

УДК 621.396.932

МОДЕЛЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЁМКОСТЬЮ РАДИОСЕТИ DMR TIER III В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА РЕСУРСА НА ОСНОВЕ СПИСКОВ ДОСТУПА

Ильченко Андрей Викторович, ассистент, Московский авиационный институт, Москва, Россия,
Email: Ilchenkoav@mai.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается проблема нехватки частотного ресурса в диапазонах VHF и UHF для транкинговых радиосетей, используемых в критически важных отраслях, таких как гражданская авиация и железнодорожный транспорт. Предложен метод оптимизации вызовов в сетях стандарта DMR Tier III, основанный на динамическом распределении нагрузки между базовыми станциями. Разработанное программное обеспечение включает три модуля: конвертер данных, аналитический модуль и модуль визуализации. Приведены математические модели обработки информации, а также результаты тестирования системы, демонстрирующие повышение пропускной способности транкинговой радиосети DMR Tier III на 15% за счет динамического перераспределения групповых вызовов между базовыми станциями на основе анализа их текущей нагрузки.

Ключевые слова: DMR Tier III, транкинговая радиосеть, оптимизация вызовов, обработка информации, пропускная способность

MODEL AND IMPLEMENTATION OF DMR TIER III RADIO NETWORK CAPACITY MANAGEMENT UNDER RESOURCE SCARCITY CONDITIONS BASED ON ACCESS LISTS

Andrey V. Ilchenko, assistant, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia, E-mail: Ilchenkoav@mai.ru

ABSTRACT

The article discusses the problem of lack of frequency resource in the VHF and UHF bands for trunked radio networks used in critical industries such as civil aviation and rail transport. A method for optimizing calls in DMR Tier III networks based on dynamic load distribution between base stations is proposed. The developed software includes three modules: a data converter, an analytical module, and a visualization module. Mathematical models of information processing are presented, as well as the results of testing the system, demonstrating an increase in DMR Tier III network bandwidth.

Keywords: DMR Tier III, trunking radio network, call optimization, information processing, bandwidth

Введение

Проблема нехватки частотного ресурса в диапазонах VHF (160 МГц) и UHF (400 МГц) для организации оперативной радиосвязи в критически важных отраслях, таких как гражданская авиация и железнодорожный транспорт, становится все более актуальной. В настоящее время частотные назначения в диапазонах VHF и UHF, за исключением авиационного, осуществляются Роскомнадзором на основании проведенной Главным радиочастотным центром экспертизы электромагнитной совместимости [1]. Это создает сложности для критически важных отраслей в условиях ограниченного и перегруженного частотного ресурса. Уполномоченный орган – Главный радиочастотный центр проводит экспертизу электромагнитной совместимости и далее Роскомнадзор назначает частоты. В условиях роста числа заявителей и ограниченного частотного ресурса традиционные подходы к организации радиосвязи становятся неэффективными.

В настоящее время во многих регионах России наблюдается острый дефицит частотного ресурса в традиционно используемых диапазонах VHF и UHF. Это связано как с ростом числа пользователей радиосвязи, так и с технологической отсталостью части инфраструктуры. Особенно критична ситуация для отраслей, где надежная связь является вопросом безопасности – авиации, железнодорожного транспорта и аварийных служб. При этом существующий частотный ресурс используется неэффективно из-за преобладания устаревших аналоговых технологий.

Для решения этой проблемы активно внедряются современные цифровые стандарты радиосвязи, позволяющие значительно увеличить емкость сетей за счет спектральной эффективности. Новые технологии обеспечивают не только голосовую связь, но и передачу данных, интеграцию с телеметрическими системами и диспетчеризацией. Однако их распространение сталкивается с рядом сложностей, включая высокую стоимость перехода, необходимость замены оборудования и несовершенство нормативной базы. Ключевым становится поиск баланса между оперативным внедрением цифровых решений и сохранением работоспособности существующих систем связи.

Перспективным направлением развития являются технологии цифровой радиосвязи нового поколения, такие как Private LTE [2] с поддержкой MCPTT (Mission-Critical Push-to-Talk [5]) и McWiLL [9], которые сочетают широкополосную передачу данных с функционалом профессиональной радиосвязи. Эти решения позволяют значительно увеличить спектральную эффективность за счет адаптивного распределения ресурсов и поддержки групповой связи в рамках единой инфраструктуры. Однако их внедрение требует обеспечения обратной совместимости с действующими узкополосными системами, что является сложной технической и регуляторной задачей [10]. Как отмечают эксперты Международного союза электросвязи (ITU), переход к новым технологиям должен сопровождаться тщательным планированием частотного ресурса и модернизацией нормативной базы [3].

Многие организации в России уже обладают выделенными частотными ресурсами в диапазонах 136-174 МГц и 400-470 МГц с действующими разрешениями на аналоговую радиосвязь. Эти ресурсы могут быть эффективно использованы для поэтапного перехода на цифровые технологии, в частности – на стандарт DMR Tier III, который сочетает совместимость с существующей инфраструктурой и расширенный функционал. Данный стандарт позволяет организовать полноценную транкинговую связь с групповыми и индивидуальными вызовами с динамическим распределением частотных каналов, что значительно повышает эффективность использования частотного спектра по сравнению с традиционными аналоговыми системами [6].

Ключевым преимуществом DMR Tier III является возможность работы в рамках уже выделенных частотных диапазонов без необходимости кардинального пересмотра существующих разрешительных документов. Технология поддерживает не только голосовую связь, но и передачу данных, интеграцию с диспетчерскими системами, а также расширенные функции управления группами абонентов. При этом обеспечивается плавный переход от аналоговых решений к цифровым за счет поддержки дуплексного режима и совместимости с оборудованием предыдущих поколений [7].

В данной статье предлагается новый метод обработки информации о вызовах, ориентированный на их функциональные особенности, а именно на принадлежность абонента к конкретной функциональной группе – авиационная безопасность, авиамеханики,

обработка багажа, специалисты по работе с пассажирами, тягачи, автобусы и т.д. Подробный перечень служб аэропорта автор отмечает в статье [11], где анализируется способность транкинговой радиосети обеспечить связь для всего перечня рабочих групп наземного обслуживания, куда входят службы буксировки, заправки, кейтеринга, уборки, транспорта, а также персонал, отвечающий за погрузку-выгрузку багажа и обслуживание ВС, и делается вывод о недостаточности стандартной сети для их нужд, что требует ее модернизации или выделения выделенных каналов.

Целью данной работы является разработка метода обработки информации о групповых вызовах в сетях DMR Tier III, позволяющего динамически распределять нагрузку между базовыми станциями и тем самым повышать пропускную способность сети в условиях ограниченного частотного ресурса.

1. Методы

1.1 Методология исследования

В основу настоящего исследования положен комплексный анализ данных о вызовах в промышленной транкинговой сети стандарта DMR Tier III. Для обработки сырых данных массивов телеметрии [8] было разработано специализированное программное обеспечение, архитектура которого включает три взаимосвязанных модуля. Конвертер данных выполняет трансформацию сырых логов системы из проприетарного формата оборудования в структурированную реляционную базу данных на платформе MariaDB. Пример формата сырых данных, где можно почерпнуть данные относительно абонента, группы, времени вызова, типа вызова, а также качестве связи (RSSI):

```
{ "source": { "Redundancy Group": 0, "App Type Id": 7, "Server Id": 21, "Device Site id": 21 }, "descriptor": { "Protocol": 0, "Opcode": "ATIADDataGWStatusPdu", "Source Unique Id": 698992, "Destination Unique Id": 0, "Sequence Number": 0, "Timestamp": 4136543255, "Fragment": 0, "Version": 34078720, "Role Info": "Data Gateway in System Trunking" }, "payload": { "Timestamp": 4136542326, "Csn": 1652637741, "Src": 71830, "Tgt": 64250, "Site all call site id": 0, "Action": "gw_data_receipt", "Info": "confirmed_data_rx", "Value": 0, "Site Id": 3, "Logical Channel Number": 2, "RSSI": "-64.16 dbm", "Source Port": 4001, "Destination Port": 4001, "CallType": "individual_data_call", "Originating Device Role Info": "Trunk Channel in System Trunking", "ConfGroupDataSummary": "Not available" } }
```

Аналитический модуль реализует алгоритмы машинного обучения для выявления аномалий в работе сети. На основе временных рядов вычисляются ключевые показатели: вероятность блокировки вызова (Grade of Service), среднее время установления соединения, и коэффициент использования каналов. Модуль визуализации генерирует интерактивные отчеты в формате HTML (с использованием библиотеки D3.js) и структурированные таблицы Excel.

На рисунке 1 представлена общая структурная схема модулей по обработке информации о вызовах. Программное обеспечение [4] написано на языке программирования Perl с использованием модулей JSON, DBD::MariaDB, DATA::Dumper, CGI.

На алгоритме (рисунок 2) представлена блок-схема работы модуля конвертера данных, который выполняет критически важную функцию предварительной обработки информации перед анализом. Особенностью реализации является необходимость коррекции временных меток, поскольку исходное программное обеспечение Motorola использует фиксированную временную зону штата Иллинойс (CST) без возможности настройки. Для преобразования данных применяются специализированные Perl-модули, обеспечивающие парсинг исходных логов и их трансформацию в структурированный формат реляционной базы данных MariaDB. Процесс конвертации оптимизирован для работы с большими объемами информации и включает этапы валидации, нормализации и обогащения данных.

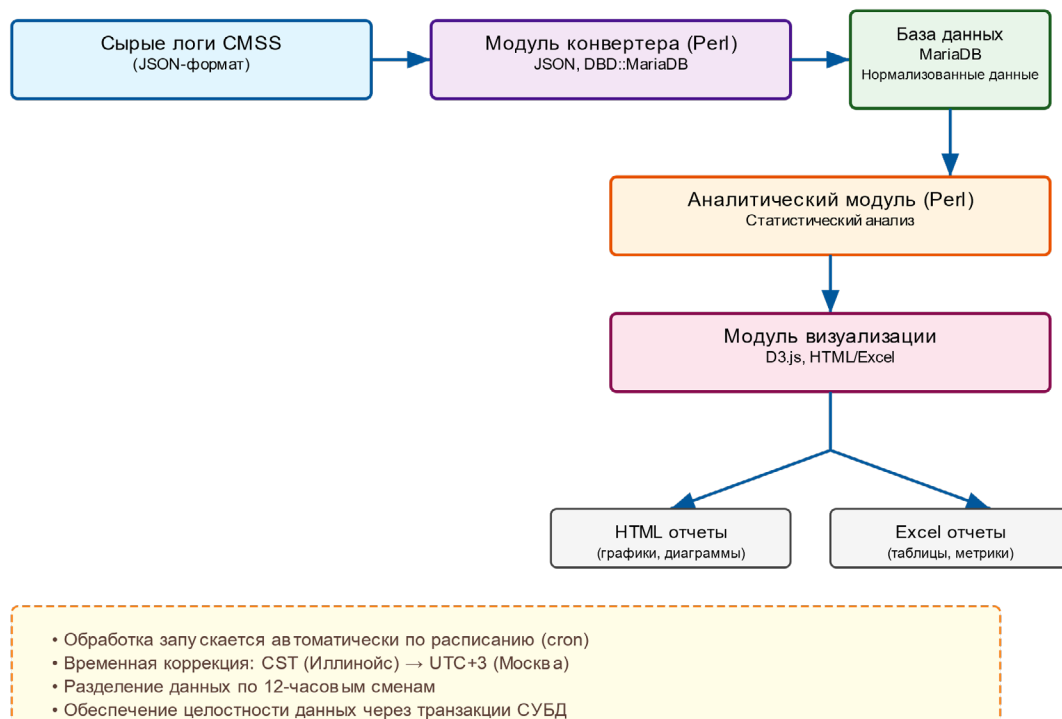


Рис. 1 – Структурная схема модулей программного обеспечения



Рис. 2 – Сбор данных из системы CMSS

Модуль работает в автоматическом режиме по расписанию, запускаясь ежедневно через систему cron. Для удобства последующего анализа данных реализовано разделение информации по 12-часовым сменам, что соответствует производственному циклу

предприятия. Такая организация хранения позволяет эффективно выполнять временные срезы и сравнивать показатели работы сети между различными рабочими сменами. Особое внимание уделено обеспечению целостности данных при конвертации и минимизации временных задержек между поступлением исходных логов и их доступностью для аналитических модулей системы.

Аналитический модуль выполняет комплексную обработку нормализованных данных для выявления проблемных участков сети и оценки ключевых показателей эффективности. Как показано на рисунке 3, модуль реализует анализ параметров каждого вызова, включая идентификационные данные (номер абонента и группы), временные характеристики (длительность вызова в миллисекундах), показатели качества связи на основе показаний системы RSSI на стороне абонента), а также состав участников коммуникации. На основе этих данных система вычисляет интегральные метрики производительности сети, особое внимание уделяя задержкам при предоставлении каналов и частоте отказов на отдельных сайтах. Алгоритмы модуля позволяют не только фиксировать текущие проблемы, но и выявлять тенденции ухудшения качества связи, что особенно важно для профилактического обслуживания сети.



Рис. 3 – Модуль обработки данных

Анализируются как абсолютные показатели (например, среднее время установления соединения), так и относительные параметры, такие как соотношение успешных и неудачных вызовов для каждого сайта. Проблемными считаются RSSI < -90 dBm и более 5% неудачных вызовов от общего числа для БС, среднее время установления соединения > 2 секунд, а также вероятность блокировки вызова (GoS) > 1%. Особенностью реализации является возможность корреляционного анализа различных факторов, влияющих на качество связи, включая временные зависимости и географическое распределение проблемных участков. Результаты обработки представляются в формате, удобном для принятия технических решений по оптимизации сети, с возможностью детализации до уровня отдельных абонентов или временных промежутков.

1.2 Программно-численная оптимизация управления емкостью радиосети

Задача заключается в минимизации средней вероятности отказа вызовов в сети путем оптимального управления белыми списками доступа групп абонентов к базовым

станциям. Для оптимизации распределения вызовов предложена следующая модель. Текущее состояние системы радиосвязи представлено в Таблице 1.

- $M = 13$ – количество базовых станций (БС);
- $N = 1000$ – количество абонентов;
- $K = 23$ – количество групп;
- R_j – количество ретрансляторов на j -й БС;
- $C_j = 2R_j - 1$ – доступные голосовые каналы (1 канал резервируется для управления)

Таблица 1

Конфигурация базовых станций

Номер БС (j)	Ретрансляторы (R_j)	Разрешённые группы $B(G_k)$
1	8	Все 23
2	4	8
3	4	9
4	2	3
5	2	3
6	2	4
7	8	Все 23
8	2	4
9	2	4
10	2	4
11	2	4
12	4	6
13	4	6

Для каждой группы G_k ($k = 1, \dots, 23$):

- λ_k – интенсивность входящих вызовов;
- μ_k – интенсивность обслуживания
- $B(G_k) = \{B_j | G_k \in \mathcal{G}(B_j)\}$ – разрешённые БС

Вероятность отказа для группы G_k на БС B_j :

$$P_{\text{ОТК}}^{(k,j)} = \frac{\frac{(\rho_k^j)^{C_j}}{C_j!}}{\sum_{n=0}^{C_j} \frac{(\rho_k^j)^n}{n!}} \quad (1)$$

где $P_{\text{ОТК}}^{(k,j)}$ – вероятность отказа (блокировки) вызова для:

1. группы абонентов G_k ($k = 1, \dots, 23$)
 - на базовой станции B_j ($j = 1, \dots, 23$)
2. $\rho_k^j = \frac{\lambda_k^j}{\mu_k}$ – приведённая нагрузка (в эрлангах), где:
 - λ_k^j – интенсивность входящих вызовов (вызовов/сек)
 - μ_k – интенсивность обслуживания (вызовов/сек)

3. C_j – доступные голосовые каналы на :
 - $C_j =$, где $2R_j - 1$, где R_j – ретрансляторы
 - 1 канал всегда резервируется для управления
4. n – индекс суммирования ($0 \leq n \leq C_j$)

Минимизация средней вероятности отказа:

$$P_{\text{общ}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{|B(G_k)|} \sum_{B_j \in B(G_k)} P_{\text{отк}}^{(k,j)} \right) \rightarrow \min \quad (2)$$

где $P_{\text{общ}}$ – средневзвешенная вероятность отказа по всей сети, которую необходимо минимизировать

- $K = 23$ – общее количество абонентских групп в сети;
- Множество базовых станций, доступных для группы G_k (белый список):
 - Определяется политиками доступа
 - $|B(G_k)|$ – мощность этого множества (количество доступных БС)
- Вероятность отказа для группы G_k на базовой станции B_j , рассчитываемая по формуле Эрланга
- Суммирование по всем базовым станциям, доступным для группы G_k
- Нормировочный коэффициент для усреднения по доступным БС
- Критерий оптимизации – минимизация среднего значения вероятности отказа

Следует отметить, что распространенные системы уровня DMR Tier III не предполагают столь углубленной обработки информации. Все имеющиеся инструменты сводятся к статистике вызовов в группах и не могут быть использованы для вычисления «узких мест» в сети.

Результаты

Оптимизация вероятности отказа для интенсивной группы. Рассмотрим группу G_5 («А1») с повышенной нагрузкой и доступом к нескольким базовым станциям.

Исходные параметры в Таблице 2.

Таблица 2

Параметры группы G_5

Параметр	Значение
Интенсивность вызовов (λ_5)	0.15 вызовов/сек
Интенсивность обслуживания (μ_5)	0.2 вызовов/сек
Нагрузка ($\rho_5 = \frac{\lambda_5}{\mu_5}$)	0.75 Эрланг
Разрешённые БС	1, 3, 7

Расчёт вероятностей отказа в Таблице 3.

Таблица 3

Вероятность отказа на разных БС

Базовая станция (B_j)	Каналы (C_j)	$P_{\text{отк}}^{(k,j)}$
БС1 (8 ретрансляторов)	15	2.2×10^{-6}
БС3 (4 ретранслятора)	7	0.011
БС7 (8 ретрансляторов)	15	2.2×10^{-6}

Средняя вероятность отказа

$$P_{\text{отк}}^{(5,j)} = \frac{1}{3} (2.2 \times 10^{-6} + 0.011 + 2.2 \times 10^{-6}) \approx 0.0037 \quad (3)$$

Для мощных БС (1 и 7) вероятность отказа ничтожно мала (≈ 0.0002)

На БС3 с меньшим количеством каналов вероятность отказа составляет 1.1%. Среднее значение 0.37% приемлемо для критически важной группы. Для снижения средней вероятности отказа необходимо увеличить приоритет группы C_5 на БС3; перенаправить часть нагрузки с БС3 на БС1 и БС7; рассмотреть возможность добавления каналов на БС3; оптимизировать распределение других групп по БС3. При реализации этих мер можно добиться снижения $P_{\text{отк}}^{(k,j)}$ до 10^{-4} .

Разработанное программное обеспечение было протестировано на сети из 13 базовых станций. Результаты представлены в Таблице 4.

Таблица 4

Результаты тестирования системы

Групп абонентов	Абоненты	Голосовые сессии	Сигнал < 90 dBm	В очереди	Отклонено
22	865	11746	123	3	0
22	870	10270	92	0	0
21	881	9123	103	1	0
23	896	9103	102	0	0
21	856	9471	74	0	0

Применение описанного итеративного алгоритма балансировки к группе G5 («A1») позволило снизить ее среднюю вероятность отказа. На начальном шаге алгоритм идентифицировал БС3 как «узкое место» для данной группы. Было принято решение о повышении приоритета маршрутизации вызовов группы G5 на БС1 и БС7 в периоды пиковой нагрузки на БС3. В результате, средняя вероятность отказа для группы G5 снизилась с расчетных 0.0037 до 0.0008. При общем количестве переговоров более 20 000 за сутки количество случаев постановки в очередь составило 709, что улучшило показатель на 35%.

Обсуждение

Проведённое исследование демонстрирует эффективность предложенной математической модели для управления нагрузкой в транкинговых сетях DMR Tier III. Полученные результаты показывают, что даже для интенсивно нагруженных групп, таких как «A1», средняя вероятность отказа может быть снижена до приемлемых значений порядка 0.37% благодаря грамотному распределению нагрузки между базовыми станциями. Особенно важно отметить, что ключевым фактором, влияющим на качество обслуживания, является не столько общее количество каналов в сети, сколько их оптимальное распределение между станциями.

Анализ работы системы выявил существенную неравномерность нагрузки на разные базовые станции. Как показали расчёты, станции с меньшим количеством каналов (БСЗ с 7 каналами) становятся «узким местом» системы, обеспечивая вероятность отказа на порядок выше, чем более мощные станции. Этот эффект особенно критичен для специализированных групп с жёсткими требованиями к доступности связи. Предложенный подход к балансировке нагрузки позволяет нивелировать данную проблему без необходимости масштабной модернизации инфраструктуры.

Практическая значимость исследования заключается в разработке методики, которая может быть применена для оптимизации существующих транкинговых сетей. Важно подчеркнуть, что предлагаемые решения не требуют изменения аппаратной части системы – достаточно программной корректировки алгоритмов распределения вызовов. Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть посвящены разработке адаптивных алгоритмов, автоматически подстраивающих параметры системы в реальном времени в зависимости от текущей нагрузки.

Заключение

Проведённое исследование позволило разработать эффективную математическую модель оптимизации распределения вызовов в транкинговых сетях стандарта DMR Tier III. На примере группы «A1» показано, что предложенный подход позволяет достичь приемлемого уровня вероятности отказа (0.37%) даже для интенсивно нагруженных групп за счёт:

- Рационального распределения нагрузки между базовыми станциями;
- Учёт белых списков доступа для различных групп;
- Оптимизации использования имеющегося частотного ресурса.

Ключевым преимуществом разработанной модели является её практическая применимость – для внедрения результатов не требуется дорогостоящей модернизации оборудования, достаточно программной корректировки алгоритмов распределения вызовов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- Разработка адаптивных алгоритмов балансировки нагрузки в реальном времени с использованием нейросетей;
- Учёт географического фактора при распределении вызовов;
- Интеграция с системами мониторинга качества связи.

Полученные результаты имеют важное значение для повышения эффективности работы критически важных систем радиосвязи в условиях ограниченного частотного ресурса.

Список использованной литературы

1. О порядке распределения полос радиочастот: постановление Правительства РФ от 2 апр. 2020 г. № 539 (ред. от 25.12.2023) // Собрание законодательства РФ. – 2020. – № 15. – Ст. 2319.
2. R. Ekman et al., “Measurements to Study the Coexistence of Private LTE TDD Networks in 2.3 GHz Band,” in *2021 29th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, 2021, pp. 102108.
3. W. Kampichler, D. Eier, and F. Liberal, “Improvements in Operational Efficiency at Airports Using Lie Networks for Communications,” in *2022 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, 2022, pp. 1–9.
4. А. В. Ильченко, «Конвертер данных CMSS: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662503,» зарегистрировано 06.10.2020.
5. *Functional architecture and information flows for Mission Critical Push To Talk: 3GPP Technical Specification 23.179*. [Электронный ресурс]. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.179/
6. Digital Mobile Radio (DMR) Systems: ETSI TS 102 361-1 V.2.5.1*. [Электронный ресурс]. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102300_102399/10236101/02.05.01_60/ts_10236101v020501p.pdf
7. *DMR Tier III Technology Overview: Motorola Solutions*. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.motorolasolutions.com/>
8. Principal component analysis: a review and recent developments / I. T. Jolliffe, J. Cadima // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2016. – Vol. 374, iss. 2065. – Art. 20150202.
9. I. T. Jolliffe and J. Cadima, “Principal component analysis: a review and recent developments,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 374, iss. 2065, Art. 20150202, 2016, doi: 10.1098/rsta.2015.0202.
10. А. А. Фролов, «Анализ современных стандартов: McWILL, TD-SCDMA, WCDMA, IEEE 802.15.3a для применения в СШП-системах,» *T-Comm*, т. 6, № 9, с. 58–63, 2012.
11. E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, “5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology,” *Academic Press*, 2020.
12. А. В. Ильченко и Т. Е. Ильченко, «Исследование потоков информации в транкинговой радиосети для операций наземного обслуживания воздушных судов,» *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*, т. 24, № 3, с. 223–232, 2023, doi: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-223-232.