

## АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ЗАТУХАНИЯ И РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ И ДАННЫХ РЕАЛЬНЫХ СИСТЕМ

И. А. Зелинский, В. А. Федоренко

*Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, г. Минск*

*Представлен анализ ключевых физических механизмов – затухания и рефракции радиоволн в тропосфере – с использованием количественных моделей рекомендаций ITU-R и данных эксплуатации реальных тропосферных систем, включая отечественные станции «Гроза» и историческую ТРРЛ «Север». Показано, как атмосферное поглощение, влияние осадков и градиенты показателя преломления определяют надежность и дальность связи. Особое внимание уделено практическим аспектам прогнозирования условий распространения и адаптации параметров современных систем к изменяющейся тропосферной обстановке. Результаты подчеркивают важность интеграции радиометеорологических моделей в проектирование и эксплуатацию тропосферных линий связи для обеспечения их устойчивой работы в сложных климатических условиях.*

**Ключевые слова:** тропосферная связь, затухание радиоволн, рефракция, тропосферные замирания, «Гроза», ITU-R.

## ANALYSIS OF ATTENUATION AND REFRACTION MECHANISMS OF RADIO WAVES IN THE TROPOSPHERE BASED ON QUANTITATIVE MODELS AND DATA FROM REAL-WORLD SYSTEMS

I. A. Zelinskiy, V. A. Fedorenko

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

*The paper presents an analysis of key physical mechanisms – attenuation and refraction of radio waves in the troposphere – using quantitative models from ITU-R recommendations and operational data from real-world tropospheric communication systems, including the domestic “Groza” stations and the historical “Sever” tropospheric radio relay line (TRRL). It demonstrates how atmospheric absorption, precipitation effects, and refractivity gradients determine the reliability and range of communication links. Particular emphasis is placed on practical aspects of propagation condition forecasting and adaptive adjustment of modern system parameters to the dynamically changing tropospheric environment. The results highlight the critical importance of integrating radiometeorological models into the design and operation of tropospheric communication links to ensure their robust performance under challenging climatic conditions.*

**Keywords:** tropospheric communication, radio wave attenuation, refraction, tropospheric fading, “Groza”, ITU-R.

Тропосферная связь, как технология загоризонтной передачи радиосигналов, в значительной степени определяется физическими процессами, происходящими в нижнем слое атмосферы – тропосфере. Два ключевых явления, оказывающих доминирующее влияние на качество и надежность связи – это затухание и рефракция радиоволн. Понимание и количественное описание этих механизмов являются основой для проектирования, оптимизации и прогнозирования работы тропосферных линий связи [1, 2].

Затухание радиоволн в тропосфере обусловлено поглощением энергии сигнала молекулами атмосферных газов и рассеянием на гидрометеорах (дождь, туман, снег). Основной вклад в поглощение вносят молекулы кислорода и водяного пара, которые имеют резонансные частоты поглощения. Согласно рекомендациям Международного союза электросвязи (ITU-R P.676-13), пиковые значения поглощения для кислорода наблюдаются на частотах около 60 и 118 ГГц, а для водяного пара – на 22,2 и 183,3 ГГц. Между этими пиками формируются так называемые «окна прозрачности», где ослабление минимально, и именно в этих диапазонах реализуются современные тропосферные системы. Количественно погонное ослабление рассчитывается по эмпирическим формулам, зависящим от частоты, температуры, давления и абсолютной влажности [1].

Данные реальных систем, таких как отечественная станция «Гроза», подтверждают, что при работе в диапазоне 4–6 ГГц влияние газового поглощения незначительно, однако на частотах выше 10 ГГц оно становится критическим и требует тщательного учета при расчете энергетического бюджета линии.

Дополнительный вклад в затухание вносят осадки. Коэффициент ослабления в дожде, согласно ITU-R P.838-3, резко возрастает с увеличением частоты и интенсивности дождя. На частотах свыше 15 ГГц дождевое затухание может превышать газовое и становится определяющим фактором при расчете надежности связи. Анализ данных эксплуатации тропосферных линий в регионах с высокой влажностью показывает, что именно дождевые замирания являются основной причиной временных сбоев в работе систем на частотах выше 8 ГГц [3].

Рефракция в тропосфере – это физическое явление, заключающееся в изменении направления распространения радиоволн при их прохождении через тропосферу вследствие непрерывного изменения показателя преломления воздуха с высотой. Показатель преломления  $N$  зависит от температуры, давления и влажности воздуха и в нормальных условиях уменьшается с высотой со средним градиентом ( $-40 N$ -единиц/км). Это приводит к стандартной рефракции, которая увеличивает радиогоризонт примерно на 15 % по сравнению с геометрическим. Однако в реальных условиях часто наблюдаются аномалии. При субрефракции радиогоризонт сокращается, что может привести к появлению «мертвых зон». Наиболее интересна для тропосферной связи сверхрефракция, возникающая при инверсии температуры и резком падении влажности с высотой. В таких условиях формируются тропосферные волноводы, способные переносить сигнал на тысячи километров, но с крайне непредсказуемой надежностью. Количественные модели, основанные на данных метеостанций и радиозондирования, позволяют прогнозировать вероятность возникновения сверхрефракции для конкретной трассы и времени года. Например, исследования в Республике Бурятия показали, что в летний период вероятность благоприятных для сверхрефракции условий может достигать 10–15 %, что объясняет наблюдаемые в практике резкие всплески уровня сигнала на тропосферных линиях [2, 3].

Сравнительный анализ данных реальных систем, таких как историческая ТРРЛ «Север» и современная «Гроза», демонстрирует эволюцию подходов к учету этих механизмов. Если в прошлом проектировщики закладывали огромные запасы по

мощности для компенсации непредсказуемых замираний, то современные системы используют адаптивные алгоритмы, основанные на постоянном мониторинге канала и количественных моделях ITU-R. Это позволяет динамически перестраивать частоту, скорость передачи и мощность, обеспечивая стабильную связь при минимальных энергозатратах. Таким образом, глубокий анализ механизмов затухания и рефракции с использованием современных количественных моделей и данных реальных систем является ключом к созданию надежных, эффективных и экономически целесообразных тропосферных линий связи, особенно в удаленных и труднодоступных регионах.

#### Л и т е р а т у р а

1. Тропосферная связь: современные технологии и перспективы развития. – URL: <https://roe.ru> (дата обращения: 25.09.2025).
2. Введение в теоретическую радиофизику и оптику : учеб. пособие / Ю. А. Кравцов [и др.] – М. : ФизМатЛит, 2004. – 520 с.
3. Новые разработки АО «МНИРТИ» в области тропосферной связи. – URL: <https://mnirti.ru> (дата обращения: 25.09.2025).