

На правах рукописи



**Насир Самах Аббас Хассан**

**Разработка и исследование модели каналов линий связи  
космический аппарат-Земля при пыльных бурях**

Специальность: 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Владимир – 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" - (ВлГУ) на кафедре радиотехники и радиосистем.

Научный руководитель: **Самойлов Александр Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиотехники и радиосистем ВлГУ, г. Владимир.

Официальные оппоненты: **Ямпурин Николай Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Конструирование и технология РЭС, «Нижегородский государственный технической университет им. Р.Е. Алексеева», г. Н. Новгород.

**Рябокоть Алексей Владимирович**, кандидат технических наук инженер 1-й категории, «Владимирское конструкторское бюро радиосвязи», г. Владимир.

Ведущая организация: **Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова**, г. Ярославль.

Защита состоится 27 мая 2022 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.2.281.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых", по адресу: г. Владимир, пр. Строителей, д. 3/7, корпус 3 ВлГУ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ по адресу г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87 ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01. Тел. (4922) 534238, E-mail: [ags@vlsu.ru](mailto:ags@vlsu.ru).

Автореферат разослан 24 марта 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.281.01  
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Радиосвязь, телевидение и радиовещание, осуществляемые с помощью искусственных спутников Земли, широко вошли в нашу жизнь. Организованная впервые 60 лет назад спутниковая связь активно развивалась и к настоящему времени стала ядром глобальных сетей передачи информации. С развитием спутниковой связи стали усложняться и требования к качеству передачи информации, которое во многом зависит от свойств используемых радиоканалов.

Радиоканалы от наземных станций до спутниковых ретрансляторов можно разделить на два вида - при подъеме информации на спутник и при передаче ее на Землю. С каналами подъема информационных потоков на спутники забот меньше, так как они обеспечены мощной энергетикой наземных передающих станций. А при описании радиоканалов от космического аппарата (КА) до наземных станций накопилось много проблем.

На заре рождения вычислительной техники было понятно желание наиболее простого аналитического описания интерференционных замираний в спутниковых радиоканалах. И их стали описывать релеевским законом распределения вероятностей. Это породило проблему, так как релеевские замирания по экспериментальным данным большинства исследователей наблюдаются не чаще 60% времени сеансов связи, а более глубокие замирания, например, с учеченно-нормальным законом распределения вероятностей оказались не учтенными. При современном развитии вычислительной техники уже можно перейти к более точному многопараметрическому описанию замираний в радиоканалах.

Другая проблема вызвана тем, что большинство экспериментальных исследований проводились в Америке и в Европе. Поэтому для регионов с сезонными ливневыми дождями потребовалась дополнительные рекомендации Международного союза электросвязи по модификации описания радиоканалов для учета непрерывного влияния гидрометеоров на распространяющиеся радиосигналы. Но некоторые природные явления оказались совсем не учтенными, например, пыльные бури. Пыльные бури исключительно неблагоприятное природное явление, влияющее негативно на здоровье людей и общую экологическую обстановку. Засорение атмосферы приводит к большому числу отрицательных факторов, в том числе к снижению оптической видимости и к затуханию распространяющихся в атмосфере радиоволн.

В Рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ или ITU) сказано, что влияние пыльных бурь на распространение радиосигналов пока не изучено. Цитата из рекомендаций МСЭ: "О влиянии песчаных и пылевых бурь на радиосигналы на наклонных трассах известно очень мало. Имеющиеся данные показывают, что на частотах ниже 30 ГГц только высокая концентрация частиц и/или высокая влажность могут оказать значительное влияние на распространение радиоволн".

Проблема по учету влияния на распространяющиеся радиосигналы пыльных и песчаных бурь, нередких в странах с засушливым резко континентальным климатом, например, в Ираке, пока не решена. Исследование пыльных и песчаных бурь и учет их влияния при проектировании систем спутниковой связи могут дать дополнительные возможности для повышения качества передачи информации по спутниковым радиоканалам. Это и определяет актуальность темы исследования.

**Степень разработанности темы.** В области описания спутниковых радиоканалов сделано очень много. Известно большое количество работ ученых, еще в прошлом веке, на основе обширных экспериментальных исследований, решавших задачи корректного описания и расчета радиолиний спутниковой связи. В их числе Фортушенко А.Д., Кукк К.И., Зубарев Ю.Б., Бородич С.В., Кантор Л.Я., Ямпольский В.Г., Бродский М.В, Цейтлин М.З., Капланов М.П., Самойлов А.Г., Chepil W.S., Woodruff N.P., Musa A., Bashir S.O., Paul B.S., Ahmed A.S., Gillette D.A., Patterson E.M., Qun-Feng Dong, Li-Xin Guo, Ying- Li, Hui Zhang, Ming-Jun Wang и другие. Однако основанное на экспериментальных исследованиях описание спутниковых радиоканалов не охватывает все возможные природные явления, в том числе пыльные и песчаные бури.

В соответствии с программой ООН по окружающей среде в 2007 году была создана Система по обнаружению и предупреждению о песчаных и пыльных бурь (SDS-WAS). Система SDS-WAS имеет несколько региональных узлов:

- Северная Африка, Ближний Восток и Европа, координируются Региональным центром в Барселоне, Испания, размещенным в Государственном метеорологическом агентстве (AEMET) и Барселонским суперкомпьютерным центром (BSC);
- Азия, координируется Региональным центром в Пекине, Китай, который находится в ведении Китайской метеорологической администрации (CMA);
- Третий центр, размещен в Карибском институте метеорологии и гидрологии (CIMH) на Барбадосе.

Решению задач по изучению и прогнозу пыльных бурь помогают и государственные гидрометеорологические структуры, такие, например, как Республиканская гидрометеорологическая служба Сербии, Китайская академия метеорологических наук, Иракская метеорологическая организация, Гидрометеорологическая служба России и другие.

Растущие требования к качеству передачи информации и нерешенные пока проблемы по полному описанию спутниковых радиоканалов создают противоречие, которое и определило цель и задачи настоящего исследования.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является исследование спутниковых радиоканалов и разработка модели влияния пыльных и песчаных бурь на спутниковую радиосвязь на основе анализа пыльных бурь, проходивших в разных провинциях Ирака в 2016 - 2020 годах.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поочередно решены следующие задачи:

- выполнен анализ радиоканалов «космический аппарат – земная станция» для спутников, работающих на околоземных, геостационарных и высокоэллиптических орбитах;
- исследованы особенности прохождения радиосигналов через радиационные пояса Земли, ионосферу и атмосферу;
- модифицирована математическая модель передаточной функции радиоканалов спутниковой радиосвязи для учета многопараметрической зависимости интерференционных замираний;
- исследовано влияние высоты пыльных образований и угла места антенн на затухание радиосигнала из-за песчаных и пыльных бурь;
- предложена аналитическая модель влияния пыльных и песчаных бурь на затухание сигналов спутниковой радиосвязи;
- оценено влияние пыльных бурь на передачу информации по радиолиниям КА-земные станции в различных частотных диапазонах.

**Объект диссертационного исследования.** Объектом исследования являются линии радиосвязи спутник - земные станции, работающие в условиях жаркого резко континентального климата.

**Предмет исследования.** Предметом исследования является модель влияния пыльных и песчаных бурь на затухание сигналов спутниковой радиосвязи.

**Научная новизна** достигнутых результатов состоит в следующем:

- предложена классификация пыльных бурь, основанная на экспериментальных данных по наблюдению этих явлений в Ираке за 2016 - 2020 годы, позволяющая дифференцировано учитывать влияние поднимающейся пыли, пылевых и песчаных бурь на радиосвязь;

- предложен критерий оптической видимости для учета влияния пыльных образований на качество передачи радиосигналов по линиям связи;

- на основе собранных в Ираке экспериментальных данных получены аналитические выражения и создана математическая модель передаточной функции линий спутниковой связи с Землей, учитывающая возможные потери энергопотенциала в пыльных бурях;

- предложена инженерная методика и алгоритм расчета влияния пыльных бурь на ослабление передаточных функций радиоканалов КА- земные станции;

**Практическая значимость исследования:**

- определены зависимости затухания сигналов на линиях спутниковой связи КА – земная станция из-за атмосферных газов, угла места приемных антенн, наличия гидрометеоров и видимости при пыльных бурях;

- определено влияние высоты пыльной бури на видимость;

- найдена взаимосвязь концентрации пыли и видимости с затуханием передаточной функции радиоканалов КА- земные станции;

- предложены рекомендации по предотвращению длительных перерывов связи во время пыльных бурь при видимости менее 5 метров, заключающиеся в необходимости добавления энергетике до 7 дБ:

- предложено компенсировать затухание из-за пыльных бурь путем подключения резервных приемных комплексов и использования алгоритмов сложения разнесенных сигналов.

- практическая значимость и полезность полученных результатов подтверждается актом внедрения результатов работы при разработке линий связи "Иракской службой по метеорологии и сейсмологии".

**Методологические и теоретические основы исследования.** Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы статистической теории связи, теории передачи дискретных сообщений, теории вероятностей и математической статистики, методы численного моделирования с помощью МАТЛАБ.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Затухание сигналов на линии связи КА-Земля увеличивается при уменьшении видимости во время поднимающейся пыли и пыльных бурь.
2. Рост частоты приводит к увеличению общего затухания, в том числе и затухания из-за пыльных бурь.
3. При уменьшении угла места антенн затухание растет при той же высоте пыльной бури.
4. Затухание сигналов в пыльных бурях растет экспоненциально при уменьшении видимости менее 50 метров.
5. На частотах Ка диапазона при видимости 5 метров и высоте бури 4 км затухание превышает 6 дБ, что может приводить к длительной потере связи.

### **Степень достоверности и апробация полученных результатов.**

Исследование основано на экспериментальных данных, полученных в различных регионах Ирака в 2016-2020 годах. Достоверность результатов диссертации подтверждается корректным использованием математического аппарата, результатами моделирования, публикациями результатов в известных рецензируемых журналах, не противоречием с результатами других исследователей, а также обсуждением на конференциях и семинарах. Достоверность подтверждается внедрением результатов в Ираке и в России, что подтверждается соответствующими актами.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях: "Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии", Владимир; "Systems of signals generating and processing in the field of on board communications", Moscow; "Физика, техника и технологии сложных систем", Ярославль; "International Scientific Conference " CAMSTech-2020", "Advanced Technologies in Aerospace", "Engineering and Automation", Krasnoyarsk; IEEE № 51389, Moscow; "Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем", Серпухов; "Перспективные технологии в средствах передачи информации", Владимир.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них: 4 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России [1-4], 6 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных [5-10], 7 - в материалах научных конференций [11-17], 1-свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Соответствие специальности.** Содержание диссертации соответствует пунктам 12 и 14 паспорта специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

**Личный вклад автора.** Основные результаты выполненного исследования получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, автор лично ставил и решал задачи, проводил анализ литературы, выполнял имитационное моделирование и обобщил полученные результаты.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, списка литературы из 111 источников и 4 приложений. Общий объем диссертационной работы 169 страниц, из них основного текста 154 страницы, в том числе рисунков 61, таблиц 11.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационного исследования с освещением текущего состояния проблемы в области обработки сигналов, прошедших многолучевые радиоканалы. Сформулирована научная проблема, определены цели и задачи исследования, её объект и предмет, методическая база, научная новизна и практическое значение, определены результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ радиоканалов линий связи между космическими аппаратами (КА) и земными станциями (ЗС) для низкоорбитальных, геостационарных и высокоэллиптических спутников. В зависимости от используемых диапазонов частот определены выражения для оценки:

- затухания сигналов в свободном пространстве с учетом угла места антенн ЗС;
- ослабление сигналов в газах атмосферы;
- потери из-за гидрометеоров.

Доказано, что методика расчета энергопотенциала линий связи (ЛС) между КА и ЗС нуждается в коррекции, чтобы учесть такие природные явления, как пыльные и песчаные бури и наблюдаемые на практике более глубокие по сравнению с релеевскими замирания сигналов.

Результаты первой главы были опубликованы в работах автора [1-3, 5].

**Во второй главе** исследованы особенности прохождения радиосигналов через радиационные пояса Земли, ионосферу и атмосферу. Показано, что затухание сигналов на линиях связи КА-ЗС имеет детерминированную и



стохастическую составляющие. Детерминированная составляющая ослабления сигналов определяется протяженностью линии связи и используемыми частотами, а переменная составляющая в основном зависит от состояния атмосферы и наличия в ней гидрометеоров и пыльных образований. Причем газы атмосферы, гидрометеоры, пыльные и песчаные бури, флуктуации в ионосфере и радиационные пояса Земли вносят по сравнению с ослаблением в свободном пространстве меньшее ослабление сигнала. Однако именно флуктуирующее затухание сложнее учесть при расчетах линий связи, а возникающие погрешности приводят к ошибкам при передаче информации.

В Рекомендациях МСЭ отмечается, что засорение атмосферы пыльными образованиями ослабляет радиосигналы, но затухание, вносимое пыльными бурями изучено пока недостаточно. Для учета влияния пыльных бурь на передаточную функцию радиоканалов КА-ЗС выполнен анализ характеристик пыльных бурь, наблюдавшихся в Ираке в 2016-2020 гг. , как показано на рис.1.

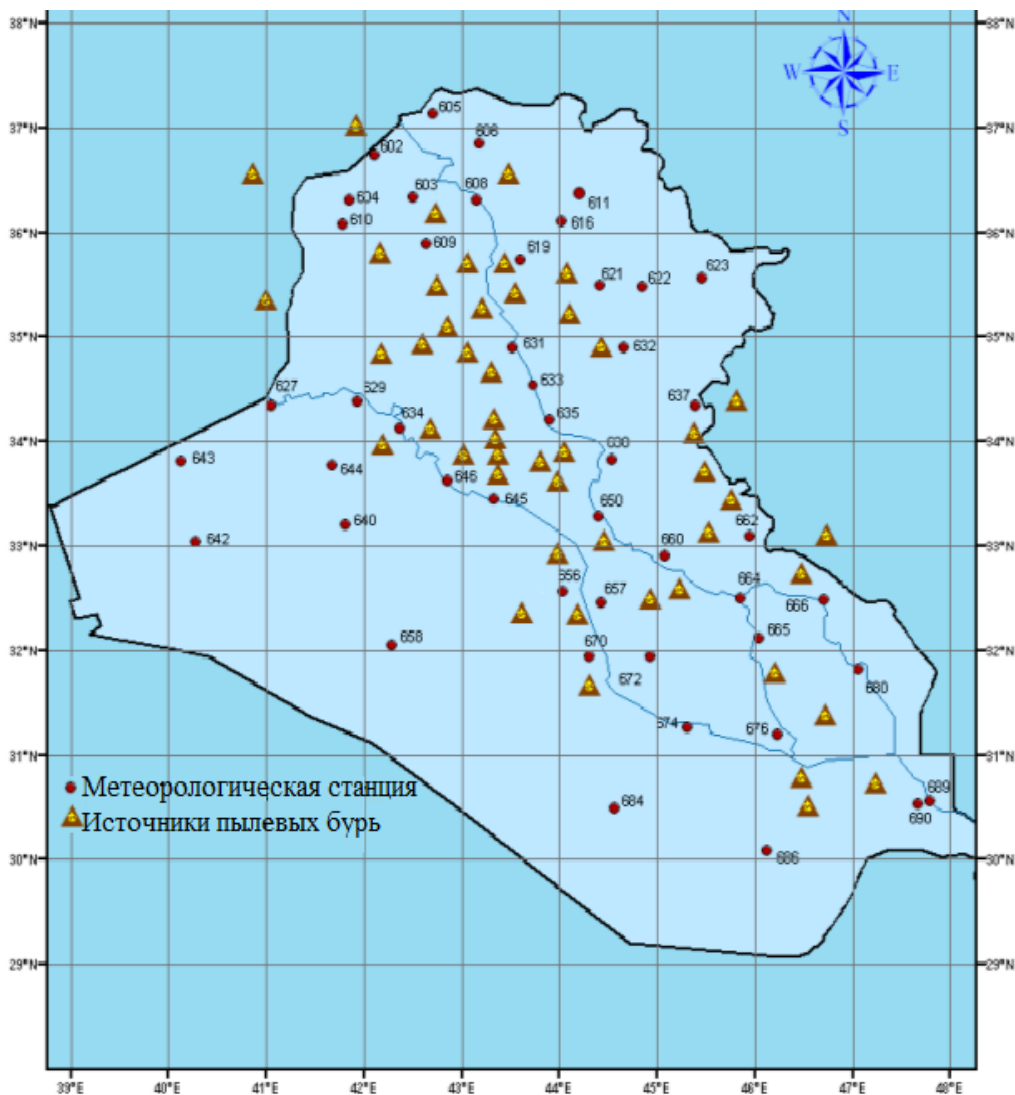


Рис.1. Источники пыльных бурь в Ираке

Около 40 % аэрозолей в атмосфере Земли являются частицами пыли от ветровой эрозии. Основными источниками этой минеральной пыли являются засушливые районы Северной Африки, Аравийского полуострова, Центральной Азии и Китая. Пыль поднимается в атмосферу за счет турбулентного перемешивания воздуха и конвективных восходящих потоков. Затем под действием ветра пылевые облака переносятся на большие расстояния, в зависимости от их размера и метеорологических условий.

Пыльные бури различаются по плотности, размерам, интенсивности, высоте и расстоянию, которое они преодолевают. Переносимые ветром пыльные бури могут преодолевать тысячи километров, перемещаясь по континентам. Пыль различается по составу и плотности в зависимости от происхождения и скорости несущих ее ветров. Поэтому классифицировать пыльные бури можно по различным критериям, таким как плотность пыли, скорость перемещения, интенсивность, средние размеры частиц пыли и др. В качестве основного критерия в работе предложено использовать оптическую видимость, измеряемую на фиксированной высоте  $V_0 = 1,8$  м.

В результате проведенного анализа предложена классификация пыльных бурь на четыре категории: взвешенная пыль, поднимающаяся пыль, пыльная буря и песчаная буря. Предложенная классификация позволяет дифференцированно учитывать ослабление радиосигналов из-за влияния пылевых и песчаных бурь на радиосвязь.

Таблица 1. Классификация пыльных бурь

Наименование категории	Видимость, $V_0$ , км	Скорость ветра, $V_B$ , м/с	Высота, $h_1$ , км
Взвешенная пыль	$1 < V_0 < 6$	$V_B < 4$	$h_1 < 5,5$
Поднимающаяся пыль	$V_0 > 1$	$4 < V_B < 7$	$h_1 < 5,5$
Песчаная буря	$V_0 < 1$	$V_B > 7$	$h_1 < 0,05$
Пыльная буря	$V_0 < 1$	$V_B > 7$	$h_1 < 6$

Поднимающаяся пыль, показанная на рис. 2 в), это начало пылевых бурь, когда частицы пыли поднимаются под влиянием умеренных ветров, скорость которых находится в пределах 4-7 м/с, а горизонтальный диапазон видимости превышает 1 км ( $V_0 > 1$  км,  $h$  примерно до 1 - 3 км над поверхностью Земли). При такой скорости ветра пыль не переносится на большие расстояния, но подняться может на высоту в несколько километров



а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Надвигающиеся пыльная а) и песчаная б) бури, поднимающаяся в) и взвешенная г) пыль.

Взвешенная пыль, показанная на рис. 2 г), это предпоследняя стадия пылевых бурь и восходящих пылевых явлений. Частицы пыли остаются зависшими после затишья ветра и медленно оседают под влиянием гравитации Земли. Чем дальше шторм от начала градиента давления, тем ниже скорость ветра, а так как пылевые частицы характеризуются небольшими размерами и малым весом, то даже малая скорость ветра может переносить частицы пыли и удерживать их в воздухе в течение длительного времени (1 - 15 часов).

Поднимающаяся пыль, показанная на рис. 2 в), это начало пылевых бурь, когда частицы пыли поднимаются под влиянием умеренных ветров, скорость которых находится в пределах 4-7 м/с, а горизонтальный диапазон видимости превышает 1 км ( $V_0 > 1$  км,  $h$  примерно до 1 - 3 км над поверхностью Земли). При такой скорости ветра пыль не переносится на большие расстояния, но подняться может на высоту в несколько километров.

На основании рассмотрения изменения концентрации пыли с высотой определена зависимость видимости от высоты, которая получена в результате многочисленных экспериментов, выполненных различными исследователями в разных регионах мира. Эмпирическое уравнение имеет следующий вид.

$$V = V_0 \left[ \frac{h}{h_0} \right]^{0.26} \quad (5)$$

где:  $V$  - видимость (км) на высоте  $h$  (км), связанная с эталонной видимостью  $V_0$  (км) на эталонной высоте  $h_0$  (км).

Результаты второй главы были опубликованы в [ 4, 14 - 17 ].

**Третья глава** работы посвящена разработке математической модели передаточной функции каналов спутниковой радиосвязи. Для решения этой задачи выполнен анализ и определено ослабление передаточной функции радиоканала линий связи КА-ЗС. При этом учтены потери сигнала при распространении в свободном пространстве, затухание сигналов в атмосферных газах с учетом угла места приемных антенн, потери из-за многолучевости, наличия гидрометеоров и ослабление сигналов в пыльных бурях.

Потери сигнала в свободном пространстве, в атмосферных газах и из-за гидрометеоров определены для разных частотных диапазонов спутниковой связи (СС) для низкоорбитальных, навигационных и геостационарных орбит спутниковой связи по известным выражениям и методикам. Например, на рис. 3 приведены расчеты потерь в свободном пространстве для низкоорбитальных КА, работающих в разных частотных диапазонах, на рис. 4 потери в сухом воздухе Ирака, а на рис. 5 приведены погонные потери в газах атмосферы.

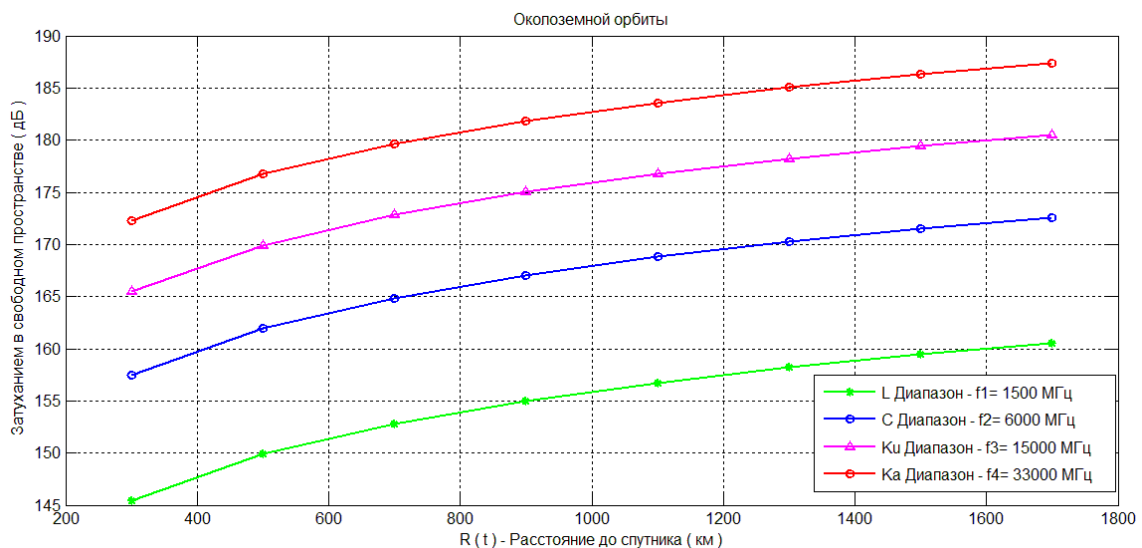


Рис. 3. Ослабление сигналов низкоорбитальных КА в свободном пространстве

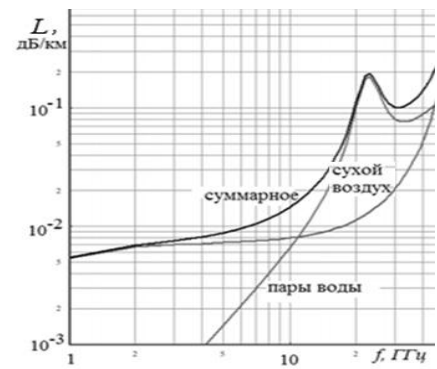
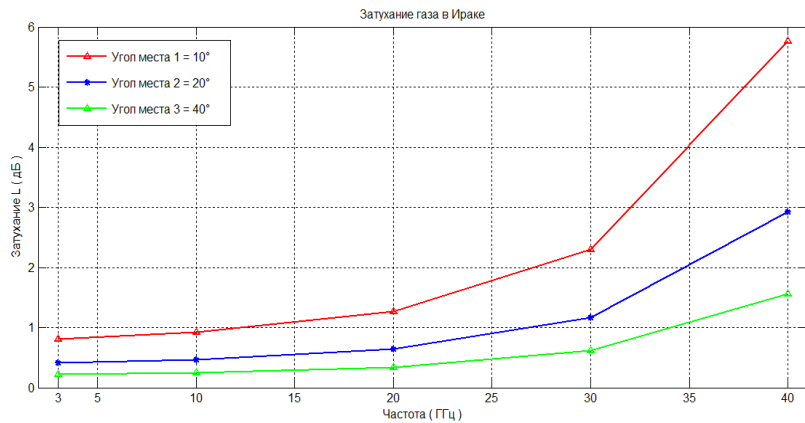


Рис.4. Погонные потери сигнала в воздухе Ирака. Рис.5. Потери с учетом влаги.

Когда сигнал проходит по радиоканалу, амплитуда и фаза радиосигнала умножаются на изменяющийся во времени комплексный коэффициент, который называется передаточной функцией радиоканала. Некоторые параметры радиоканала не случайны, а некоторые изменяются по случайным законам. Поэтому математическая модель передаточной функции спутникового радиоканала может быть представлена суммой детерминированной и случайной составляющих. Детерминированные компоненты передаточной функции включают в себя затухание сигнала при его распространении в свободном пространстве, потери в газах атмосферы. Доплеровские сдвиги частоты в радиоканалах с быстро движущимися низкоорбитальными спутниками тоже не случайны. Затухание из-за присутствия гидрометеоров, затухание во время пыльных и песчаных бурь представляют собой редкие и не регулярные случайные процессы. Однако экспериментальные исследования этих процессов выявили закономерности их влияния на радиосигналы, позволяющие описать их детерминированными выражениями, зависящими от параметров этих процессов.

Многолучевость, возникающая из-за слоистости и турбулентности атмосферы, приводит к случайным интерференционным замираниям принимаемых радиосигналов. Замирания, описываемые распределением Релея неоднократно наблюдалось на радиолиниях, работающих в разных частотных диапазонах, в среднем в 60% времени сеансов связи. Поэтому такое описание замираний широко используется в математических моделях радиоканалов. Однако к операторам связи нередко возникали претензии из-за наличия ошибок при передаче информации, что потребовало описания более глубоких замираний.

Модель передаточной функции многолучевых радиоканалов с более глубокими замираниями по сравнению с распределением Релея была предложена

Накагами, но она была слишком сложной для практического использования. Кловским Д.Д. была предложена более простая четырехпараметрическая модель замирания [90], которая оказалась более удобной для практического использования. Использование при описании многолучевых радиоканалов четырехпараметрического закона распределения вероятностей позволяет учитывать более глубокие по сравнению с релеевским описанием замирания, не редко наблюдающиеся на многолучевых линиях связи. Плотность распределения амплитуд четырехпараметрического закона имеет вид:

$$w(H) = \frac{H}{\sigma_X \sigma_Y} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_X^2} - \frac{m_X^2 \sigma_Y^2 + m_Y^2 \sigma_X^2}{2\sigma_X^2 \sigma_Y^2}\right) \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{g=0}^{\infty} \frac{(2l+2g-1)! (\sigma_Y^2 - \sigma_X^2)^l m_Y^{2g} \sigma_X^{2g}}{l!(2g)! 2^l \sigma_Y^{2l+4g} m_X^{l+g}} \times$$

$$\times H^{l+g} I_{l+g}\left(H \frac{m_X}{\sigma_X}\right)$$

$$\text{и фазы } w(\phi) = \frac{\sigma_X \sigma_Y \exp\left(\frac{m_X^2}{2\sigma_X^2} - \frac{m_Y^2}{2\sigma_Y^2}\right)}{2\pi(\sigma_Y^2 \cos^2 \phi + \sigma_X^2 \sin^2 \phi)} [1 + L[1 + F(\sqrt{2L})]\sqrt{\pi} \exp(L^2)],$$

где  $L = \frac{m_X \sigma_Y^2 \cos \phi + m_Y \sigma_X^2 \sin \phi}{\sigma_X \sigma_Y \sqrt{\sigma_Y^2 \cos^2 \phi + \sigma_X^2 \sin^2 \phi}}$ ;  $H$  - модуль передаточной функции канала

связи;  $I_{l+g}(\cdot)$  - модифицированная функция Бесселя порядка  $l+g$ ;  $m_X, m_Y, \sigma_X, \sigma_Y$  - параметры распределения,  $F(\cdot)$  - интеграл вероятности.

Четырехпараметрическая модель передаточной функции радиоканала включает в себя множество частных случаев распределений и при различных условиях выражение (6) вырождается в более простое, при  $\sigma_X = \sigma_Y = \sigma$  в распределение Рэлея:

$$w(H) = \frac{H}{\sigma^2} \exp\left[\frac{-H^2}{2\sigma^2}\right].$$

При  $\sigma_X$  или  $\sigma_Y$  равных нулю четырехпараметрический закон распределения вероятностей преобразуется в усеченно-нормальное распределение:

$$w(H) = \left( \frac{\sqrt{2}}{\sigma_{x,y} \sqrt{\pi}} \right) \exp \left( -\frac{H^2}{2\sigma_{x,y}^2} \right). \quad (9)$$

Усеченно-нормальное распределение отличается самой высокой плотностью амплитуды, что и приводит к наиболее глубоким замираниям огибающей радиосигнала и к большей вероятности ошибок по сравнению с распределением Релея.

Если  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$  и  $m_x = m_y \neq 0$  уравнение (6) вырождается в обобщенное распределение вероятностей Рэлея:

$$w(H) = \left( \frac{H}{\sigma^2} \right) \exp \left( -\frac{H^2 + m_x^2}{2\sigma^2} \right) I_0 \left( m_x \frac{H}{\sigma^2} \right), \quad (10)$$

где:  $I_0(\cdot)$  - это модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

При  $m_x = m_y \neq 0$  уравнение (6) вырождается в подрелеевское распределение:

$$w(H) = \frac{H}{\sigma_x \sigma_y} \exp \left[ -\frac{H^2}{4} \left( \frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \right] I_0 \left[ \frac{H^2}{4} \left( \frac{1}{\sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \right], \quad (11)$$

Объединяя детерминированные и случайные ослабления сигналов можно математическую модель передаточной функции радиоканалов на линиях спутниковой связи с Землей, объединяющую возможные потери при передаче информации на таких линиях связи описать следующим выражением:

$$B = b_{fs} + b_{atm} + b_{rain} + b_{d,s}, \quad [\text{дБ}], \quad (12)$$

где:  $b_{fs} = 92,45 + 20\lg(R) + 20\lg(f)$  – затухание в свободном пространстве;  $R$  – расстояние от КА до ЗС, км;  $f$  – радиочастота, ГГц;  $b_{atm}$  – потери в атмосферных газах;  $b_{rain}$  – затухание из-за дождей и других гидрометеоров;  $b_{d,s}$  – затухание в пылевых и песчаных бурях.

Затухание, вносимое пыльными и песчаными бурями изучено пока недостаточно. Исследование этого направления проведем на основании собранного экспериментального материала о параметрах прошедших в 2016-2020

гг. пыльных бурь в Ираке. При этом требуется решить много разноплановых задач, начиная от разработки критерия для оценки пыльных бурь и заканчивая методикой расчета затухания радиосигналов в пыльных бурях и рекомендациями по компенсации таких затуханий передаточной функции.

Результаты третьей главы были опубликованы в работах [2, 4, 6-10].

**В четвертой главе** проведено исследование затухания радиосигналов в каналах спутниковой связи из-за пыльных бурь, разработан алгоритм расчета затуханий сигнала во время пыльных бурь, определены условия срыва связи из-за них, выполнено моделирование и рассчитано затухание сигналов в пыльных бурях для различных условий и частотных диапазонов.

Используем в качестве основного критерия, характеризующего свойства пыльных бурь, показатель оптической видимости  $V$ , измеряемой на опорной высоте  $h_0$ . Следует отметить, что видимость зависит от концентрации пыли в атмосфере, а концентрация зависит от высоты, так как крупные частицы пыли быстрее притягиваются к поверхности Земли. Эти зависимости были изучены и автором получено эмпирическое соотношение, связывающим затухание в пыльной буре высотой  $h$  с эталонной видимостью на опорной высоте в виде выражения

$$A_m = 0,578 \times 10^{-3} \frac{f h^{0,72}}{V_0^\gamma \sin \theta} \operatorname{Im} \left( \frac{\varepsilon_m - 1}{\varepsilon_m - 2} \right), \quad [\text{дБ}] \quad (13)$$

где:  $f$  - рабочая частота (ГГц);  $\gamma$  - безразмерная постоянная, зависящая от состава пыли в пыльной буре и климатических условий (для Ирака  $\gamma = 1,07$ ); видимость  $V_0$  (км) на эталонной высоте  $h_0 = 0,0015$  км.;  $\varepsilon_m$  - комплексная диэлектрическая проницаемость частиц сухой пыли;  $\theta$  - угол места антенны наземной станции.

На основании выведенного уравнения (13) разработан алгоритм и реализующая его программа на ЭВМ [18] и была проведена серия расчетов, показывающих зависимость затухания сигналов в пыльных бурях от видимости, высоты пыльных бурь, рабочей частоты и угла места антенн ЗС. Были выполнены расчеты по оценке затухания сигналов в пыльных бурях, случившихся в различных городах и районах Ирака в 2016 - 2020 годах. Предложенный алгоритм расчета затухания сигналов позволил оценить взаимосвязь затухания не только с видимостью, а и с высотой пыльной бури, рабочей частотой линии связи. Выполненные расчеты показали, что затухание может составлять несколько

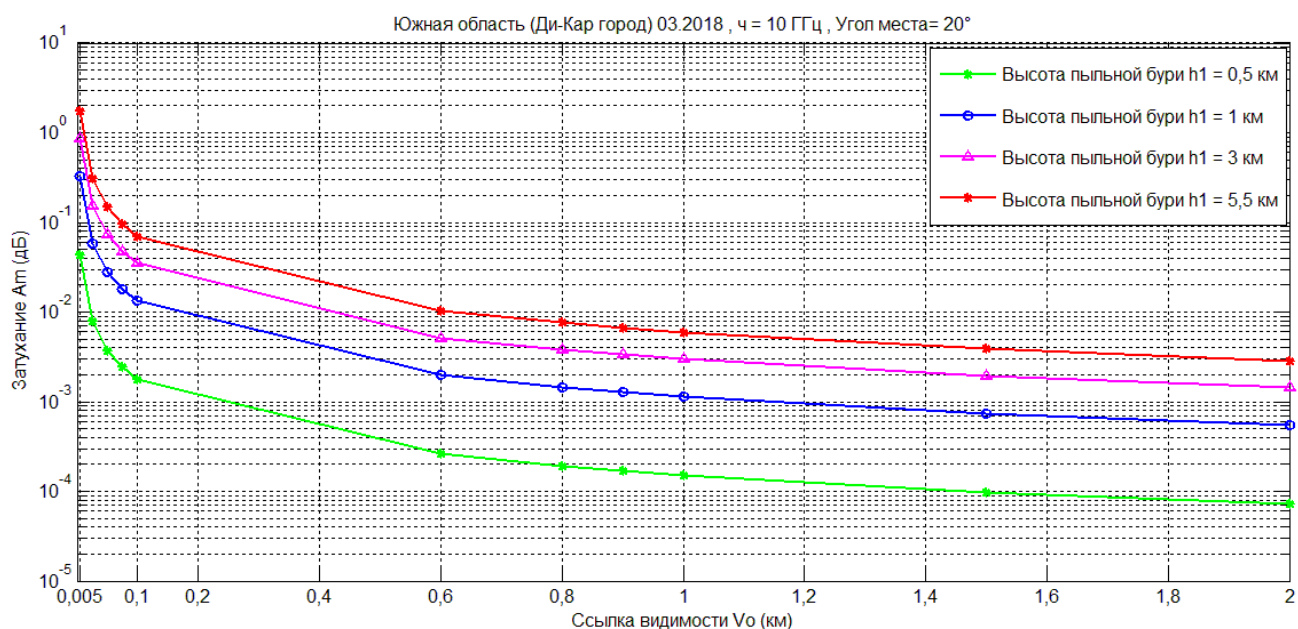


децибел, как, например, показано в таблице 2, что может вызвать дополнительные ошибки при приеме информации.

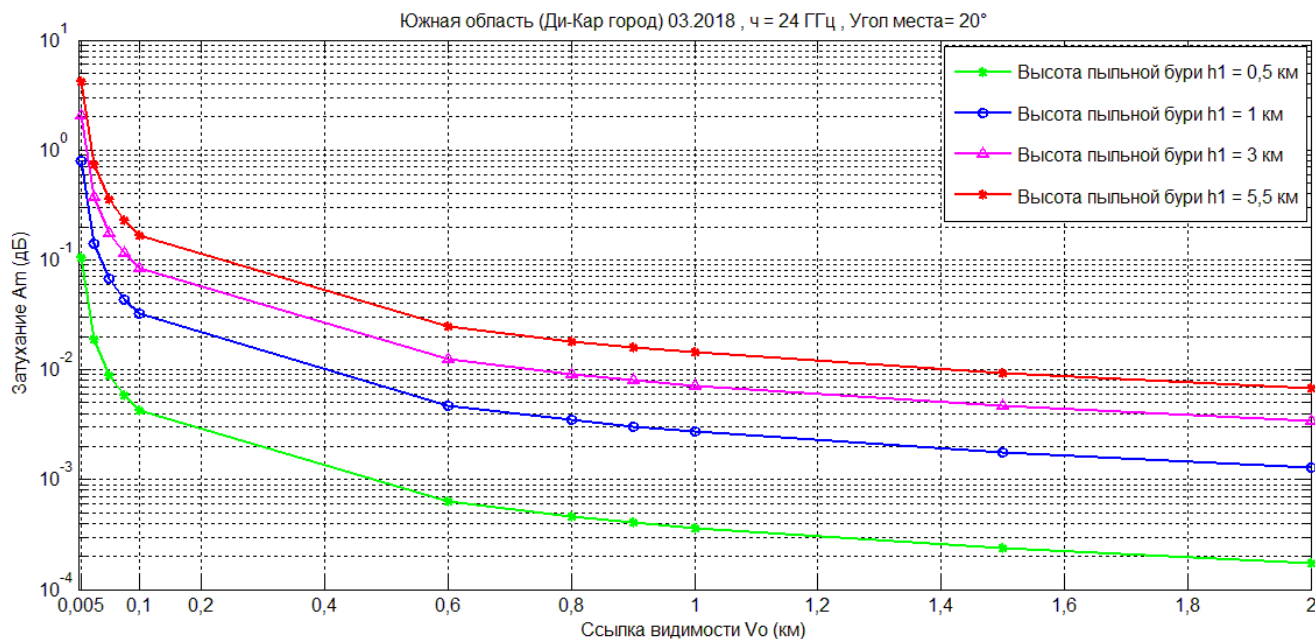
На рис. 6 показано влияние рабочей частоты и высоты пыльной бури на затухание сигналов в городе Ди-Кар на юге Ирака.

Таблица 2. Значения затухания при различных высотах пыльных бурь и различных частотах.

Высота пылевой бури, км Частота (ГГц)	Затухание, дБ			
	0,5	1	3	5,5
10	0,0439	0,3297	0,8663	1,7293
14	0,0615	0,4615	1,2128	2,4211
24	0,1055	0,7912	2,0791	4,1504
37	0,1626	1,2197	3,2053	6,3985



а)



б)

Рис. 6. Зависимость затухания от высоты пыльной бури и от видимости на разных частотах: а)  $f = 10$  ГГц, б)  $f = 24$  ГГц

Из таблицы 2 и рис. 6. видно, что при малой видимости затухание радиосигналов в пыльных бурях может составлять несколько децибел, что вызывает ошибки при приеме информации и даже может вызвать долговременное прекращение связи.

Так как появление пыльных бурь не регулярно во времени, то принимать дополнительный запас энергопотенциала на возможное затухание сигналов в пыльных бурях при проектировании линий связи КА ЗС не целесообразно, а увеличение мощности передатчика транспондера КА проблематично, то для решения проблемы компенсации затухания, возникающего из-за мощных пыльных бурь, кроме уже используемых методов помехоустойчивого кодирования сигналов, можно предложить на наземных станциях спутниковой связи применять методы пространственно-разнесенного приема. Это затратно по аппаратуре, но позволит исключить возможные перерывы связи без изменения частотных параметров линии связи.

Результаты четвертой главы были опубликованы в работах [11-18].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы автором получены следующие основные результаты:

1. На основании проведенного анализа показано, что в радиоканалах линий связи КА-ЗС основное ослабление сигнала происходит при его распространении в свободном пространстве, в атмосферных газах, из-за наличия гидрометеоров, многолучевости и из-за пылевых и песчаных бурь.

2. Пыльные и песчаные бури имеют значительную протяженность во времени и ослабление сигнала из-за них может приводить к длительным срывам связи и влиять на качество и надежность телекоммуникационных услуг.

3. Предложена классификация, разделяющая пылевые явления на взвешенную пыль, поднимающуюся пыль, пыльные бури и песчаные бури.

4. Показано, что величина затухания сигналов на линиях связи КА-ЗС во время пыльных бурь зависит также от видимости, частоты, угла места и высоты пыльных бурь:

- затухание увеличивается на несколько децибел, когда видимость уменьшается во время поднимающейся пыли и пыльных бурь, например, при видимости 100 м затухание сигналов диапазона Ка в буре высотой 4 км составляет 0,16 дБ, а при видимости 5 м уже 6.4 дБ;

- рост частоты приводит к увеличению общего затухания, в том числе и затухания из-за пыльных бурь, например, при  $f=10$  ГГц в буре высотой 4 км при видимости 100 м затухание равно 0,05 дБ, а при  $f=37$  ГГц уже 0,15 дБ при той же видимости;

- меньший угол места приводит к более высокому затуханию при той же высоте пыльной бури, на границах приема сигнала КА увеличиваясь в 5 раз;

- при увеличении высоты пыльных бурь величина затухания растет нелинейно.

5. Предложен критерий оптической видимости в пыльных образованиях, позволяющий рассчитывать ослабление радиосигналов пыльными бурями.

6. Разработана математическая модель, алгоритм расчета затухания спутниковых радиосигналов на линиях связи КА-Земля и реализующая его программа на ЭВМ в зависимости от основных параметров пылевых явлений.

7. Определено, что затухание при видимости в пыльных бурях менее 5 м на частотах Ка диапазона может превышать 6 дБ.

8. Предложены практические рекомендации для компенсации затухания, возникающего из-за мощных пыльных бурь, основой которых является

применение методов пространственно-разнесенного приема на наземных станциях спутниковой связи.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Самойлов, А.Г. Радиолинии с низкоорбитальных спутников / А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов, I A Al-Tahar, **S.A. Nasir** // Проектирование и технология электронных средств. - 2020, № 2. - С. 8-11.
2. Аль Тахар, И.А. Алгоритм моделирования быстрых интерференционных замираний / И.А. Аль Тахар, **С.А. Насир** // Проектирование и технология электронных средств. - 2021, № 2. - С. 52-54.
3. Самойлов, А.Г. Методика имитации спутниковых радиоканалов / А.Г. Самойлов, **S A Nasir** // Проектирование и технология электронных средств. - 2020, №3. - С. 9-14.
4. Самойлов, А.Г. Особенности распространения радиоволн на радиолиниях космический аппарат - земная станция / А.Г. Самойлов, В.С. Самойлов, **С.А.Х. Насир** // Проектирование и технология электронных средств, 2021, № 4. – С.21-27.

### Публикации в изданиях, входящих в Web of Science и Scopus

5. Samoylov, A.G. Radio links from low-orbit satellites / AG Samoylov, SA Samoylov, I A Al Tahar, **S A Nasir** // II International Scientific Conference "MIP: Engineerig, Modernization, Innovations, Progress : IOP Conference Series: MSE April 16-18, 2020, Krasnoyarsk, V.862. doi: 10.1088/1757-899X/862/2/022030
6. Samoylov, A.G. An Analysis of the Probbability of One Type of Errors in Digital Communication / AG Samoylov, SA Samoylov, I A Al Tahar, **S A Nasir** // 2020 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. 19 to 20 March 2020, Moscow, IEEE Conference Record pp.1-6 #48371 INSPEC Accession Number: 19573022. doi: 10.1109 / IEEECONF48371.2020.9078630.
7. Samoylov, A.G. Adaptive Interference Compensation Method / AG Samoylov, SA Samoylov, I A Al Tahar, **S A Nasir** // III International Conference MIST: Aerospace-III 2020: Advanced Technologies in Aerospace, Engineering and Automation. IOP Conference Series: MSE, 20-21 November 2020, Krasnoyarsk , V.1047. doi:10.1088/1757-899X/1047/1/012070
8. Samoylov, A.G. Interference Compensator for Communication Systems with Space-

Time Coding / AG Samoylov, SA Samoylov, I A Al Tahar, **S A Nasir** //2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, IEEE № 51389 Moscow.16-18 March 2021. doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416019.

9. Samoylov, A.G. Satellite radio channels simulation methodology / AG Samoylov, **S A Nasir** // I International Scientific Conference " CAMSTech-2020" - Contemporary advances in materials science and technology, MSE 31 July, 2020, Krasnoyarsk, 3012 т. 919, 042012. DOI: 10.1088/1757-899X/919/4/042012.

10. Samoylov, A.G. Loss of radio waves energy on radio lines satellite-earth station / AG Samoylov, VS Samoylov, **S A Nasir** // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. (2021) 042080 2094. doi:10.1088/1742-6596/2094/4/042080.

### Публикации в других изданиях

11. А.Г. Самойлов А.Г. Блочная синхронизация цифровых информационных потоков с помехоустойчивым кодированием / А.Г. Самойлов, В.С. Самойлов, I A Al-Tahar, **SA Samah** // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020 [текст]: сб. тр. III междунар. науч.-техн. форума: Т.3./ Под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2020; Рязань. – С. 5-8.

12. **С.А. Насир** Особенности радиоканалов с низкоорбитальными спутниками / **С.А. Насир** // Под ред. : С.П. Зимина, А.С. Гвоздарева. [текст]: Ярослав. гос. ун-т им. П.Г. Демидова. - Ярославль, ЯрГУ, 2020. – С. 182-183.

13. Самойлов, В.С. Оценка плотности потока энергии от мобильных телефонов / В.С. Самойлов, **С.А. Насир**, И А Аль Тахар // Материалы 14-й Международной научной конференции "Физика и Радиоэлектроника в Медицине и Экологии"[текст]: 1-3 июля, 2020, Владимир. - Т.1. - С. 347-348.

14. **С.А.Х. Насир** Затухание радиосигнала на линиях связи спутник-земля из-за пылевых и песчаных бурь / **С.А.Х. Насир** // XL - Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем [текст]: 24-25 июня 2021, г. Серпухов. - т.2. - С. 210-213.

15. **S. A. Nasir** Satellite signal attenuation during dust storms / **S. A. Nasir** // Труды 14-ой МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» [текст]: Владимир, 2021. – С. 329-332.

16. **S. A. Nasir** Microwave attenuation during rising dust and dust storms / **S. A. Nasir** // Труды 14-ой МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» [текст]: Владимир, 2021. – С. 332-336.

17. **S. A. Nasir** Satellite signal attenuation during sand and dust storms in Iraq / **S. A. Nasir** // Труды 14-ой МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» [текст]: Владимир, 2021. – С. 336-339.
18. Свидетельство о регистрации программы на ЭВМ № 2022612652 / Насир Самах Аббас Хасан (RU) Заявка № 2022611915 от 28.02.2022 г.

**Насир Самах Аббас Хассан**

**Разработка и исследование модели каналов линий связи  
космический аппарат-Земля при пыльных бурях**

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

Подписано в печать 23.03. 2022 г.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л 1,0. Тираж 100.

Издательство Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.