

УДК 621.39

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.55.4.001](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.55.4.001)

Тонкости организации спутниковой связи в условиях высоких широт Российской Федерации

М.Г. Кокорич✉, Н.В. Носкова, Е.О. Рускова

*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Новосибирск, Российская Федерация*

Резюме. В статье анализируются факторы, влияющие на организацию спутниковой связи в условиях высоких широт России. На основании рекомендаций МСЭ-R в области распространения радиоволн проведена оценка потерь энергии сигнала в Арктике как в свободном пространстве, так и с учетом атмосферного слоя. Расчеты проведены для углов места от 1 до 20 градусов в С- и Ку-диапазонах с учетом климатических факторов, характерных для Крайнего Севера: интенсивность осадков и общий столбчатый объем жидкой воды в атмосфере. Результаты расчетов представлены зависимостями от угла места, что позволяет использовать полученные данные для оценки энергетического бюджета спутниковых линий связи в критических условиях высоких широт. Также рассмотрены потери энергии сигнала из-за неточности наведения антенн, которые определяются шириной диаграммы направленности антенн и внешними дестабилизирующими факторами, одним из которых в условиях Крайнего Севера является повышенная ветровая нагрузка. Дана оценка шумовых параметров приемной земной станции, причем в условиях малых углов места шумовая температура антенны определяется шумами излучения атмосферы, а именно влиянием газов атмосферы, облачности и осадков. Результаты представлены в виде зависимости шумовой температуры от угла места для С- и Ку-диапазонов на основе расчетов потерь в атмосфере. Проведенное исследование планируется использовать при разработке рекомендаций по энергетическому расчету спутниковых линий в Арктических регионах России на границе зоны видимости геостационарных спутников.

Ключевые слова: спутниковая связь, высокие широты, энергетический расчет, шумовая температура, потери сигнала в осадках.

Благодарности: Исследование проведено в рамках Государственного задания Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, утвержденного Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, соглашение № 071-00003-25-00, 25.12.2024. «Разработка алгоритмов позиционирования для автономных объектов и анализ условий применения систем спутниковой связи с использованием геостационарной орбиты в условиях Крайнего Севера и акватории Северного морского пути».

Для цитирования: Кокорич М.Г., Носкова Н.В., Рускова Е.О. Тонкости организации спутниковой связи в условиях высоких широт Российской Федерации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2183> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.55.4.001

The subtleties of satellite communications in the conditions of high latitudes of the Russian Federation

M.G. Kokorich✉, N.V. Noskova, E.O. Ruskova

*Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk,
the Russian Federation*

Abstract. The article analyzes the factors influencing the organization of satellite communications in the conditions of high latitudes of Russia. Using ITU-R recommendations on radio wave propagation, an assessment of signal energy losses is provided for low elevation angles in free space and in the atmospheric layer. Calculations were performed for elevation angles from 1 to 20 degrees in the C- and Ku-bands, taking into account climatic factors characteristic of the Far North: precipitation intensity and total integrated liquid water content in the atmosphere. The calculation results are presented as dependencies on the elevation angle, which allows the obtained data to be used for assessing the energy budget of satellite communication links in critical high-latitude conditions. Signal energy losses due to antenna pointing inaccuracies are also considered, which are determined by the antenna's beamwidth and external destabilizing factors, one of which in the Far North conditions is increased wind load. An assessment of the noise parameters of a receiving earth station is provided, where under low elevation angle conditions, the antenna noise temperature is determined by atmospheric radiation noise, specifically the influence of atmospheric gases, cloudiness, and precipitation. The results are presented as the dependence of noise temperature on the elevation angle for the C- and Ku-bands, based on calculations of atmospheric losses. The conducted research is planned to be used in the development of recommendations for the energy calculation of satellite links in the Arctic regions of Russia at the edge of the visibility zone of geostationary satellites.

Keywords: satellite communications, high latitudes, energy calculation, noise temperature, signal loss in precipitation.

Acknowledgments: The study was conducted within the framework of the State Assignment of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science, approved by the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation, agreement No. 071-00003-25-00, December 25, 2024. "Development of positioning algorithms for autonomous objects and analysis of the conditions for using satellite communication systems using a geostationary orbit in the Far North and the Northern Sea Route".

For citation: Kokorich M.G., Noskova N.V., Ruskova E.O. The subtleties of satellite communications in the conditions of high latitudes of the Russian Federation. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(4). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2183> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.55.4.001

Введение

Энергетический расчет геостационарных спутниковых линий связи учитывает широкий спектр параметров, к которым относятся энергетические спецификации спутникового и наземного оборудования, шумовые показатели приемных устройств, интегральный уровень интерференции в локации земной станции, а также особенности прохождения радиосигналов, обусловленные метеорологическими условиями и рабочим диапазоном частот.

Точная оценка энергетических соотношений в спутниковой линии связи позволяет корректно выбрать параметры наземной станции и обеспечить заданное качество связи и обеспечить требуемую скорость передачи данных в радиоканале.

В основе энергетического расчета лежат стандартные математические выражения, позволяющие оценить отношение сигнал/шум на линиях «передающая земная станция – спутник» и «спутник – приемная земная станция» опираясь на расчет потерь энергии сигнала при распространении. Если энергетические параметры оборудования определяются только его техническими характеристиками, то потери энергии на спутниковой линии связи определяются геометрическими соотношениями земной и космических станций и применяемым диапазоном частот.

Особое значение точный учет потерь энергии сигнала имеет при расчете энергетического бюджета спутниковой линии в условиях высоких широт, что соответствует малым значениям углов места β приемной станции [1].

Эксплуатация земной станции при низких углах возвышения сопряжена с рядом неблагоприятных факторов. Помимо увеличения геометрической длины пути распространения сигнала (наклонной дальности), это также приводит к прохождению сигнала через значительно больший объем атмосферы. Следствием этого является усиление затухания сигнала, обусловленного как атмосферными газами, так и гидрометеорами [2].

Также ориентация антенн земных станций с малым углом поднятия главного лепестка диаграммы направленности антенны к горизонту приводит к значительному увеличению шумов атмосферы и земли.

Материалы и методы

Оценка потерь энергии сигнала спутниковой линии связи Арктических регионов. Для анализа перечисленных факторов необходимо использовать методики, представленные в разделе рекомендаций МСЭ-R, посвященном распространению радиоволн. Эти методики предназначены для определения потерь энергии сигнала при его движении через свободное пространство, атмосферу, а также в условиях осадков, тумана и облачности. Особое внимание следует уделить факторам, снижающим мощность сигнала на входе приемника, таким как погрешности в наведении антенн. Эти факторы требуют индивидуального рассмотрения и, как правило, оцениваются приблизительно [3].

В рамках исследования особенностей использования спутников на геостационарной орбите (ГСО) в условиях арктической зоны РФ и акватории Северного морского пути стоит уделить данным факторам особое внимание и получить максимально точные значения потерь энергии сигнала при распространении, что при расчете энергетического бюджета радиолинии на границе зон покрытия спутников на ГСО является критически важным.

Так как данное исследование выполняется для арктической зоны РФ, используя сведения, представленные в [1], можно ввести следующие исходные данные, характерные для данной территории:

- диапазон значений углов места от 1 до 25 градусов,
- диапазон значений наклонной дальности от 39079 до 41585 км.

Также для спутников типа Экспресс и Ямал известно, что на высоких широтах организованы их зоны покрытия в С- и Ku-диапазонах, зоны покрытия в Ka-диапазоне по состоянию на 2025 не организованы.

В соответствии с рекомендацией МСЭ-R P.525-5 (Calculation of free-space attenuation) распространение сигнала в свободном пространстве соответствует распространению в однородной идеальной диэлектрической среде. Для расчета может использоваться формула:

$$L_0 = 32,4 + 20 \lg f + 20 \lg d, \text{ дБ} \quad (1)$$

где f – частота, МГц, d – наклонная дальность, км.

Потери энергии в атмосфере $L_{\text{АТМ}}$ имеют малую величину и для средних широт не превышают 0,1–0,5 дБ, однако с уменьшением угла места β значительно возрастают [2].

Точные значения определяются в соответствии с актуальной рекомендацией МСЭ-R P.676-13 (Attenuation by atmospheric gases and related effects). При расчетах учитываются типовые параметры атмосферы при давлении 1013,25 гПа, температуре нижних слоев тропосферы 15 °С, плотности водяного пара 7,5 г/м³.

Оценка влияния осадков на распространение сигнала по спутниковой радиолинии включает в себя учет климатических факторов, которые определяет регион планирования.

Математические модели, описывающие статистику выпадения осадков, опираются на базы данных климатологии GPCP и Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Эти сведения представлены в обновленной рекомендации МСЭ-R P.837-8 (Characteristics of precipitation for propagation modeling), выпущенной в сентябре 2025 года. Частью рекомендации являются цифровые карты, позволяющие определить интенсивность дождевых осадков при среднегодовой вероятности превышения 0,01 %.

Несмотря на доказанное изменение климата и повышение циклонической активности [4], территория, представляющая интерес в данном исследовании, отличается минимальным выпадением осадков (зона А) по сравнению с остальной территорией страны [5]. Так, в соответствии цифровыми картами МСЭ-R P.837-8 интенсивность дождевых осадков в Арктической зоне РФ, превышаемая на 0,01 % от уровня среднего года составляет не более 8 мм/ч.

Рекомендацией МСЭ-R P.840-9 (Attenuation due to clouds and fog) для систем спутниковой связи даётся методика оценки затухания радиосигнала в облачности и тумане, которая базируется на определении мгновенного значения ослабления из-за облачности на наклонных трассах. Расчет данной величины основан на результатах метеорологических исследований атмосферы и измерений объема жидкой воды в облачном слое.

Цифровые карты, включённые в рекомендацию, позволяют определить нормированный общий столбчатый объем жидкой воды L_{red} (кг/м²), содержащийся в облаках, для различных среднегодовых значений вероятности превышения P (%) в любой точке земной поверхности. В рамках данного исследования для Арктического региона РФ для вероятности превышения 0,5 % величина L_{red} составляет 1 кг/м², для вероятности превышения 0,1% – 2 кг/м².

Путь прохождения радиосигнала через облачность естественным образом увеличивается при уменьшении угла места и обратно пропорционален $\sin\beta$.

При проектировании спутниковых линий достаточно сложно оценить отклонение наведение антенны земных станций на искусственных спутниках земли (ИСЗ). Неоспоримым является тот факт, что данное отклонение обусловлено параметрами диаграммы направленности (ДНА) и приводит к снижению SNR или эквивалентному дополнительному ослаблению в канале. Строго говоря, точность наведения антенны на ИСЗ не зависит от угла места, однако, климатические особенности Арктического региона отличаются повышенными ветровыми нагрузками на конструкции. Это отражено в своде правил (СП) 20.13330.2011, где в соответствии с картой районирования по давлению ветра северные территории относятся к IV–VI, а акватория Северного морского пути к VII ветровому району.

При определении величины потерь, обусловленных погрешностями наведения антенн земных станций (ЗС) на ИСЗ L_n , следует принимать во внимание как угловое смещение оси главного лепестка ДНА относительно реального направления на ИСЗ, так и характеристики самого главного лепестка, такие как его ширина и форма. Это связано с тем, что максимальное значение коэффициента усиления антенны достигается в пике диаграммы направленности и снижается по мере отклонения от него.

Погрешности в позиционировании антенн вызваны как несовершенством калибровки узконаправленных антенных систем, так и структурными деформациями их

оснований. Чтобы минимизировать подобные потери, антенны крупного размера оснащаются высокоточными автоматизированными системами слежения за спутниками.

Отклонение в угле юстировки антенны эквивалентно уменьшению коэффициента усиления [3]. Возникающие при этом потери энергии можно определить по формуле [6]:

$$L_n = 12 \left(\frac{\theta_{ош}}{\theta_0} \right)^2, \text{ дБ} \quad (2)$$

где $\theta_{ош}$ – погрешность в направлении наведения, град, θ_0 – размах главного лепестка ДНА при ослаблении сигнала на 3 дБ, градусы.

Оценка шумовых параметров приёмной системы спутниковой связи в условиях малых углов места. Приемная часть ЗС состоит из антенны, включающей одно или два отражающих зеркала и облучатель, фидерной системы, малошумящего усилителя-конвертера, механизма наведения и удержания антенны в нужном направлении, а также дополнительных модулей (дистанционное управление, поддержание влажности ВЧ-тракта и прочее), линий передачи информации и аппаратуры для последующей обработки сигнала [7, 8].

Для анализа качества сигнала на входе станции необходимо определить эффективную шумовую температуру ($T_{эфф}$) приемного оборудования [7]. Для этого учитывают суммарную мощность шумов антенно-фидерного тракта, при этом суммирует шумовые вклады как от антенны, так и от всех компонентов, соединяющих антенну с приемником (фидер, разъемы), и сгенерированных элементами приемника, приведенных ко входу.

$$T_{эфф} = T_{АНТ}\eta_{АФТ} + T_{АФТ} + T_{ШПР}, \quad (3)$$

где $T_{АНТ}$ – эквивалентная шумовая температура антенны, $T_{АФТ}$ – шумовая температура антенно-фидерного тракта, $\eta_{АФТ}$ – коэффициент передачи фидерного тракта приемной антенны, $T_{ШПР}$ – шумовая температура приемника.

Шумовая температура $T_{ШПР}$, являющаяся характеристикой малошумящего блока понижающего преобразователя (low-noise block downconverter, LNB), играет ключевую роль в общем уровне шума приемной системы. Эта эквивалентная шумовая температура LNB выступает как основной фактор, определяющий общую шумовую температуру.

Показатель шума LNB выражается либо в эквивалентной шумовой температуре, измеренной в градусах Кельвина, либо в коэффициенте шума, измеряемом в децибелах или единицах.

Чтобы вычислить значение шумовой температуры, необходимо оценить собственные шумы, возникающие во входной цепи приемника, приведенные ко входу.

$$T_{ШПР} = T_0(k_{ш} - 1), \quad (4)$$

где $T_0 = 290$ К – температура рабочей среды приемника, $k_{ш}$ – коэффициент шума.

Значение $T_{ШПР}$ в данном исследовании не зависит от угла места β и не подлежит оценке. Низкий уровень $T_{ШПР}$ достигается выбором LNB с высокими техническими параметрами.

Эквивалентная шумовая температура антенно-фидерного тракта при рабочей температуре рассчитывается по формуле:

$$T_{АФТ} = T_0(1 - \eta_{АФТ}). \quad (5)$$

При наружном размещении LNB антенно-фидерного тракта представлен фрагментом волновода с величиной КПД равной 0,95. Данная составляющая эффективной шумовой температуры также не зависит от угла места β .

При оценке эквивалентной шумовой температуры антенны учитывают следующие факторы:

$$T_{АНТ} = T_{КИ}(\beta) + T_a(\beta) + cT_{ЗЕМЛИ}, \quad (6)$$

где $T_{КИ}(\beta)$ – шумовая температура космических источников, определяемая как функция угла места β , $T_a(\beta)$ – шумовая температура, обусловленная излучением атмосферы, $T_{ЗЕМЛИ}$ – шумовая температура земной поверхности, c – параметр, учитывающий прием шумов неосновными лепестками ДНА, принимаемый 0,2 для типовых антенн ЗС.

Согласно рекомендации МСЭ-R P.372-11, космос наполнен шумами, основными источниками которых являются излучения, исходящие от нашей Галактики, Солнца и Луны.

Тем не менее, при работе на частотах выше 2 ГГц, основное влияние оказывают Солнце и ряд мощных нетепловых источников, расположенных в Галактике. Средняя шумовая температура, связанная с этими объектами, на частотах С-диапазона и более высоких становится незначительной, не превышая 2,7 градуса Кельвина, и, что важно, не проявляет зависимости от угла места.

Как следствие, в большинстве практических случаев значение компоненты $T_{КИ}(\beta)$ принимается равным 2,7 К.

Шумовая температура Земли $T_{ЗЕМЛИ}$ является результатом теплового излучения планеты. Это излучение отражается от атмосферы на границе «Земля – воздух», и часть его фиксируется антенной земной станции.

Значение этой шумовой температуры варьируется в зависимости от конфигурации диаграммы направленности принимающей антенны и ее расположения относительно поверхности Земли.

При небольших углах места считается, что эффективная температура земной поверхности ($T_{ЗЕМЛИ}$) составляет около 290 К.

Однако интенсивность шумового сигнала, фиксируемого приемником, также определяется характеристиками боковых лепестков диаграммы направленности антенны.

Следовательно, вклад шумов антенны, обусловленный тепловым излучением земной поверхности ($T_{ЗЕМЛИ}$) и принимаемый с боковых и задних лепестков, в диапазоне углов места от 5–7° до 90°, можно приблизительно вычислить с использованием уравнения (7), как это предложено в [6].

$$T_{ЗЕМЛИ} = 23 + 0,2 \cdot (90 - \beta). \quad (7)$$

Атмосферное радиоизлучение Земли является тепловым и напрямую зависит от поглощения радиоволн в атмосфере. Состояние термодинамического равновесия подразумевает, что количество излучаемой энергии на определенной частоте идентично объему поглощенной энергии [6].

Для расчета шумовой температуры атмосферы применяется уравнение:

$$T_a(\beta) = T_{ср} \cdot (1 - 10^{(-L_D - L_{ОБЛ} - L_{АТМ})/10}), \quad (8)$$

где $T_{ср}$ – стандартная средняя температура атмосферы, L_D – величина ослабления радиосигнала, вызванного присутствием гидрометеоров (осадков, тумана), дБ, $L_{ОБЛ}$ – величина ослабления радиосигнала, обусловленная наличием облачности, дБ, $L_{АТМ}$ – величина ослабления радиосигнала, связанная с поглощением в атмосферных газах, дБ.

В ГОСТ 4401-81 установлено значение стандартной средней температуры атмосферы. Данная величина определена для диапазона высот от 2 километров ниже уровня моря до границы земной атмосферы в космосе (приблизительно 12 000 км).

Величины, характеризующие стандартную атмосферу, вычислены с использованием уравнения состояния идеального газа и барометрической формулы.

Расчеты базируются на предположении, что у поверхности океана давление составляет 1013,25 гПа (или 760 мм рт. ст.), а температурное значение установлено на уровне 288,15 Кельвина.

Для защиты антенн наземных станций от атмосферных осадков иногда применяются радиопрозрачные укрытия. Влияние таких укрытий-обтекателей на потери сигнала и увеличение теплового шума $T_{обт}$, как правило, незначительно и зачастую может быть проигнорировано.

Результаты и обсуждение

Потери энергии при распространении в свободном пространстве. С учетом определенных ранее пределов изменения наклонной дальности были рассчитаны значения L_0 для характерных частот:

4 и 6 ГГц – средние частоты линий вниз и вверх С-диапазона,

11 и 14 ГГц – средние частоты линий вниз и вверх Ku-диапазона.

Наклонная дальность и угол места однозначно связаны координатами земной станции и спутника на ГСО, расчеты представлены в зависимости от угла места (Рисунок 1) для удобства использования в дальнейших исследованиях. Как видно из Рисунка 1 изменение угла места в рассматриваемых пределах не приводит к значительному изменению параметра L_0 .

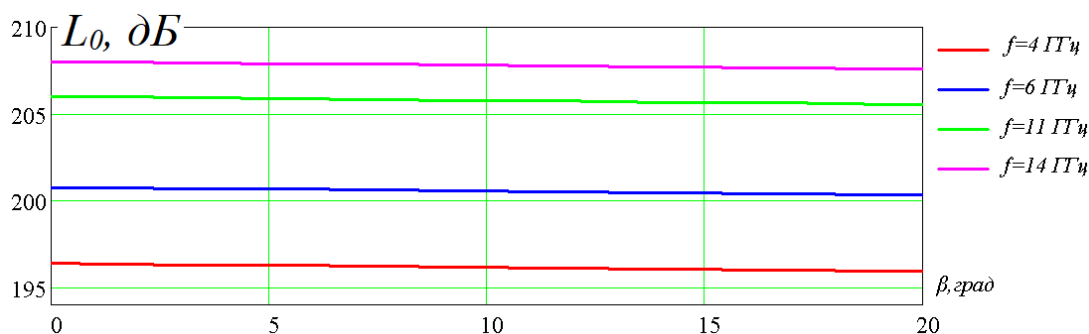


Рисунок 1 – Зависимость потерь энергии сигнала в свободном пространстве от угла места
 Figure 1 – Elevation angle dependence of free-space signal energy loss

Компенсация значительных потерь энергии, неизбежных при распространении в свободном пространстве, является относительно простой задачей, решаемой за счет энергетического запаса спутниковой системы связи.

Потери энергии сигнала в газах атмосферы. Рисунок 2 иллюстрирует зависимость показателя $L_{атм}$ от угла места, рассчитанную согласно рекомендациям МСЭ-R P.840-9 (Attenuation due to clouds and fog).

Увеличение пути прохождения сигнала через атмосферный слой при малых углах места приводит к резкому росту значений $L_{атм}$, которые имеют выраженную частотную зависимость. Представленные графики показывают резкий рост $L_{атм}$ при уменьшении угла места ниже 5 градусов, причем наблюдается значительная разница между потерями на линии вверх и вниз в диапазоне Ku.

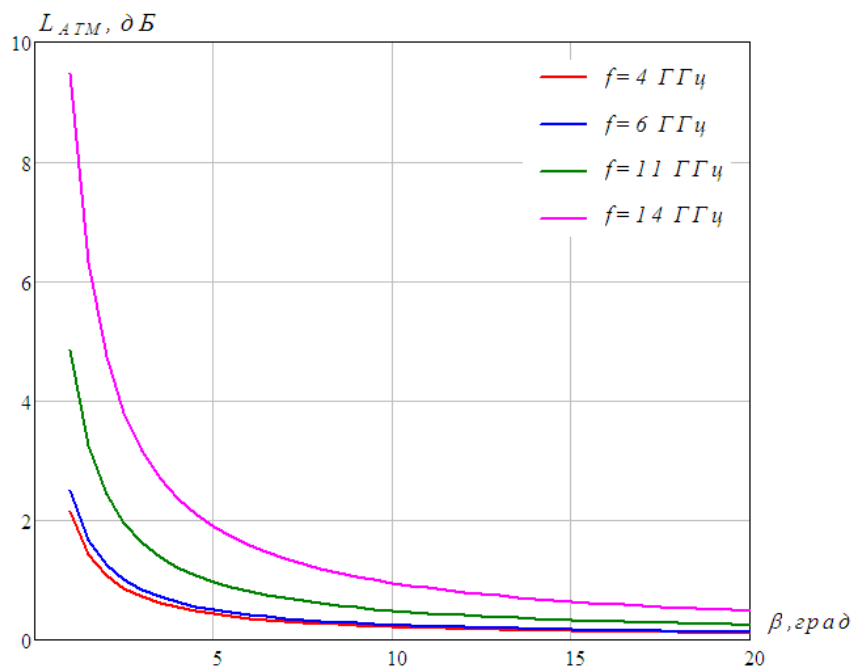


Рисунок 2 – Зависимость потерь энергии сигнала в спокойной атмосфере от угла места
 Figure 2 – Signal energy loss in a calm atmosphere as a function of elevation angle

Потери энергии сигнала в осадках. Для оценки потерь сигнала в осадках воспользуемся методиками, приведенными в рекомендациях P.838-3 Specific attenuation model for rain for use in prediction methods) и P.839-4 (Rain height model for prediction methods). Представленные методики дают возможность количественно определить погонное ослабление радиосигнала, обусловленное осадками, а также оценить толщину дождевого слоя. На основе этих данных возможно построение графика, иллюстрирующего зависимость потерь энергии сигнала в осадках от угла места (Рисунок 3).

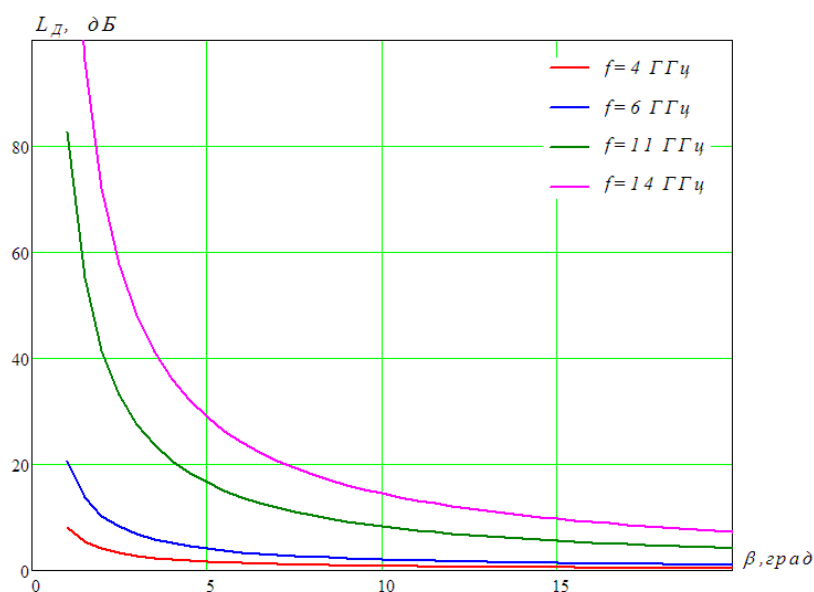


Рисунок 3 – Зависимость потерь энергии сигнала в осадках интенсивностью 8 мм/ч от угла места
 Figure 3 – Signal energy loss in 8 mm/h precipitation as a function of elevation angle

Анализ данных показывает, что в условиях атмосферных осадков С-диапазон демонстрирует более высокую эффективность, чем Ku-диапазон. Это объясняется тем, что существенное поглощение сигнала осадками в С-диапазоне становится заметным лишь при углах места ниже 10 градусов, в то время как для Ku-диапазона критический уровень поглощения достигается уже при углах места менее 15 градусов.

Дополнительные потери энергии сигнала в десятки децибел не могут быть компенсированы энергетическим потенциалом индивидуальных пользовательских терминалов Ku-диапазона, однако, внедрение адаптивных схем модуляции и кодирования, предусмотренных стандартами DVB-S2 и DVB-S2X [9], позволит рационально использовать энергетические и частотные ресурсы спутникового канала связи. Такая опция доступна только при использовании пакетной передачи данных и приоритизации трафика в сетях спутниковой передачи данных.

Потери энергии сигнала в облачности и тумане. С использованием рекомендации МСЭ-R P.840-9 построены графики зависимости потерь энергии сигнала от угла места для характерных диапазонов частот, используемых спутниками на ГСО для вероятности превышения 0,5 % и 0,1 % (Рисунок 4).

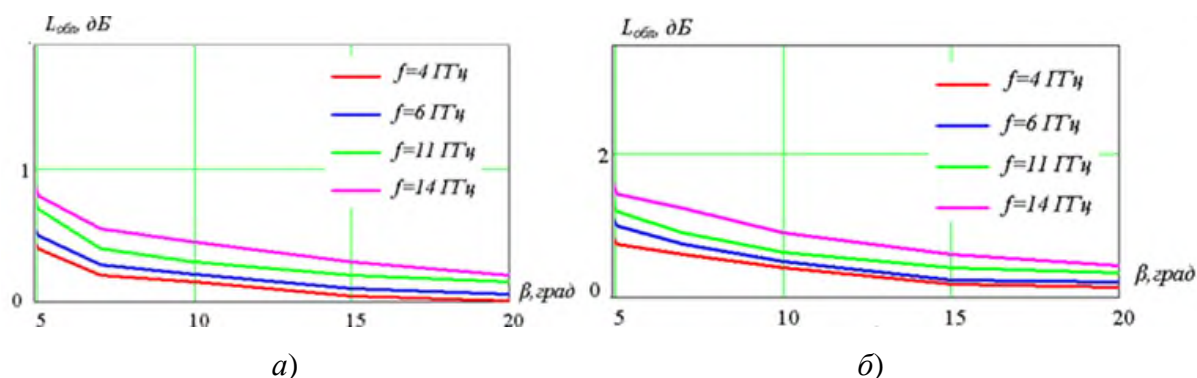


Рисунок 4 – Потери энергии в облачности и тумане: *a* – для вероятности превышения 0,5 %; *b* – для вероятности превышения 0,1 %

Figure 4 – Energy losses attributable to cloud cover and fog: *a* – with a 0.5% exceedance probability; *b* – with a 0.1 % exceedance probability

Полученные результаты вносят свой вклад в итоговое значение поглощения энергии в атмосфере несмотря на значительно меньшую величину по сравнению с влиянием осадков.

Потери энергии сигнала из-за неточности наведения антенн. Оценка ошибки из-за угла наведения, рассмотренного в (2), учитывает следующие факторы [3]:

θ_1 – отклонение от требуемого положения антенны при первоначальной установке оборудования. Точность автоматического наведения антенны гарантирует, что максимум сигнала находится в пределах 10 % ширины диаграммы направленности (по уровню -3 дБ) [3];

θ_2 – устойчивость антенны к внешним воздействиям, обеспечивающая сохранение ее первоначального направления во время работы;

θ_3 – стабильность орбитального положения космического аппарата. Например, для ИСЗ серии Экспресс, находящихся на геостационарной орбите, это значение составляет $\pm 0,05^\circ$ [10].

Поскольку указанные факторы действуют независимо друг от друга, общая погрешность $\theta_{ош}$ может быть вычислена по формуле (9):

$$\theta_{ош} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3, \text{ град.} \quad (9)$$

На Рисунке 5 представлены результаты моделирования влияния погрешностей наведения на энергию сигнала. Для расчета выбраны следующие типовые условия:

- погрешность юстировки антенны θ_1 при первичном монтаже составляет 10 % от ширины главного лепестка ДНА [3];
- устойчивость конструкции антенны к ветровым и механическим воздействиям: $\theta_2 = 0,1; 0,3; 0,5$ и $0,8$ градусов (кривые 1–4 на Рисунке 5).
- точность поддержания ИСЗ на орбитальной позиции для спутников серии «Экспресс» составляет $\theta_3 = 0,05$ градуса [3].

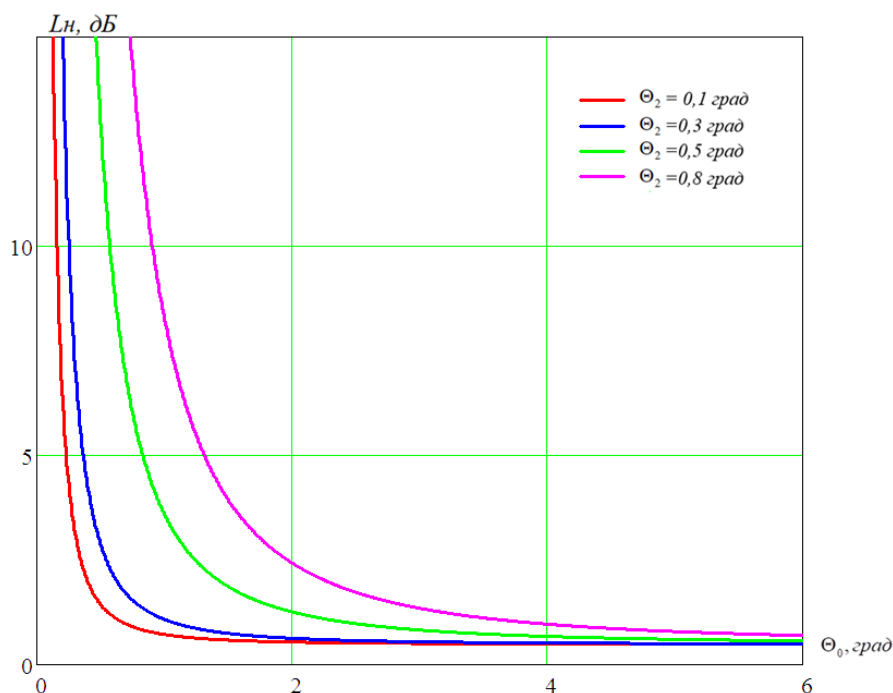


Рисунок 5 – Зависимость потерь энергии сигнала из-за неточности наведения от ширины главного лепестка ДНА

Figure 5 – The dependence of signal energy loss due to pointing inaccuracy on the main lobe width of the antenna pattern

Анализ полученных зависимостей показывает, что определяющими факторами в условиях районов с высокой ветровой нагрузкой, являются высокая стабильность наведения установки и стабильность антенной конструкции. Это касается не только надежности фиксации антенны в первичном положении, но и устойчивости мачтовых сооружений и конструкций, на которых размешено внешнее оборудование земной станции, что делает необходимым предварительный расчет нагрузок в соответствии с СП 20.13330.2011.

Если ширина главного лепестка ДНА превышает 4 градуса, то стабильность наведения установки практически не оказывает влияния, а дополнительные потери не превышают 1 дБ. Следовательно, можно допустить компромисс между уменьшением коэффициента усиления антенны и расширением главного лепестка ДНА, чтобы обеспечить надежное наведение луча на геостационарный спутник связи.

При этом, если ширина главного лепестка ДНА становится меньше 1,5 градусов, потери сигнала из-за ошибок наведения значительно увеличиваются, что требует применения дополнительных решений, например, систем автоматической подстройки антенны.

Оценка шумовых параметров приемной земной станции в условиях малых углов места. Приведенные выше расчетные данные позволяют установить степень затухания энергии сигнала в атмосфере за счет рассмотренных факторов.

В данном анализе охватываются частоты 4 и 11 ГГц (С- и Ku-диапазоны downlink), а также метеоусловия: осадки 8 мм/ч и облачность 1 кг/м². Рисунки 2, 3, 4 демонстрируют суммарные атмосферные потери энергии сигнала, сведенные в Таблицу 1.

Далее по формуле (11) оценим шумовую температуру атмосферы и результат покажем на графике (Рисунок 6).

Таблица 1 – Результирующее значение потерь энергии сигнала в атмосфере на частотах 4 и 11 ГГц

Table 1 – The resulting value of signal energy loss in the atmosphere at 4 and 11 GHz

Угол места, град.	Потери в газах атмосферы, дБ		Потери в осадках, дБ		Потери в облачности и тумане, дБ		Суммарное значение потерь энергии сигнала в атмосфере, дБ	
	4 ГГц	11 ГГц	4 ГГц	11 ГГц	4 ГГц	11 ГГц	4 ГГц	11 ГГц
5	0,43	0,97	1,63	16,6	0,4	0,7	2,46	18,27
10	0,25	0,49	0,82	8,31	0,15	0,3	1,22	9,1
15	0,15	0,33	0,55	5,58	0,04	0,2	0,74	6,11
20	0,13	0,25	0,42	4,22	0,01	0,15	0,56	4,62

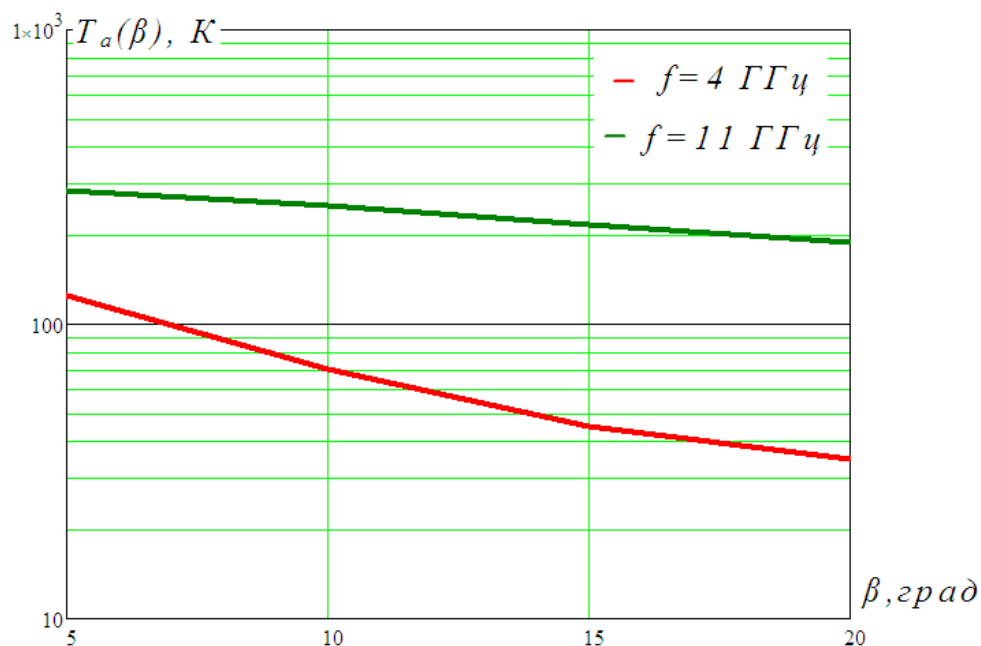


Рисунок 7 – Зависимость $T_a(\beta)$ для диапазонов частот 4 и 11 ГГц
Figure 7 – $T_a(\beta)$ dependence for the 4 and 11 GHz frequency bands

Результаты исследования показывают увеличение шумовой температуры атмосферы при организации спутниковой связи в высоких широтах, что вносит значительный вклад в ухудшение шумовых параметров приёмных ЗС и снижение отношения сигнал/шум и, как следствие приводит к увеличению коэффициента ошибок в канале связи.

Заключение

Полученные результаты позволяют количественно оценить особенности организации связи ИСЗ ГСО и ЗС спутниковой связи, находящихся в условиях высоких широт в Арктическом регионе России.

Рассчитаны значения потерь энергии сигнала в атмосфере, которые резко возрастают при малых углах места и вносят критический вклад в обеспечиваемое отношение сигнал/шум. Значительный вклад в обеспечение помехоустойчивого приема вносит и повышение шумовой температуры антенны, а следовательно, и мощности шума приемной земной станции.

В этой связи задача обеспечения требуемого энергетического потенциала спутниковой радиолинии усложняется по сравнению с условиями средней полосы России.

Тем не менее, геостационарная орбита в ожидании российских низкоорбитальных систем, таких как сеть спутниковой связи от ИКС Холдинга, является основным средством передачи для автономных объектов в Арктической зоне РФ.

Данное исследование проведено в рамках разработки рекомендаций по энергетическому расчету спутниковой линии связи в условиях малых углов места и с учетом климатических особенности Арктического региона России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Кокорич М.Г., Носкова Н.В., Рускова Е.О. Анализ современного состояния и особенностей использования спутниковой связи в Арктической зоне РФ. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(4). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.001>
Kokorich M.G., Noskova N.V., Ruskova E.O. Analysis of the current state and specificities of satellite communication usage in the Arctic zone of the Russian Federation. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(4). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.001>
2. Снежко В.К., Якушенко С.А., Бурлаков С.О., Веркин С.С., Чеканова Е.В. Оценка влияния дестабилизирующих факторов на качество связи и устойчивость радиолиний спутниковой связи в миллиметровом диапазоне радиоволн. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2024;(4-3):52–57. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-4-3-52-57>
Snezhko V.C., Yakushenko S.A., Burlakov S.O., Verkin S.S., Chekanova E.V. Assessment of the influence of destabilizing factors on the quality of communications and stability of satellite communications radio links in the millimeter wave range. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;(4-3):52–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-4-3-52-57>
3. Кокорич М.Г. Неточность наведения антенны на геостационарный спутник. Причины, методы оценки, способы снижения негативных последствий. В сборнике: *Современные проблемы телекоммуникаций: Материалы Российской научно-технической конференции, 20–21 апреля 2022 года, Новосибирск, Россия*. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; 2022. С. 375–384.
Kokorich M.G. Antenna pointing inaccuracy to a geostationary satellite. Causes, assessment methods, ways to reduce negative consequences. In: *Modern Problems of Telecommunications: Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference, 20–21 April 2022, Novosibirsk, Russia*. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Information Science; 2022. P. 375–384. (In Russ.).

4. Kislov A., Matveeva T., Antipina U. Precipitation Extremes and Their Synoptic Models in the Northwest European Sector of the Arctic during the Cold Season. *Atmosphere*. 2022;13(7). <https://doi.org/10.3390/atmos13071116>
5. Андрианов М.Н., Корбаков Д.А., Пожидаев В.Н. Возможные спутниковые линии связи в условиях Арктики. *Журнал радиоэлектроники*. 2020;(8). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.13>
Andrianov M.N., Korbakov D.A., Pozhidaev V.N. Possible satellite communication links in the Arctic. *Journal of Radio Electronics*. 2020;(8). (In Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.13>
6. Ерохин Г.А., Мандель В.И., Нестеркин Ю.А., Струков А.П. Методика расчета энергетического запаса радиолинии «космический аппарат – станция». *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2018;5(1):65–74.
Erokhin G.A., Mandel V.I., Nesterkin Yu.A., Strukov A.P. The calculation methodology for the energetic reserve of the radio link spacecraft–station. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2018;5(1):65–74. (In Russ.).
7. Сомов А.М., Титовец П.А. О потенциальных возможностях уменьшения шумовой температуры антенн земных станций спутниковой связи. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2009;(S1):102–104.
8. Забело А.Н., Снежко В.К., Орлов Е.В., Таиров Р.З., Горанько С.А. Особенности расчета реальной чувствительности приемных устройств земной станции и ретранслятора связи радиолинии спутниковой связи. *Нанотехнологии: наука и производство*. 2022;(3):45–50.
Zabelo A.N., Snezhko V.K., Orlov E.V., Tairov R.Z., Goranko S.A. Peculiarities of calculation of real sensitivity of receiving devices of earth station and communication repeater of radio link of satellite communication. *Nanotechnology: Science and Production*. 2022;(3):45–50. (In Russ.).
9. Коломенский К.Ю., Демидова А.Ю., Казаринов А.С. От DVB-S к DVB-S2X: прогресс в стандартизации систем цифрового спутникового вещания. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2024;27(2):68–78. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2024-27-2-68-78>
Kolomensky K.Yu., Demidova A.Yu., Kazarinov A.S. From DVB-S to DVB-S2X: Progress in Standardization of Digital Satellite Broadcasting Systems. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2024;27(2):68–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2024-27-2-68-78>
10. Лысенко Л.Н., Корянов В.В., Топорков А.Г. Об оценке требований к точности спутниковой навигации на основе анализа современного состояния КВНО потребительских систем гражданского назначения. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*. 2015;(5):47–61.
Lysenko L.N., Koryanov V.V., Toporkov A.G. Evaluation of satellite navigation accuracy requirements based on the analysis of the current state of commercial coordinate and time navigation support systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2015;(5):47–61. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кокорич Марина Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Российская Федерация.

e-mail: kokorich@mail.ru

Marina G. Kokorich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Digital Broadcasting and Radio Communication Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk, the Russian Federation.

Носкова Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Российская Федерация.

e-mail: cj_78@mail.ru

Natalia V. Noskova, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Digital Broadcasting and Radio Communication Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk, the Russian Federation.

Рускова Екатерина Олеговна, ассистент кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Российская Федерация.

e-mail: ruskovakatusa@gmail.com

Ekaterina O. Ruskova, Assistant at the Department of Digital Broadcasting and Radio Communication Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026; одобрена после рецензирования 28.03.2026; принята к публикации 07.04.2026.

The article was submitted 02.02.2026; approved after reviewing 28.03.2026; accepted for publication 07.04.2026.