mipt.ru)

**Васильев Александр Протальонович,**  
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-12-4-15

Manuscript received 12 September 2025;  
Accepted 18 November 2025

Работа первого, второго и пятого авторов выполнена в МФТИ, Физтех при финансовой поддержке Фонда НТИ в рамках Договора №70-2025-000804 от 26.05.2025

**Ключевые слова:** Космические аппараты на низкой и средней круговой орбитах, каналный ресурс, мультисервисный трафик, трафик реального времени, абонентские терминалы, имитационное моделирование

Разработана модель мультисервисной широкополосной спутниковой сети связи на базе космических аппаратов на низких и средних круговых орбитах при обслуживании трафика реального времени, позволяющая учесть в качестве исходных данных решающее правило по назначению ресурса для проведения сессий разных типов и особенности размещения абонентов по территории зоны обслуживания сети. При этом качество функционирования сети оценивается долей необслуженных заявок, как для сети в целом, так и для отдельных регионов, в зависимости от параметров орбитальной группировки космических аппаратов и абонентских терминалов, характеристик трафика каждого типа, затрат ресурса на проведение сессий. В ходе численных экспериментов построены доверительные интервалы оценок показателей качества, получены зависимости оценок от параметров входной нагрузки для сети в целом и для отдельных регионов дислокации абонентов. Модель может использоваться разработчиками и операторами сетей для выбора решающих правил по назначению ресурса для обслуживания абонентов, оценки возможностей наращивания сети, обоснования необходимости ее модернизации.

## Информация об авторах:

**Маслов Александр Александрович,** Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, ведущий инженер, к.т.н.

**Себекин Геннадий Валериевич,** Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская область, г. Долгопрудный, начальник отдела

**Степанов Михаил Сергеевич,** Московский технический университет связи и информатики, Москва, доцент, к.т.н.

**Степанов Сергей Николаевич,** Московский технический университет связи и информатики, Москва, начальник кафедры, профессор, д.т.н.

**Щурков Алексей Олегович,** Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская область, г. Долгопрудный, ведущий инженер

**Васильев Александр Протальонович,** Московский технический университет связи и информатики, Москва, научный сотрудник

## Для цитирования:

Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Щурков А.О., Васильев А.П. Моделирование процессов обслуживания трафика реального времени в мультисервисных широкополосных сетях спутниковой связи на базе космических аппаратов на низких и средних круговых орбитах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №12. С. 4-15.

## For citation:

A.A. Maslov, G.V. Sebekin, M.S. Stepanov, S.N. Stepanov, A.O. Shchurkov, A.P. Vasiliev, "Modeling of real-time traffic service processes in multiservice broadband satellite communications networks based on spacecraft at low and medium circular orbits," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no. 12, pp. 4-15. (in Russian)

## 1. Введение

Проблема моделирования процессов обслуживания мультисервисного трафика в широкополосных сетях спутниковой связи на базе космических аппаратов (КА) на низких и средних круговых орбитах обусловлена высокой динамикой изменения положения КА относительно Земли и пространственным размещением абонентов на обширных территориях, в результате чего разным абонентам доступны для связи различные по количеству и составу наборы КА, пересекающиеся или непересекающиеся между собой и изменяющиеся во времени. В качестве иллюстрации на рисунке 1 показан некоторый мгновенный вид взаимного расположения абонентов (фиолетовые кружки) и мгновенных зон обслуживания КА (красные круги). Видно, например, что абоненты юго-западного района РФ находятся в зоне обслуживания только одного КА. Если сместиться на северо-восток количество зон увеличивается до двух, затем до трех. В районе озера Байкал доступны три КА, а при небольшом смещении на восток два и т.д. Через небольшой промежуток времени, измеряемый минутами, доступность КА может кардинально измениться.

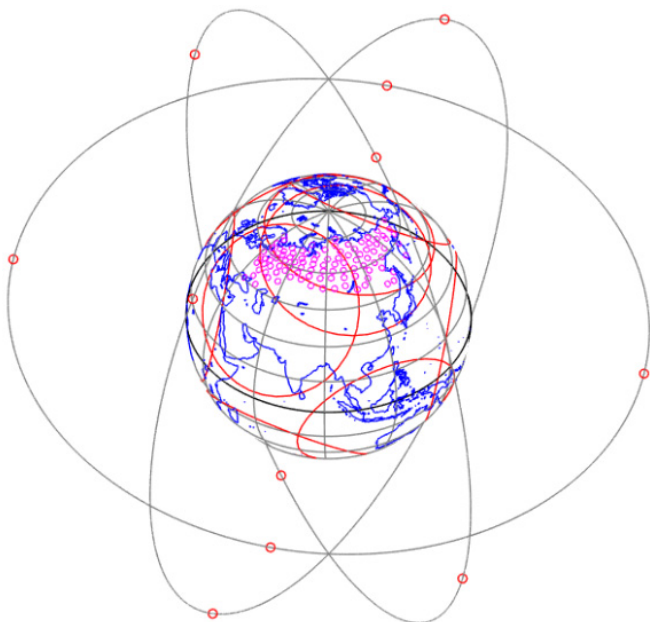


Рис. 1. Примерное мгновенное взаимное расположения абонентов и КА

Предполагается, что абоненты, оснащенные абонентскими терминалами (АТ), получают доступ к сервисам сети Интернет через региональные станции (РС), которые в совокупности обеспечивают с помощью единого центра управления связью (ЦУС) непрерывное управление работой всех КА над зоной обслуживания сети. Мультисервисный трафик передается по маршруту АТ-КА-РС-сеть Интернет и в обратном направлении. Для получения сервисов абоненты отправляют заявки на РС, которые с помощью ЦУС организуют предоставление необходимого для обмена данными ресурса пропускной способности того или иного КА и взаимодействие с операторами сервисов. Ресурсом пропускной способности является скорость передачи данных, измеряемая в бит/с [1].

Ресурс выделяется для проведения сессий получения сервисов неделимыми квантами. Общий ресурс каждого КА в

ограничен, и потому в сети могут возникать ситуации дефицита ресурса, приводящие к тому, что некоторые заявки не получают обслуживания. Есть две причины отказа в обслуживании:

- отказ из-за отсутствия достаточного свободного ресурса для проведения сессии на доступных КА;
- прерывание незавершенной сессии вследствие изменения доступности КА, когда на оставшихся доступными КА ресурса недостаточно.

В этих условиях важными показателями качества предоставления сервисов являются доли необслуженных заявок каждого типа, что, собственно, соответствует традиционным показателям QoS, принятым в теории телетрафика [1, 2]. Оценка указанных показателей с учетом пространственного размещения АТ по территории обслуживания сети и динамики движения КА по орбитам и является целью настоящей статьи. При этом полагается, что в сети осуществляется обслуживание нескольких типов трафика сервисов реального времени, организация сессий для которых требует выделения фиксированного объема ресурса в зависимости от типа на время, определяемое абонентом.

Решения по назначению ресурсов сессиям принимаются в зависимости от состояния сети, включающего перечень и типы сессий, места дислокации активных абонентов и текущую конфигурацию доступных КА. В связи с высокой динамикой изменения состояния сети ЦУС должен принимать решения по назначению ресурсов практически в реальном масштабе времени.

Исследованию мультисервисных сетей различных типов посвящено большое количество работ [3-17]. В них используются как аналитические методы моделирования на основе многомерных ступенчатых марковских процессов, так и имитационное моделирование. Есть среди них ряд работ и по спутниковым сетям [10-17], часть из которых [10-13] относится к сетям на базе геостационарных и высокоэллиптических КА. Сетям на базе КА на низкой круговой орбите посвящены работы [14-17]. Первые две из них [14, 15] ограничиваются рассмотрением сетей передачи коротких сообщений с данными от датчиков IoT.

Наиболее близкими по решаемым задачам являются работы [16, 17, 21]. Там сделан ряд допущений, что позволило использовать аналитический подход. В частности, реальный поток пролетов КА над абонентами заменяется марковским процессом с эквивалентными средними параметрами, а для региона с высокой концентрацией АТ полагается в качестве некоего наиболее неблагоприятного случая, что АТ сосредоточены на относительно небольшой территории, и им доступны одни и те же КА. При этом ресурс доступных КА является единым целым, и возможно выделение ресурса для сессии частями на разных КА. Если же полагать, что АТ сосредоточены по территории обслуживания сети, подобный аналитический подход неприменим, но доступным средством исследования остается имитационное моделирование.

Таким образом, непосредственное использование результатов упомянутых работ для рассматриваемой сети невозможно, и задача моделирования сети является актуальной. Для достижения поставленной цели в разделе 2 дается описание модели, в разделе 3 представлена ее программная реализация, численное исследование модели проводится в разделе 4.

## 2 Описание модели

Орбитальная группировка анализируемой сети включает  $N_{ка}$  КА в  $N_k$  орбитальных плоскостях и кольцах, по  $N_{вк}$  КА в каждом кольце,  $N_{ка} = N_k \times N_{вк}$ . Плоскости колец имеют одинаковое наклонение относительно экваториальной плоскости и смещены на равные углы  $180^\circ / N_k$  относительно друг друга, а КА размещены равномерно в каждом кольце, т. е. смещены на угол  $360^\circ / N_{вк}$ . Для учета в модели каждому КА присвоен номер  $n = (n_k - 1)N_{вк} + n_{вк}$ , где  $n_k$  – номер кольца КА,  $n_k = 1, \dots, N_k$ ,  $n_{вк}$  – номер КА внутри кольца,  $n_{вк} = 1, \dots, N_{вк}$ . Мгновенная зона обслуживания отдельного КА, т. е. зона, в которой для находящихся в ней абонентов этот КА доступен для проведения сессий, является кругом на поверхности Земного шара, и ее радиус определяется минимально допустимым углом  $\alpha_{мин}$  места в направлении от антенны АТ к КА.

Все абоненты находятся в зоне обслуживания сети. Количество и размещение РС по указанной зоне обслуживания таково, что любой КА, доступный абоненту, доступен также и, хотя бы одной РС. При этом для проведения абонентом сессии может использоваться любой доступный КА, на котором есть достаточный свободный ресурс.

Высокая динамика изменения положения КА относительно абонентов, количество которых в сети измеряется тысячами, осложняет задачу моделирования и обуславливает целесообразность принятия следующих двух допущений:

1) Будем считать, как и в [16], что на относительно компактной территории, значительно меньшей зоны обслуживания отдельного КА, из любой точки этой территории доступен в каждый момент времени одинаковый набор КА, т. е. все абоненты на этой территории привязываются к некоторой, например, центральной ее точке. Только в отличие от [16] количество  $N_T$  таких точек будет довольно большим, десятки или сотни. Правомочность такого допущения подтверждается косвенно тем обстоятельством, что в районах повышенной активности человеческой деятельности, например, в городах, местах добычи полезных ископаемых и т. п. АТ будут размещаться с более высокой плотностью, т. е. тяготеют к некоторому центру района. Итак, полагаем, что каждый АТ размещен в окрестности одной из  $N_T$  точек, и перечень доступных ему КА всегда такой же, что и в этой точке. В регионах с высокой востребованностью услуг связи количество точек может быть больше, а при низкой востребованности меньше.

2) Учитывая, что среднее время  $t_{ср}$  доступности отдельного КА абоненту измеряется, как правило, минутами, примем, что весь период моделирования продолжительностью  $T_{мод}$  разделен на измеряемые секундами интервалы времени  $\Delta\tau \ll t_{ср}$ , и все изменения доступности КА для абонентов происходят только на границах указанных интервалов, т. е. в моменты  $e\Delta\tau$ ,  $e = 1, \dots, E$ , где  $E = \left\lfloor \frac{T_{мод}}{\Delta\tau} \right\rfloor$ . Фактически, мы переходим к шкале времени  $e$  в квантах  $\Delta\tau$ , т. е.

$e = t / \Delta\tau$ . При этом события начала и завершения сессий обслуживания заявок могут происходить в произвольные моменты, в том числе, когда  $e$  не является целым.

Далее введем обозначения, касающиеся характеристик мультисервисного трафика. Абоненты сети отправляют в РС заявки на получение сервисов реального времени  $K$  типов. При наличии достаточного свободного ресурса проводятся сессии соответствующих типов. Потоки заявок из точек на проведение сессий пуассоновские с интенсивностями  $\lambda_{k,n_T}$ , где  $k$  – номер сервиса,  $k = 1, \dots, K$ ,  $n_T$  – номер точки,  $n_T = 1, \dots, N_T$ . Время проведения сессий  $k$ -го типа является случайной величиной, имеющей экспоненциальное распределение с параметром  $\mu_k$ . На это время для сессии необходим ресурс  $b_k$  на одном из доступных КА. При изменении доступности КА или при поступлении новых заявок может потребоваться изменение рабочего КА, а в некоторых случаях сессию придется прервать из-за недостаточности ресурса.

Рассмотрим ограничения, характерные для применения решающих правил по назначению ресурсов сессиям. Пусть в момент времени  $t$  необходимо проведение  $m(t)$  сессий. Обозначим через  $s_i$  тип  $i$ -ой сессии,  $i = 1, \dots, m(t)$ , т. е. для проведения  $i$ -ой сессии необходимо  $b_{s_i}$  единиц ресурса. Введем вектор требуемых для проведения сессий ресурсов  $\mathbf{B}_T = (b_{s_1}, b_{s_2}, \dots, b_{s_{m(t)}})$ . Пусть также в этот момент количество КА, которые доступны хотя бы одному активному АТ, составляет  $n(t)$ , и номера этих КА равны  $h_1, h_2, \dots, h_{n(t)}$ .

Можно составить матрицу текущей доступности КА  $A$  в виде

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,n(t)} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,n(t)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m(t),1} & a_{m(t),2} & \dots & a_{m(t),n(t)} \end{pmatrix}.$$

Строки матрицы соответствуют сессиям, столбцы доступным КА. Элемент  $a_{i,j}$  равен 1, если абоненту для проведения  $i$ -й сессии типа  $S_i$  доступен КА с номером  $h_j$ , или 0 в противном случае. Очевидно, активному абоненту должен быть доступен хотя бы один КА, поэтому сумма элементов  $A$  в каждой строке должна быть не меньше 1, т. е.

$$\sum_{j=1}^{n(t)} a_{i,j} \geq 1, j = 1, \dots, m(t).$$

Аналогичное условие можно записать и относительно столбцов матрицы  $A$ :

$$\sum_{i=1}^{m(t)} a_{i,j} \geq 1, j = 1, \dots, n(t). \quad (1)$$

Неравенства (1) означают, что КА с номером  $h_j$  доступен хотя бы одному активному абоненту. В результате назначения ресурса компоненты вектора  $\mathbf{B}_T$  будут распределены между КА и, соответственно, будет сформирован вектор задействованных ресурсов КА  $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_{n(t)})$ , каждая компонента которого не превосходит величину  $V$ . Если возможность предоставления ресурса для всех сессий существует, то выполняется очевидное соотношение

$$vn(t) \geq \sum_{j=1}^{n(t)} v_j = \sum_{i=1}^{m(t)} b_{s_i}$$

Решение по распределению ресурса КА между сессиями в момент  $t$  можно представить в виде матрицы  $\mathbf{U}$  той же размерности, что и  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} u_{1,1} & u_{1,2} & \dots & u_{1,n(t)} \\ u_{2,1} & u_{2,2} & \dots & u_{2,n(t)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{m(t),1} & u_{m(t),2} & \dots & u_{m(t),n(t)} \end{pmatrix}$$

В  $\mathbf{U}$  элемент  $u_{i,j}$  равен  $b_{s_i}$ , если сессию  $s_i$  планируется проводить через КА  $h_j$ , или нулю в противном случае. При этом с учетом упомянутого выше условия неделимости ресурса сессии между двумя и более КА получаем, что в  $i$ -й строке матрицы  $\mathbf{U}$  ровно один элемент отличен от нуля и равен  $b_{s_i}$ . Очевидно, если ввести вектор-столбец  $\mathbf{E}_s$ , состоящий из  $n(t)$  единиц, и вектор-строку  $\mathbf{E}_r$  из  $m(t)$  единиц, то

$$\mathbf{U}\mathbf{E}_s = (\mathbf{B}_T)^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_r\mathbf{U} = \mathbf{V}. \quad (3)$$

Эти соотношения не учитывают фактор доступности КА. Естественно, ресурс  $b_{s_i}$  на проведение сессии  $s_i$  должен выделяться на одном из доступных активному абоненту КА. Тогда выражение (2) следует уточнить и переписать в виде:

$$\sum_{j=1}^{n(t)} a_{i,j} u_{i,j} = b_{s_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m(t). \quad (4)$$

Кроме того, поскольку компоненты вектора  $\mathbf{V}$  не превосходят значения  $V$ , то выражение (3) удобно записать в форме неравенств:

$$\sum_{i=1}^{m(t)} u_{i,j} \leq v, \quad j = 1, 2, \dots, n(t) \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) вытекает, что цель отработки решающего правила по назначению ресурсов сессиям состоит в поиске допустимого решения задачи целочисленного линейного программирования (ЦЛП).

Естественно, в случае установления факта невозможности назначения ресурса всем сессиям, например, при уменьшении количества доступных КА, решающее правило должно определять, какие из сессий подлежат прерыванию, и повторно решать задачу распределения ресурса для меньшего количества сессий.

Указанная задача ЦЛП является довольно трудоемкой, а решаться должна практически в реальном масштабе времени. Это делает невозможным использование метода прямого перебора. Например, если текущее количество сессий более 30, и каждому АТ доступны не менее двух КА, то потребуется перебрать более  $10^9$  вариантов. Интерес могло бы представлять использование известных методов линейного программирования.

В частности, нетрудно показать, что при отсутствии условия неделимости ресурса отдельных сессий между КА задача поиска допустимого решения может быть сведена к транспортной задаче линейного программирования [18, 19], а при отсутствии ограничения доступности КА, т.е. когда все элементы матрицы  $\mathbf{A}$  равны единице, задачу можно отнести к известному классу задач о раскрое [19]. Тем не менее, в общем случае использование для построения решающего правила существующих методов решения этих задач невозможно.

Перечисленные обстоятельства свидетельствуют о том, что получение оптимального решения в условиях жестких ограничений по времени затруднено. Целесообразно использовать эвристические процедуры. Подобный подход используется довольно часто. Например, существуют варианты жадного алгоритма, различные итерационные стратегии [20] и т.п.

Отметим, что выбор наилучшего решающего правила не входит в задачи настоящей статьи. Этот выбор должен учитывать особенности задач, решаемых конкретной сетью, перечень и характеристики сервисов, относительную важность их предоставления, необходимость первоочередного обслуживания абонентов тех или иных регионов и т.п. Поэтому разрабатываемая модель должна позволять анализировать эффективность использования различных решающих правил, чтобы пользователь мог сравнить варианты между собой и определить предпочтительный.

### 3. Программная реализация модели

Имитационная модель реализована в среде Matlab в виде двух сценариев:

- сценария подготовки исходных данных для имитационного моделирования;

- сценария сбора и обработки статистических данных.

Укрупненный алгоритм подготовки исходных данных для имитационного моделирования представлен на рисунке 2. Сценарий включает два блока:

- подготовка массива точек, в окрестностях которых расположены АТ;

- формирование массива списков доступности КА в точках.

Соответственно, сначала в окне с картой РФ в диалоговом режиме вводятся координаты  $N_T$  точек.



Рис. 2. Укрупненный алгоритм подготовки исходных данных для имитационного моделирования

Далее осуществляется расчет и сохранение массива списков доступности КА в этих точках. Порядок получения данных по пролетам КА над точками аналогичен изложенному в [16] и предполагает:

- расчет координат каждого из  $N_{ка}$  КА в начальный момент времени с учетом равномерного разнесения колец и КА в кольцах;
- пересчет координат на моменты времени  $e\Delta\tau$ ,  $e = 1, \dots, E$ , с учетом суточного вращения Земли и перемещения КА по орбите;
- проверку доступности каждого КА из каждой из  $N_T$  точек для моментов времени  $e\Delta\tau$  и формирование соответствующих списков доступных КА  $H^*(e, n_t)$ ,  $n_t = 1, \dots, N_T$ ;
- сохранение массива списков доступных КА для точек на интервале времени моделирования в файлах исходных данных.

Сценарий сбора и обработки статистических данных, основной сценарий модели, является дискретно-событийным.

Множество событий включает поступление заявок на обслуживание, завершение сессий и изменение доступности КА. Существо моделирования составляет многократное повторение актов применения решающего правила для получения матрицы решения  $U$  и вектора задействованных ресурсов КА  $V$  по вектору требуемых сессиям ресурсов  $B_T$  и матрице доступности КА для проведения сессий  $A$  при наступлении событий поступления заявок и изменения доступности КА. По принятым решениям  $U$  корректируется состояние сети и набирается статистика по отказам в приеме заявок на обслуживание и прерываниям сессий. В случаях нормального завершения сессий решающее правило не применяется, а лишь выполняется освобождение ранее занятого сессией ресурса и осуществляется набор статистики.

На рисунке 3 представлены основные информационные массивы сценария сбора и обработки статистических данных и связи между ними в принятых обозначениях.

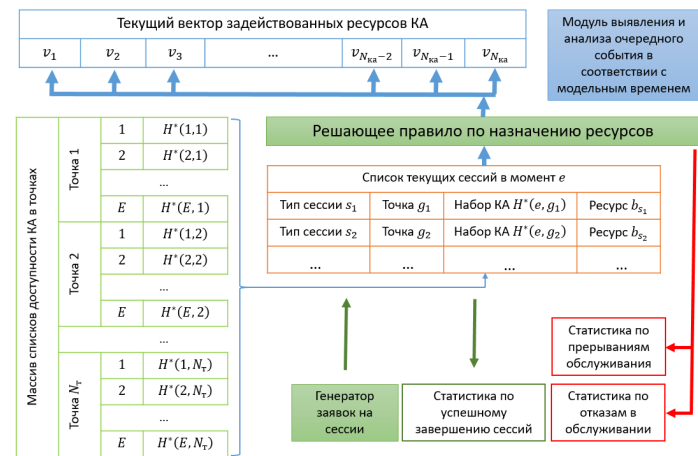


Рис. 3. Основные информационные массивы сценария сбора и обработки статистических данных и связи между ними

К указанным массивам относятся:

- массив списков доступности КА в точках, в окрестности которых находятся абоненты;
- список текущих сессий;
- текущий вектор задействованных ресурсов КА;
- массивы статистики по успешному завершению сессий, а также по необслуженным заявкам.

Также на рисунке 3 представлены элементы модели, обеспечивающие генерацию и обработку заявок, назначение ресурсов, а также управляющий модуль выявления и анализа очередного события в соответствии с модельным временем.

Решающее правило реализовано в виде функции, принимающей в качестве параметров список текущих сессий, где для каждой сессии указан тип  $s_i$ , требуемый ресурс  $b_{s_i}$ , точка  $g_i$ , в окрестности которой находится АТ, и набор доступных из этой точки КА  $H^*(e, g_i)$ . Функция возвращает список текущих сессий, куда добавлены номера КА, через которые должны проводиться сессии, вектор задействованных ресурсов КА, перечень прерываемых сессий. Для модели решающее правило относится к входным данным. Его можно изменить путем замены в сценарии модели упомянутой выше функции.

Используемое по умолчанию решающее правило предусматривает трехэтапную процедуру:

- назначение ресурса сессиям, для которых доступен единственный КА;
- назначение ресурса оставшимся сессиям на КА, где на очередном шаге свободный ресурс максимален;
- прерывание сессий, которым недостаточно ресурса на доступных КА с учетом уже выполненных назначений.

Массив списков доступности КА в точках, сформированный первым сценарием, загружается в память при запуске модели. Начальный «толчок» работе модели дается генерацией времени поступления и реквизитов первой заявки. Далее модуль выявления и анализа очередного события в соответствии с модельным временем определяет, какое из событий должно обрабатываться следующим.

Рассмотрим особенности обработки событий.

Новые заявки поступают в сеть от генератора заявок, реализованного на основе встроенного в Matlab датчика случайных чисел. Для заявки при генерации определяются:

- тип заявки и продолжительность ее обслуживания;
- номер точки, в окрестности которой находится АТ.

Заявка добавляется в список текущих сессий вместе с реквизитами и списком доступных в текущий момент времени КА, который берется из массива списков доступности КА в точках по времени и номеру точки. Затем отрабатывается решающее правило по назначению ресурсов. Здесь возможны два варианта результатов:

- для сессий, включая новую, достаточно ресурсов на КА;
- невозможно перераспределить ресурс между сессиями без прерывания хотя бы одной сессии.

В первом случае осуществляется корректировка текущего вектора задействованных ресурсов КА. Во втором случае новая заявка получает отказ, вектор задействованных ресурсов КА не корректируется, информация по заявке пополняет статистику по отказам в обслуживании.

После обработки события поступления заявки осуществляется генерация новой заявки, что обеспечивает продолжение процесса поступления заявок. Обработка события завершения сессии предполагает исключение сессии из списка текущих сессий, уточнение вектора задействованных ресурсов КА и накопление статистики по успешному завершению сессий.

В моменты, когда модельное время, измеряемое в квантах  $\Delta t$ , принимает целочисленное значение, осуществляется перераспределение ресурса между сессиями. Результатом может быть нахождение решения, позволяющего продолжить все сессии, или отсутствие такого решения. В последнем случае сессии, которым недостаточно ресурса, исключаются из списка текущих сессий, и осуществляется накопление статистики по прерываниям сессий.

Укрупненный алгоритм работы сценария сбора и обработки статистических данных представлен на рисунке 4. Алгоритм обеспечивает выполнение описанных выше операций. Набор статистики продолжается до момента, пока не будет обработано заданное число  $N_c$  заявок на проведение сессий.

В ходе набора статистики ведутся счетчики числа заявок  $N_k^{ref}$  каждого типа, которым отказано в обслуживании при их поступлении в сеть, и счетчики числа заявок  $N_k^{int}$ , сессии обслуживания которых прерваны. Такие же счетчики ведутся отдельно для каждой из  $N_T$  точек.

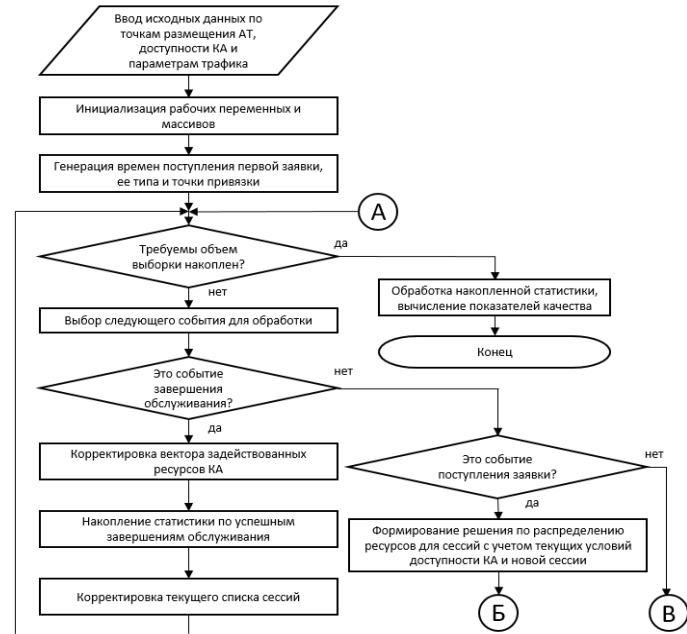


Рис. 4. Укрупненный алгоритм сбора и обработки статистических данных (начало)

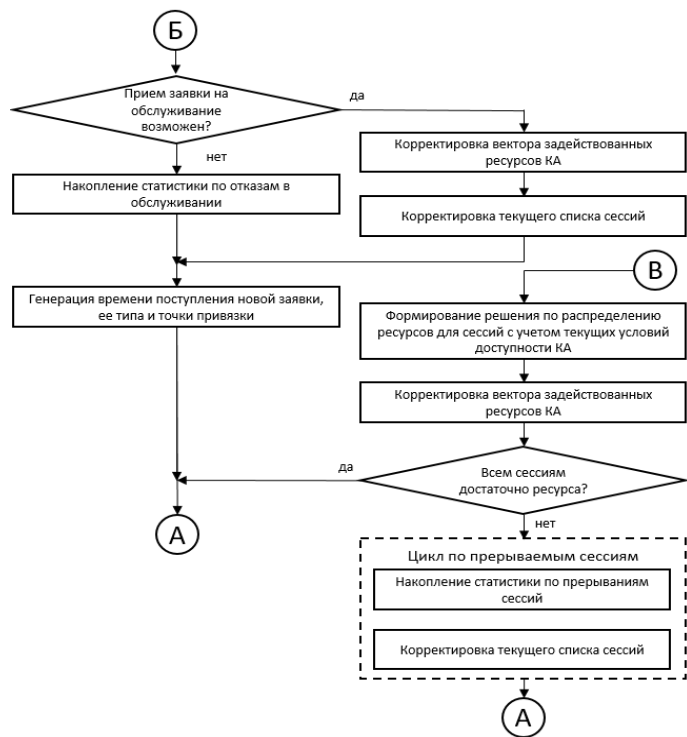


Рис. 4. Укрупненный алгоритм сбора и обработки статистических данных (окончание)

При обработке статистики определяются доли  $\pi_k^{ref}$  заявок каждого типа, получивших отказ, в виде  $\pi_k^{ref} = N_k^{ref} / N_c$ , и доли  $\pi_k^{int}$  прерванных сессий в результате изменения доступности КА  $\pi_k^{int} = N_k^{int} / N_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ ,  $N_k$  – общее количество поступивших заявок  $k$ -го типа.

#### 4. Численные эксперименты

С использованием модели проведены численные эксперименты, позволившие получить оценки показателей качества обслуживания трафика.

В рассматриваемой сети орбитальная группировка включает  $N_{ка} = 12$  КА и содержит  $N_k = 3$  кольца по  $N_{вк} = 4$  КА в каждом кольце на круговых орбитах высотой 8070 км. Наклонение орбит  $90^\circ$ . Минимальный угол места доступности КА для АТ  $\alpha_{мин} = 30^\circ$ .

Массив координат точек, в окрестностях которых находятся АТ, иллюстрируется рисунком 5. Точки практически равномерно размещены по территории РФ, хотя имеют несколько более высокую концентрацию в европейской части страны.

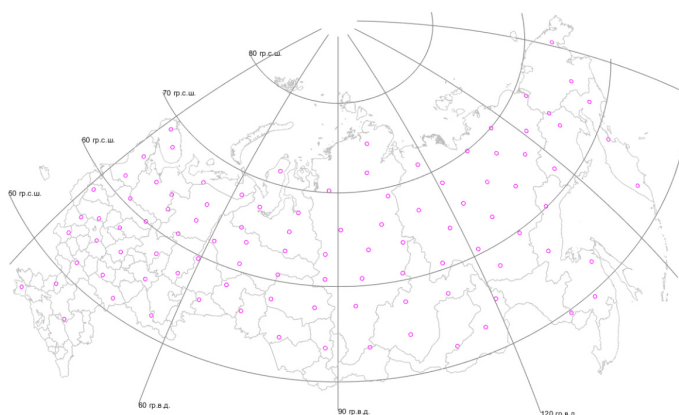


Рис. 5. Совокупность точек, в окрестности которых находятся АТ

Для численного эксперимента использовано решающее правило  $U$ , встроенное в модель по умолчанию и описанное в разделе 3.

Характеристики мультисервисного трафика представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики мультисервисного трафика

Характеристика	Значение
Количество типов трафика реального времени	3
Максимальные интенсивности поступления заявок (в минуту), вектор $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$	(1.2, 0.6, 0.3)
Затраты ресурса на сессию, вектор $(b_1, b_2, b_3)$	(1, 4, 8)
Интенсивности обслуживания заявок (в минуту), вектор $(\mu_1, \mu_2, \mu_3)$	(0.3, 0.15, 0.2)
Ресурс обслуживания одного КА $\nu$	25

В таблице 1 представлены максимальные значения интенсивностей поступления заявок на проведение сессий разных типов, и полагается, что пропорции между интенсивностями для заявок разных типов сохраняются. Если осуществляется расчет показателей качества работы сети для других значений интенсивности, то компоненты нового вектора интенсивностей определяются, как соответствующий процент от компонент вектора максимальных интенсивностей. Например, нагрузке 30% соответствуют интенсивности  $(1.2, 0.6, 0.3) * 0.3 = (0.36, 0.18, 0.09)$ . Соответственно, далее нагрузка в сети

будет измеряться в процентах от ее максимального значения, заданного в таблице 1.

Переходя к результатам численного анализа, следует иметь в виду, что при заданном значении угла  $\alpha_{мин} = 30^\circ$

для описанных выше параметров орбитальной группировки не обеспечивается полное покрытие поверхности Земного шара. Это иллюстрируется рисунком 6, где границы зон обслуживания КА показаны сплошной красной линией.

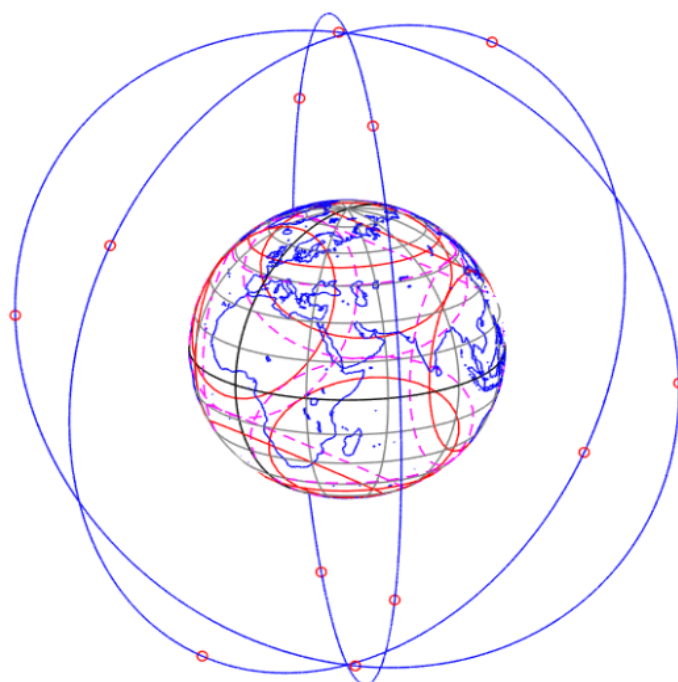


Рис. 6. Пример мгновенных зон доступности КА для  $\alpha_{мин} = 30^\circ$  (сплошные красные линии) и для  $\alpha_{мин} = 20^\circ$  (пунктирные линии)

Промежутки между зонами обслуживания КА особенно заметны в южных широтах. При этом в северных широтах количество доступных абонентам КА может составлять 2-3 и более. Избавиться от указанных промежутков могло бы снижение величины  $\alpha_{мин}$  до  $20^\circ$ . Соответствующие зоны показаны на рисунке 6 пунктирной линией. Однако, при заданных исходных данных в течение периода моделирования будут встречаться интервалы времени, когда у абонентов нет доступных КА, и отказ в обслуживании заявок будет иметь место для всех типов сессий. Наличие таких интервалов на широте  $40^\circ$  с. ш. и их отсутствие на широте  $70^\circ$  с. ш. иллюстрируется рисунками 7 и 8.

Естественно, получаемые при имитационном моделировании оценки показателей качества отличаются от теоретических значений. Чтобы эти отличия были относительно небольшими, объем набираемой статистики определяется таким образом, чтобы доверительный интервал, в котором с высокой вероятностью находится теоретическое значение был достаточно узким. Для построения доверительных интервалов использован подход, описанный в [1] и основанный на разбиении интервала моделирования на равные циклы, вычислении оценок показателей на каждом цикле и совместной обработке оценок для циклов с использованием таблиц распределения Стьюдента.

Таблица 2

Результаты расчета зависимости доли  $\pi_3$  необслуженных заявок на предоставление сервиса 3, а также нижней и верхней границ доверительных интервалов от нагрузки

Величина нагрузки (в % от максимальной)	10%	20%	30%	40%	50%
Оценка доли необслуженных заявок	0,03308	0,033767	0,033813	0,034999	0,036983
Нижняя граница доверительного интервала	0,032571	0,033124	0,03322	0,034271	0,036405
Верхняя граница доверительного интервала	0,033589	0,034409	0,034406	0,035726	0,037562
Величина нагрузки (в % от максимальной)	60%	70%	80%	90%	100%
Оценка доли необслуженных заявок	0,038936	0,043625	0,050431	0,058568	0,069807
Нижняя граница доверительного интервала	0,03817	0,042954	0,0496	0,057513	0,068736
Верхняя граница доверительного интервала	0,039701	0,044296	0,051262	0,059622	0,070877

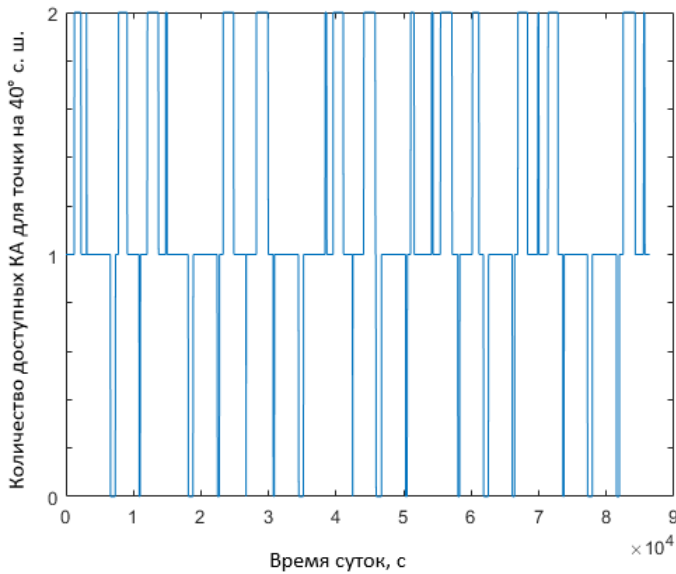


Рис. 7. Количество доступных КА для точки с широтой 40° с. ш. в течение суток при  $\alpha_{мин} = 30^\circ$

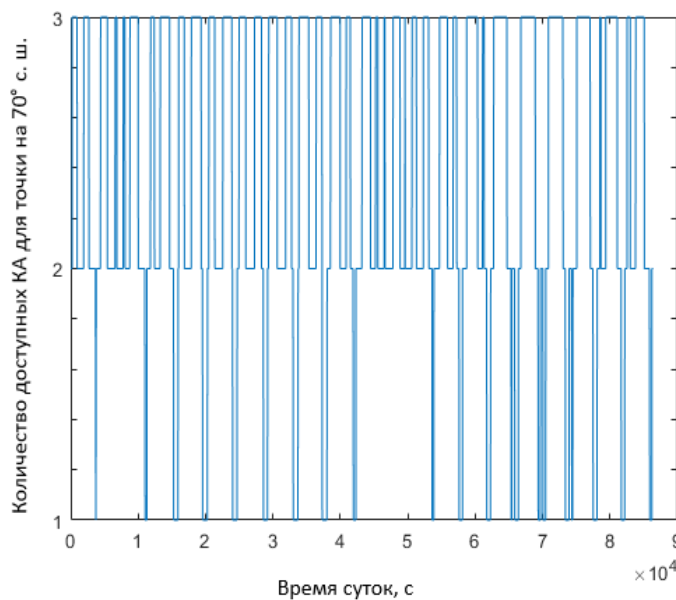


Рис. 8. Количество доступных КА для точки с широтой 70° с. ш. в течение суток при  $\alpha_{мин} = 30^\circ$

Проведенные исследования показали, что при объеме выборки порядка 2,5 млн заявок, с одной стороны, получается приемлемая точность оценок, с другой стороны, время моделирования составляет единицы минут. Результаты построения доверительных интервалов для доли необслуженных заявок на предоставление сервиса 3 при различных нагрузках иллюстрируются таблицей 2 и рисунком 9.

Доверительная вероятность здесь составляет 0,95. Видно, что ширина доверительных интервалов по отношению к оценке не превосходит единиц процентов, т.е. точность оценивания можно считать приемлемой.

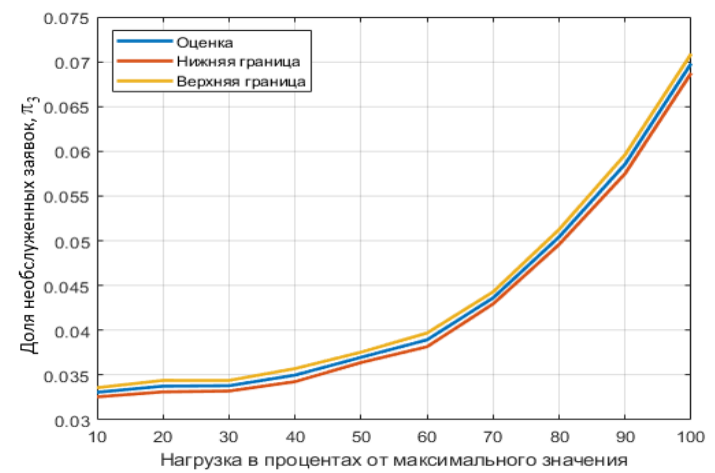


Рис. 9. Зависимость доли  $\pi_3$  необслуженных заявок на предоставление сервиса 3, а также нижней и верхней границ от нагрузки

Зависимости долей необслуженных заявок от нагрузки с детализацией причин не обслуживания представлены на рисунках 10, 11 и 12.

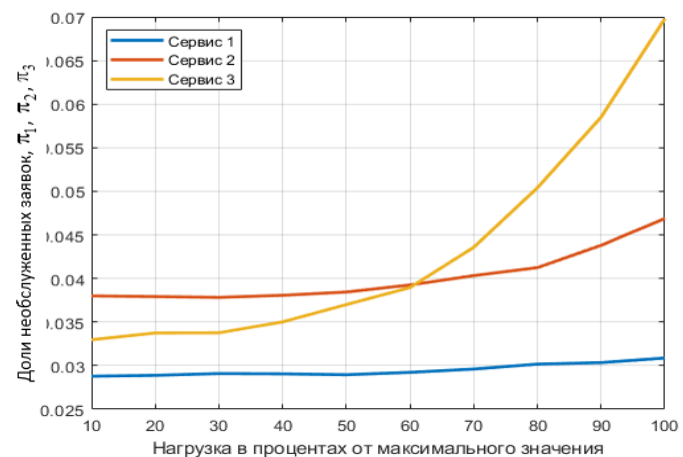


Рис. 10. Зависимости долей  $\pi_1, \pi_2, \pi_3$  необслуженных заявок от нагрузки

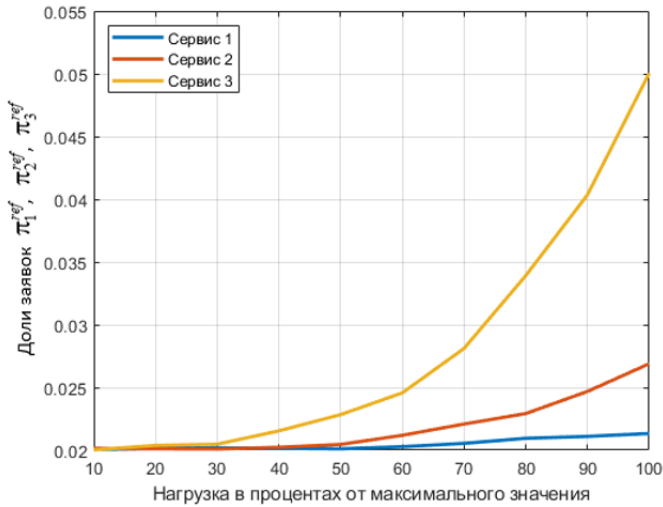


Рис. 11. Зависимости долей  $\pi_1^{ref}$ ,  $\pi_2^{ref}$ ,  $\pi_3^{ref}$  заявок, получивших отказ при поступлении, от нагрузки

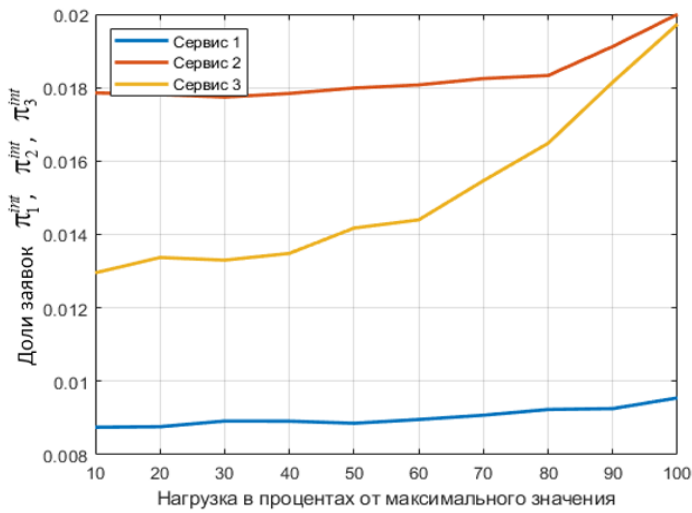


Рис. 12. Зависимости долей  $\pi_1^{int}$ ,  $\pi_2^{int}$ ,  $\pi_3^{int}$  прерванных сессий от нагрузки

Видно, что увеличение доли необслуженных заявок при росте входной нагрузки с 10 до 100% для разных типов трафика имеет различный характер. Если для трафика первого типа, требующего для обслуживания заявки занятие минимального ресурса на наименьшее среднее время, рост показателя  $\pi_1$  незначителен (менее 10%), то для трафика второго и третьего типа увеличение долей необслуженных заявок более существенно.

Для трафика второго типа  $\pi_2$  увеличивается примерно на 20%, а для трафика третьего типа  $\pi_3$  возрастает более чем в два раза. Обращает на себя внимание тот факт, что при нагрузках до 60% от максимального значения доля необслуженных заявок второго типа больше доли необслуженных заявок третьего типа, хотя затраты ресурса на проведение сессий третьего типа больше,  $b_3 > b_2$ . Для объяснения причин такого обстоятельства обратимся к зависимостям  $\pi_k^{ref}$  и  $\pi_k^{int}$

от нагрузки для  $k = 2, 3$  (рис. 11 и 12). Значения  $\pi_2^{ref}$  и  $\pi_3^{ref}$  при низких нагрузках примерно равны, и, видимо, определяются вероятностью события, что в момент возникновения заявок доступные КА отсутствуют. При высоких нагрузках  $\pi_3^{ref}$  значительно превосходит  $\pi_2^{ref}$ . Значения  $\pi_2^{int}$  при одинаковых нагрузках превосходят  $\pi_3^{int}$ , так как среднее время обслуживания заявок второго типа больше, т.е.  $1/\mu_2 > 1/\mu_3$ , и сессии второго типа в среднем участвуют в процедурах переназначения ресурса чаще, чем сессии третьего типа. В итоге при низких нагрузках  $\pi_2^{ref} \approx \pi_3^{ref}$ ,  $\pi_2^{int} > \pi_3^{int}$  и потому  $\pi_2 < \pi_3$ , а при высоких нагрузках превосходство  $\pi_3^{ref}$  над  $\pi_2^{ref}$  оказывается решающим и  $\pi_2 < \pi_3$ . Впрочем, эти результаты получены для описанного выше решающего правила, и, возможно, при использовании других решающих правил соотношение  $\pi_2$  и  $\pi_3$  будет иным.

Модель позволяет оценивать значения показателей качества не только для сети в целом, но и, например, для отдельных регионов. В частности, для относительно равномерного распределения по территории РФ точек, в окрестности которых находятся АТ, интерес может представлять влияние на показатели широты точек. Так на рисунке 13 представлены зависимости долей необслуженных заявок от нагрузки для широт в диапазоне от 60° до 65° с. ш. Видно, что характер зависимости примерно такой же, что и для сети в целом (рис. 10). Сравнительно лучшую гладкость линий зависимостей для сети в целом можно объяснить большим объемом статистики.

Другим примером зависимостей показателей качества от широты является диаграмма, представленная на рисунке 14. Здесь весь диапазон широт зоны размещения АТ разбит на шесть поддиапазонов шириной 5°. Для каждого поддиапазона представлены значения долей необслуженных заявок от широты при нагрузке 60% от максимальной для каждого сервиса. На широтах выше 65° с. ш., для всех сервисов обеспечивается доля необслуженных заявок менее 1%. Это объясняется тем обстоятельством, что на высоких широтах доступность КА выше и реже возникают ситуации полного отсутствия доступности КА.

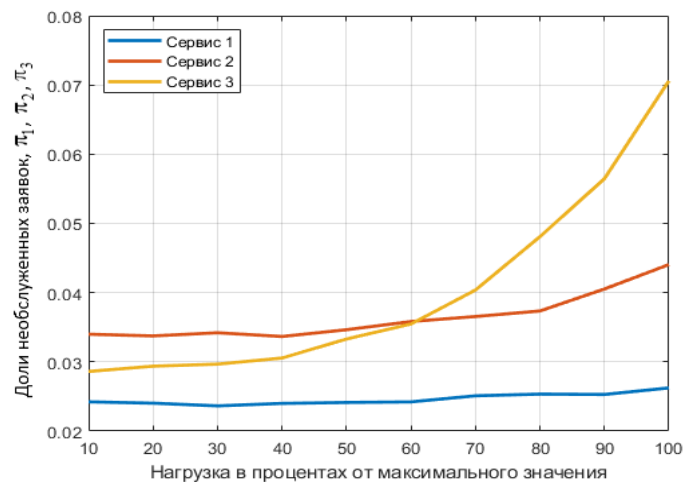


Рис. 13. Зависимости долей необслуженных заявок от нагрузки на широтах 60°-65° с. ш.

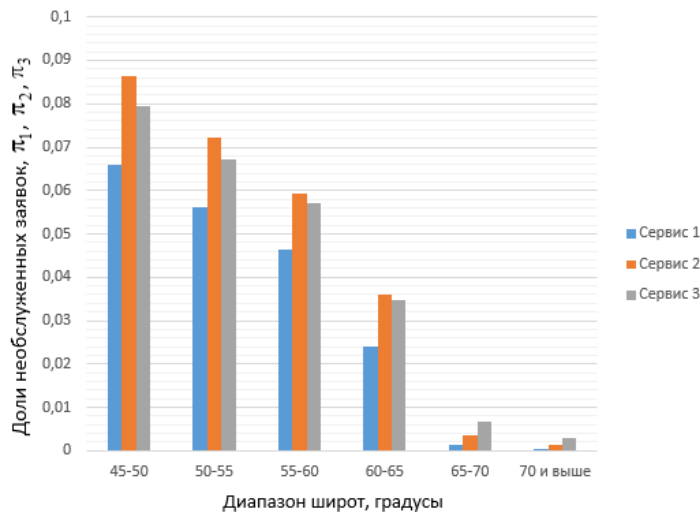


Рис. 14. Зависимость доли необслуженных заявок от широты при нагрузке 60% от максимальной

Для учета зависимостей качества обслуживания абонентов от характера их распределения по зоне обслуживания сети удобно ввести поправочные коэффициенты  $K_{\Pi}^{(k, n_t)} = \left( \frac{\pi_k^{(n_t)}}{\pi_k} \right) 100\%$ , где  $k$  – тип сервиса,  $n_t$  – номер точки,  $\pi_k^{(n_t)}$  и  $\pi_k$  – доли заявок, получивших отказ при передаче трафика  $k$ -го сервиса абонентами, соотнесенными с точкой  $n_t$ , и абонентами сети в целом. Для примера на рисунке 15 представлены такие коэффициенты для второго сервиса на фоне карты РФ для точек, где  $\pi_2^{(n_t)} > \pi_2$ .

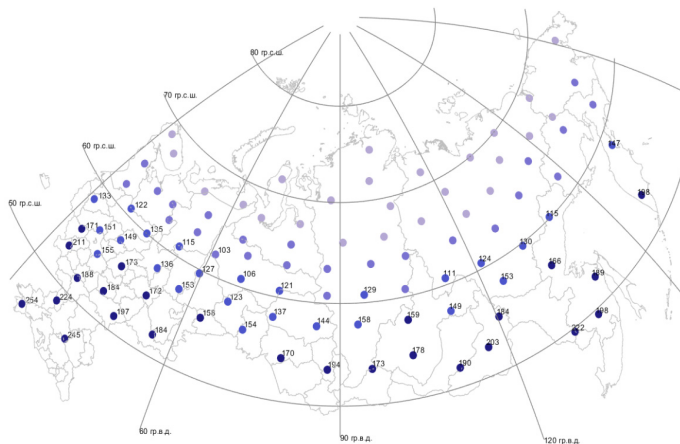


Рис. 15. Множество точек, к которым привязаны АТ, с цветовой индикацией доли заявок, получивших отказ при передаче трафика второго сервиса (светло-синий цвет соответствует низким величинам  $\pi_2^{(n_t)}$ , темно-синий большим) с указанием для точек, где потери выше средних по сети, коэффициентов  $K_{\Pi}^{(2, n_t)}$  при нагрузке 10% от максимальной и  $\pi_2 \approx 0,038$

Пользователь сервиса может вычислить долю заявок, получивших отказ, для своей точки дислокации по показателю для сети в целом и известному ему поправочному коэффициенту.

## 5. Заключение

Разработанная модель мультисервисной спутниковой сети связи на базе космических аппаратов на низких и средних круговых орбитах при обслуживании трафика реального времени обеспечивает оценку долей необслуженных заявок каждого типа вследствие отказа в приеме заявок на обслуживание и прерывания сессий получения сервисов из-за недостатка ресурса обслуживания. Модель позволяет учесть динамику изменения доступности КА абонентам и особенности размещения абонентов по территории зоны обслуживания сети. Предусмотрена возможность смены решающего правила по динамическому назначению ресурсов КА с учетом текущего перечня сессий и наборов доступных активным абонентам КА. Модель реализована в среде Matlab в виде двух сценариев:

- сценария подготовки исходных данных для имитационного моделирования;
- сценария сбора и обработки статистических данных.

Проведены численные эксперименты на примере применения встроенного в модель эвристического решающего правила и распределения АТ по территории РФ для сети на базе двенадцати КА с высотой орбиты порядка восьми тысяч километров. В ходе экспериментов построены достоверные интервалы оценок показателей качества, получены зависимости оценок от параметров входной нагрузки для сети в целом и для отдельных диапазонов широты дислокации АТ. Модель может использоваться при проектировании сетей для предварительной оценки эффективности предлагаемых вариантов построения и на этапе эксплуатации для обоснования возможностей проведения мероприятий по наращиванию и модернизации сети.

## Литература

1. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 868 с.
2. Башарин Г.П. Лекции по математической теории телетрафика: Учеб. пособие М.: РУДН, 2009. 342 с.
3. Stepanov M.S., Kanishcheva M.G., Malikova E.E., Ndayikunda J., Kaigorodov N.G. The Development and Analysis of a Service Model for the Traffic of a Surveillance System Operator by a Dedicated Resource of an LTE Cell // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2022, pp. 1-6.
4. Stepanov M.S., Stepanov S.N., Kroshin F.S. Effective Algorithm of Estimation the Performance Measures of Group of Servers with Dependence of Call Repetition on the Type of Call Blocking DCCN 2022 // Lecture Notes Computer Science, Springer, Cham. 2022.
5. Gibadullina E.E., Viskova E.V., Stepanov S.N. Automated Service Configuration Management in IP/MPLS Networks // 4th International Science and Technology Conference “Modern Network Technologies – 2022”, MoNeTec – 2022.
6. Andrabi U.M., Kanishcheva M., Stepanov S.N. Observation system resource planning in presence of access control based on volume of resource occupied by traffic flows // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2022, vol. 16, no.8, pp. 54-62.
7. Dawood T., Stepanov M. S., Naoussi C., Joao B., Yahia K. The Mathematical Model of the Internet of Things Traffic Servicing in Case of its Impulse Nature // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-8.

8. *Ndimumahoro F., Stepanov M.S., Muzata A.R., Tammam D., Popov V.G.* Using the Principles of Mobile Systems Modeling for LoRaWAN Characteristics Estimation // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2022, pp. 1-8.

9. *Степанов С.Н., Степанов М.С.* Приближенный метод оценки характеристик совместного обслуживания трафика реального времени и эластичного трафика данных в мультисервисных узлах доступа // Автомат. и телемех., 2023, № 11. С. 93-114.

10. *Maslov A.A., Sebekin G.V., Stepanov S.N., Shchurkov A.O., Vasilyev A.P.* Model of processes for joint maintenance of real-time multiservice traffic and elastic data traffic in a network of low-power mobile subscriber terminals based on high-throughput satellites // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Vol. 18. № 3, pp. 41-49. ISSN: 2072-8735

11. *Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Щурков А.О.* Модель резервирования канального ресурса при обслуживании разнородного трафика в сети маломощных мобильных абонентских терминалов на базе КА с высокой пропускной способностью // Информационные процессы. 2024. Т. 24. № 1. С. 1-15.

12. *Себекин Г.В., Маслов А.А., Щурков А.О.* Моделирование совместного обслуживания мультисервисного трафика реального времени и эластичного трафика данных в сетях на базе космических аппаратов с высокой пропускной способностью // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. Т. 22. № 2. С. 11-22.

13. *Маков С.В., Маслов А.А., Себекин Г.В.* Оценка эффективности использования ресурса пропускной способности каналов ретрансляции космических аппаратов класса HTS на геостационарной и высокоэллиптической орбите для организации сети передачи трех типов трафика // Наноиндустрия. Специальный выпуск 9с. Т. 16(119). 2023. С. 613-619.

14. *Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н.,*

*Щурков А.О.* Модель сети передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах. Часть 1. Режим одностороннего случайного множественного доступа // Информационные процессы. 2025. Т. 25. № 3. С. 456-471.

15. *Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Щурков А.О.* Модель сети передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах. Часть 2. Режим случайного множественного доступа с подтверждением приема пакетов // Информационные процессы. 2025. Т. 25. № 3. С. 472-489.

16. *Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Щурков А.О.* Моделирование процессов обслуживания абонентов в сети передачи данных на базе космических аппаратов на низкой круговой орбите. I // Информационные процессы. 2024. Т. 24. № 4. С. 335-349.

17. *Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Щурков А.О.* Моделирование процессов обслуживания абонентов в сети передачи данных на базе космических аппаратов на низкой круговой орбите. II // Информационные процессы. 2025. Т. 25. № 2. С. 151-168.

18. *Таха Хедми А.* Введение в исследование операций: Пер. с англ. Изд. 7-е. М.: Издательский дом «Вильямс». 2005. 912 с.

19. *Креммер Н.Ш., Путко Б.А., Тришин И.М., Фридман М.Н.* Исследование операций в экономике: Учеб. пособие для вузов. М.: ЮНИТИ, 2005. 407 с.

20. *Афраймович Л.Г.* Информационные технологии в области принятия решений. Часть 1. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. 27 с.

21. *Чертова О.Г., Чиров Д. С.* Построение опорной сети связи на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с отсутствием наземной инфраструктуры // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 60-71. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10269. EDN: EHSBMO

## MODELING OF REAL-TIME TRAFFIC SERVICE PROCESSES IN MULTISERVICE BROADBAND SATELLITE COMMUNICATIONS NETWORKS BASED ON SPACECRAFT AT LOW AND MEDIUM CIRCULAR ORBITS

**Alexander A. Maslov**, Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, Russia, [maslov.aa@mipt.ru](mailto:maslov.aa@mipt.ru)

**Gennady V. Sebekin**, Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, Russia, [sebekin.gv@mipt.ru](mailto:sebekin.gv@mipt.ru)

**Mikhail S. Stepanov**, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia, [m.s.stepanov@mtuci.ru](mailto:m.s.stepanov@mtuci.ru)

**Sergey N. Stepanov**, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia, [s.n.stepanov@mtuci.ru](mailto:s.n.stepanov@mtuci.ru)

**Alexey O. Shchurkov**, Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, Russia, [shchurkov.ao@mipt.ru](mailto:shchurkov.ao@mipt.ru)

**Alexander P. Vasiliev**, Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, Russia

### Abstract

A model of a multiservice broadband satellite communication network based on spacecraft in low and medium circular orbits for servicing real-time traffic has been developed, which makes it possible to take into account as source data the crucial rule for assigning a resource for holding different types of sessions and the specifics of placing subscribers across the network's service area. At the same time, the quality of network operation is assessed by the proportion of unserved requests, both for the network as a whole and for individual regions, depending on the parameters of the orbital constellation of spacecraft and subscriber terminals, traffic characteristics of each type, and resource costs for sessions. In the course of numerical experiments, confidence intervals for estimates of quality indicators were constructed, and the dependences of estimates on input load parameters for the network as a whole and for individual regions of subscriber deployment were obtained. The model can be used by network developers and operators to select crucial rules for assigning a resource to subscribers, evaluate the possibilities of building up the network, and justify the need for its modernization.

**Keywords:** spacecraft in low and medium circular orbits, channel resource, multiservice traffic, real-time traffic, subscriber terminals, simulation

## References

- [1] S.N. Stepanov, "Teletraffic theory: concepts, models, applications", *T-Comm*, 2015, p. 868 (In Russian).
- [2] G.P. Basharin, "Lectures on the mathematical theory of telegraphy: textbook," Moscow, RUDN University, 2009, p. 342 (In Russian).
- [3] M.S. Stepanov, M.G. Kanishcheva, E.E. Malikova, J. Ndayikunda, N.G. Kaigorodov, "The Development and Analysis of a Service Model for the Traffic of a Surveillance System Operator by a Dedicated Resource of an LTE Cell," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2022, pp. 1-6.
- [4] M.S. Stepanov, S.N. Stepanov, F.S. Kroshin, "Effective Algorithm of Estimation the Performance Measures of Group of Servers with Dependence of Call Repetition on the Type of Call Blocking DCCN 2022," *Lecture Notes Computer Science*, Springer, Cham. 2022.
- [5] E.E. Gibadullina, E.V. Viskova, S.N. Stepanov, "Auto-mated Service Configuration Management in IP/MPLS Networks," *4th International Science and Technology Conference "Modern Network Technologies - 2022"*, MoNeTec-2022.
- [6] U.M. Andrabi, M.Kanishcheva, S.N. Stepanov, "Observation system resource planning in presence of access control based on volume of resource occupied by traffic flows," *T-Comm*, 2022, vol. 16, no.8, pp. 54-62.
- [7] T. Dawood, M.S. Stepanov, C. Naoussi, B. Joao, K. Yahia, "The Mathematical Model of the Internet of Things Traffic Servicing in Case of its Impulse Nature," *2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-8.
- [8] F. Ndimumahoro, M.S. Stepanov, A.R. Muzata, D. Tammam, V.G. Popov, "Using the Principles of Mobile Systems Modeling for LoRaWAN Characteristics Estimation," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2022, pp. 1-8.
- [9] S.N. Stepanov, M.S. Stepanov, "An approximate method for estimating the characteristics of real-time traffic sharing and elastic data traffic in multi-server access nodes", *Automation and Remote Control*, 2023, no. 11, pp. 93-114 (In Russian).
- [10] A.A. Maslov, G.V. Sebekin, S.N. Stepanov, A.O. Shchurkov, A.P. Vasilyev, "Model of processes for joint maintenance of real-time multiservice traffic and elastic data traffic in a network of low-power mobile subscriber terminals based on high-throughput satellites ", *T-Comm*, 2024, vol. 18, no. 5, pp. 41-49, ISSN: 2072-8735: Models of shared service processes.
- [11] A.A. Maslov, G.V. Sebekin, S.N. Stepanov, M.S. Stepanov, A.O. Shchurkov, "A model for reserving a channel resource when servicing heterogeneous traffic in a network of low-power mobile subscriber terminals based on high-bandwidth spacecraft", *Information processes*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 1-15 (In Russian).
- [12] G.V. Sebekin, A.A. Maslov, A.O. Shchurkov, "Simulation of joint maintenance of real-time multiservice traffic and elastic data traffic in high-bandwidth spacecraft-based networks," *Information-measuring and control systems*, 2024, vol. 22, no. 2, pp. 11-22 (In Russian).
- [13] S.V. Makov, A.A. Maslov, G.V. Sebekin, "Assessment of the efficiency of using the bandwidth of the HTS-class spacecraft relay channels in geostationary and highly elliptical orbits to organize a network for transmitting three types of traffic", *Nanoindustry*. Special issue 9s, vol. 16(119), 2023, pp. 613-619 (In Russian).
- [14] A.A. Maslov, G.V. Sebekin, S.N. Stepanov, M.S. Stepanov, A.O. Shchurkov, "An IoT Data Network Model Based on Spacecraft in Low Circular Orbits. Part 1. One-way Random Multiple Access Mode," *Information processes*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 456-471 (In Russian).
- [15] A.A. Maslov, G.V. Sebekin, S.N. Stepanov, M.S. Stepanov, A.O. Shchurkov, "An IoT Data Network Model Based on Spacecraft in Low Circular Orbits. Part 2. Random multiple access mode with packet acceptance confirmation," *Information processes*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 472-489 (In Russian).
- [16] A.A. Maslov, G.V. Sebekin, S.N. Stepanov, M.S. Stepanov, A.O. Shchurkov, "Modeling of subscriber service processes in a data transmission network based on spacecraft in a low circular orbit. I," *Information processes*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 335-349 (In Russian).
- [17] A.A. Maslov, G.V. Sebekin, S.N. Stepanov, M.S. Stepanov, A.O. Shchurkov, "Modeling of subscriber service processes in a data transmission network based on spacecraft in a low circular orbit. II," *Information processes*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 151-168 (In Russian).
- [18] Taha. Khedmi A., "Introduction to operations research: Translated from English". Ed. 7-E, 2005, p. 912 (In Russian).
- [19] N.S. Kremer, B.A. Putko, I.M. Trishin, M.N. Friedman, "Operations research in economics: Textbook for universities," Moscow: UNITY, 2005, p. 407 (In Russian).
- [20] L.G. Afraimovich, "Information technologies in the field of decision-making. Part I," Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2016, p. 27 (In Russian).
- [21] O. G. Chertova., D. S. Chirov, "Building a core communication network which is based on small size unmanned aircraft vehicle without ground infrastructure," *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 3, pp. 60-71. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10269.

## Information about authors:

**Alexander A. Maslov**, Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Leading engineer, Moscow, Russia

**Gennady V. Sebekin**, Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Head of Department, Moscow, Russia

**Mikhail S. Stepanov**, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Associate Professor, Moscow, Russia

**Sergey N. Stepanov**, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Head of the Department, Moscow, Russia

**Alexey O. Shchurkov**, Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Leading engineer, Moscow, Russia

**Alexander P. Vasiliev**, Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Research fellow, Moscow, Russia