

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАГОРИЗОНТНОЙ ТРОПОСФЕРНОЙ СВЯЗИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

С.С. Веркин, канд. техн. наук

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-5-1-284-289

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы использования загоризонтной тропосферной связи в Арктической зоне. Проанализированы физические принципы работы тропосферных линий связи, исторический опыт их применения в высоких широтах, а также современное состояние технологий. Особое внимание уделено российским разработкам (семейство станций «Гроза») и зарубежным системам (Archer производства Ultra I&C). Проведён сравнительный анализ тропосферной связи с альтернативными технологиями – спутниковой, радиорелейной и волоконно-оптической связью. Выявлены преимущества и ограничения тропосферного метода в арктических условиях. Сделан вывод о целесообразности комплексного применения тропосферной связи как элемента гибридной телекоммуникационной инфраструктуры Арктической зоны. Показано, что на современном этапе тропосферная связь переживает второе рождение благодаря цифровизации и появлению компактных высокоскоростных станций.

Ключевые слова: загоризонтная связь; тропосферная связь; Арктическая зона; «Гроза-1.5»; Archer; Северный морской путь; гибридные сети связи; телекоммуникационная инфраструктура.

Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) занимает около 10 млн квадратных километров. На этой территории сосредоточена значительная доля общероссийских запасов природных ресурсов: 40% золота, 40% нефти, 80% газа, 90% хрома и марганца. Однако экономическое освоение Арктики, обеспечение безопасности Северного морского пути (СМП) и жизнедеятельности приполярных населённых пунктов невозможны без надёжной и устойчивой связи.

Арктика предъявляет исключительно жёсткие требования к системам телекоммуникаций: экстремально низкие температуры (до – 50°C), ледяной покров, ионосферные аномалии, полное отсутствие наземной инфраструктуры на большей части территории. Традиционные методы организации связи – радиорелейные линии (РРЛ) и волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) – либо технически нереализуемы, либо экономически нецелесообразны в арктических условиях. Строительство ВОЛС через вечную мерзлоту и тайгу сопряжено с огромными затратами и требует использования специальной техники. Радиорелейная связь ограничена условиями прямой видимости, что при пересечённом ре-

льефе и огромных расстояниях между населёнными пунктами делает её малоприменимой.

Спутниковая связь, часто рассматриваемая как «естественное» решение для труднодоступных регионов, в Арктике сталкивается с собственными проблемами. Геостационарные спутники ненадёжно покрывают высокие широты, а в приполюсных районах связь может прерываться вовсе. Кроме того, спутниковые каналы уязвимы для помех и задержек сигнала.

Именно в этом контексте загоризонтная тропосферная связь – технология, основанная на переизлучении радиоволн неоднородностями тропосферы – вновь привлекает пристальное внимание. Цель настоящей статьи – проанализировать современное состояние и перспективы использования тропосферной связи в Арктической зоне, выявить её преимущества и ограничения, а также определить место этой технологии в общей системе телекоммуникационного обеспечения региона.

Физические основы и принципы работы загоризонтной тропосферной связи

Тропосферная радиосвязь – вид радиосвязи, основанный на явлении переизлучения электромагнитных импульсов в физически неоднородной тропосфере при распростране-

нии в ней радиоволн. В отличие от линий прямой видимости (обычно до 50-70 км), передача данных здесь происходит в диапазоне дециметровых и сантиметровых радиоволн с использованием эффекта рассеяния сигнала на турбулентных неоднородностях тропосферы.

Принцип действия тропосферной линии связи достаточно прост: сигнал направляется не непосредственно в сторону приёмника, а под углом вверх. На высоте примерно 10-15 км радиоволны переизлучаются (рассеиваются) неоднородностями тропосферы и частично попадают в приёмную антенну, расположенную за горизонтом. Благодаря этому расстояние между приёмником и передатчиком может достигать 250-300 км на один интервал, а при последовательном включении нескольких станций – существенно больше.

Важно отметить, что описание «отражения от верхней границы тропосферы» является упрощённым. В действительности механизм рассеяния носит статистический характер: сигнал переизлучается множеством мелких неоднородностей диэлектрической проницаемости воздуха, постоянно существующих в тропосфере. Уровень переизлучённого сигнала чрезвычайно мал по сравнению с первичным – ослабление может достигать 10^6 – 10^8 раз по мощности. Именно поэтому тропосферные станции традиционно требовали мощных передатчиков (несколько киловатт) и антенн большого размера с усилением 35-40 дБ.

Однако ситуация кардинально меняется с внедрением цифровых методов обработки сигнала. Современные цифровые станции тропосферной связи способны обеспечить высокие скорости передачи данных при существенно меньших энергетических затратах [1, 2].

Советский опыт тропосферной связи в Арктике

Использование тропосферной связи в высоких широтах имеет глубокие исторические корни. Технология зародилась в военной сфере в 1950-х годах. В США линия DEW (Distant Early Warning) – сеть радиолокационных станций раннего предупреждения о возможном полёте советской авиации через Северный полюс – была связана именно тропосферными радиорелейными линиями.

В Советском Союзе первые тропосферные станции «Лодка» и «Фрегат» в 1950-х годах на практике показали возможность работы линии протяжённостью 250 км. Однако подлинным триумфом советской школы тропосферной связи стало создание линии «Север» – грандиозной тропосферной радиорелейной системы протяжённостью более 13 000 км, охватившей северное и тихоокеанское побережья СССР, а также протянувшейся вдоль рек Обь, Енисей и Лена. В 1960-х годах была построена станция TP-60/120, на основе которой появилась сеть тропосферных линий длиной более 15 тыс. км. Эта станция вошла в состав линии связи, соединившей Москву и Дели: средний участок протяжённостью почти 700 км между Душанбе и Сринагаром – тропосферная линия связи [3].

Советский опыт убедительно доказал, что тропосферная связь является эффективным инструментом для обеспечения коммуникаций на огромных необжитых территориях, каковой и является Арктика. Однако после распада СССР значительная часть этой инфраструктуры была утрачена, и в течение нескольких десятилетий развитие тропосферной связи в гражданском секторе практически не велось.

Российские разработки семейства «Гроза»

Начиная с 2020-х годов в России наблюдается возрождение интереса к тропосферной связи. Ведущую роль в этом процессе играет холдинг «Росэлектроника» (входит в Госкорпорацию Ростех). Разработанные НПП «Радиосвязь» цифровые станции тропосферной связи «Гроза» представляют собой качественно новый этап в развитии технологии.

В октябре 2025 года была представлена модернизированная версия – станция «Гроза-1.5». Ключевые характеристики и результаты испытаний:

1. Работоспособность при экстремально низких температурах: комплекс испытали на Ямале, где он продемонстрировал устойчивость к температурам до -50°C .
2. Высокая скорость передачи данных: в ходе тестов на трассе длиной более 63 км система обеспечила скорость 49,9 Мбит/с – для тропосферной связи это высокий показатель.
3. Значительная дальность: эквивалентная дальность связи превысила 87 км (речь идёт

об одном интервале без ретрансляции, что в условиях арктического рельефа является весомым достижением).

В условиях Арктики «Гроза-1.5» может применяться для организации связи на удалённых месторождениях, где климат и рельеф делают либо невозможным, либо очень дорогим использование традиционного кабеля или спутника. Станция рассчитана на работу в горах, вдоль береговых линий и на Крайнем Севере [4].

Следует отметить, что линия тропосферной связи требует, как минимум двух приёмопередающих станций. Модернизированное оборудование, поставляемое Ростехом, способно обеспечить широкополосную связь в радиусе 210 км в труднодоступных районах. Антенна диаметром 150 см может размещаться на крыше здания и выдерживает влажность до 98% и порывы ветра до 20 м/с.

Система Archer и канадские испытания

Зарубежные страны также активно развивают тропосферные технологии для арктических нужд. Наиболее показательный пример – компания Ultra Intelligence & Communications (Ultra I&C), разработавшая систему Archer™.

В марте 2026 года Ultra I&C объявила о проведении операционных испытаний системы Archer с Вооружёнными силами Канады. Технология предназначена для развёртывания в Арктике и Европе. Archer представляет собой современную эволюцию концепции тропосферной связи – система адаптирована к сегодняшним операционным реалиям.

Ключевые особенности Archer:

1. Быстрота развёртывания: система собирается без инструментов и может быть приведена в рабочее состояние примерно за 15 минут (для сравнения: устаревшие тропосферные системы требовали часов на установку).

2. Компактность и мобильность: значительно уменьшенные размер, вес и энергопотребление по сравнению с устаревшими системами.

3. Автоматизация: следующий поколения графический интерфейс пользователя автоматизирует настройку и автовыравнивание.

4. Помехозащищённость: интегрированное шифрование и средства anti-jamming обеспечивают безопасность связи в условиях радиоэлектронной борьбы.

5. Дальность связи: поддержка линий дальностью до 200 км.

6. Высокая пропускная способность: поддержка голоса, видео и командных данных на высоких скоростях.

Примечательно, что система Archer была выбрана армией США в июне 2025 года, что свидетельствует о растущем интересе к тропосферным технологиям со стороны ведущих мировых вооружённых сил.

Сравнение российского подхода (развитие стационарных и полустационарных станций для нужд промышленности и инфраструктуры) и зарубежного (акцент на мобильность и военное применение) показывает, что обе школы пришли к одному выводу: тропосферная связь незаменима в Арктике.

Сравнительный анализ технологий: место тропосферной связи в арктическом телекоммуникационном ландшафте

Для понимания роли тропосферной связи необходимо рассмотреть её в сравнении с альтернативными технологиями в контексте арктических условий.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). ВОЛС обеспечивает максимальную пропускную способность – проектируемая трансарктическая линия «Полярный экспресс» (Мурманск – Владивосток) имеет протяжённость 12 650 км и пропускную способность 52-104 Тбит/с. Однако прокладка ВОЛС в условиях вечной мерзлоты чрезвычайно дорога и технически сложна. Даже при создании такой инфраструктуры остаются vast районы, к которым кабель не подведён. Кроме того, подводные кабели уязвимы для повреждений – как случайных, так и преднамеренных. ВОЛС – это магистральное решение, но не решение «последней мили» [1, 2].

Спутниковая связь. Спутники VSAT считаются основным вариантом для труднодоступных регионов. До 2035 года на развитие высокоскоростного спутникового интернета направят 116 млрд рублей. Разрабатываются специализированные системы: спутниковая группировка «Экспресс-РВ» на высокоэллиптической орбите (4 аппарата) должна обеспечить непрерывное связное покрытие всей территории страны, а «Арктика-М» (первый спутник запущен в феврале 2021 года) решает задачи мониторинга. Однако спутниковая связь имеет недостатки: уязвимость к магнит-

ным бурям и ионосферным аномалиям, зависимость от наземных шлюзов, потенциальная уязвимость к помехам в конфликтных ситуациях. Кроме того, по мнению ряда экспертов, темпы развития региона и потребности в информационном обслуживании одним развитием спутниковых систем не удовлетворяются, а экономически они весьма дороги.

Тропосферная связь. По сравнению со спутниковой связью, тропосферная связь обладает рядом преимуществ, основными из которых являются меньшие экономические затраты и более высокая помехозащищённость. Она не зависит от космической погоды и состояния ионосферы (в отличие от КВ-связи), работает в любых метеоусловиях (хотя сильные осадки могут создавать дополнительное затухание). Важнейшее преимущество – автономность: две наземные станции образуют замкнутую систему связи, не требующую внешней инфраструктуры.

В то же время тропосферная связь имеет ограничения по пропускной способности – даже современные цифровые системы уступают по этому параметру ВОЛС и лучшим спутниковым каналам. Существует проблема селективных замираний, которые ограничивают ширину полосы частот. Однако применение адаптивных методов передачи, в том числе технологий OFDM и многолучевого приёма, позволяет эффективно бороться с этим явлением.

В авторитетных исследованиях отмечается, что по сравнению со спутниковой связью тропосферная связь обладает меньшими экономическими затратами и более высокой помехозащищённостью. Анализ опыта строительства тропосферных радиолиний показывает, что тропосферные средства связи в Арктике занимают наиболее выигрышное положение. Применение тропосферных средств в коммерческих сетях может быть экономически целесообразнее, чем использование средств спутниковой связи. Немаловажно и то, что за счёт большей протяжённости интервалов между радиостанциями линии загоризонтной связи имеют преимущество перед линиями прямой видимости при организации связи в труднодоступных, горных и малонаселённых районах.

Гибридный подход. Представляется наиболее перспективным не противопоставление

технологий, а их разумная интеграция. Тропосферная связь может выступать в качестве резервного канала для спутниковых систем, обеспечивать связь в локальных зонах, где нет спутникового покрытия, или использоваться как основной канал в отдалённых промышленных кластерах. Как справедливо отмечалось на профильных конференциях, самыми надёжными в Арктике остаются связь на длинных и коротких волнах, но она требует компромисса между устойчивостью и скоростью передачи данных, что вынуждает искать гибридные технологические модели.

Перспективы развития и роль в инфраструктуре Северного морского пути

Развитие Северного морского пути – один из приоритетов государственной политики РФ. Грузопоток по СМП растёт, зимнюю навигацию обслуживают восемь атомных ледоколов – максимальное значение за всю историю арктического сообщения. Однако цифровая инфраструктура пока отстаёт от потребностей.

Ещё в 2021 году «Росатом» начал создавать Единую платформу цифровых сервисов для СМП, в которую планируется инвестировать почти 3 млрд рублей. Тропосферная связь может органично вписаться в эту цифровую экосистему, обеспечивая связь на участках, где нет ВОЛС и ненадёжна спутниковая связь.

Перспективные направления развития:

1. Интеграция с сетями 5G/6G: использование тропосферных станций как backhaul-каналов для базовых станций сотовой связи.

2. Создание единой опорной сети связи АЗРФ: объединение тропосферных, спутниковых и волоконно-оптических сегментов.

3. Автоматизация и роботизация: уменьшение размеров и веса оборудования, полная автоматизация настройки и сопровождения линии [5].

4. Рост скоростей: применение более эффективных методов модуляции и кодирования.

Имеются и международные инициативы. Проект Arctic 6G (2022-2025 годы, координатор – Технологический университет Лулео, Швеция) исследовал, как сети следующего поколения могут обеспечить устойчивую и инклюзивную связь для арктических регионов.

Проблемы и вызовы

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение тропосферной связи в Арктике сталкивается с рядом проблем:

Технические ограничения. Несмотря на прогресс, тропосферная связь всё ещё уступает по пропускной способности ВОЛС. Остаётся проблема селективных замираний, особенно на трассах большой протяжённости.

Энергообеспечение. Тропосферные станции требуют значительной электрической мощности, а в удалённых районах Арктики с этим могут быть проблемы.

Кадровое обеспечение. Эксплуатация даже современных тропосферных систем требует квалифицированного персонала, дефицит которого в Арктике ощущается остро (хотя системы типа Archer идут по пути максимальной автоматизации, сводя потребность в специальной подготовке к минимуму) [6].

Регуляторные вопросы. Частотное планирование в Арктике осложняется наличием множества действующих систем – военных, гражданских, научных. Согласование частотных присвоений требует международной координации.

Конкуренция со спутниковыми системами. Активное развёртывание низкоорбитальных спутниковых группировок (Starlink, OneWeb) создаёт серьёзную конкуренцию наземным системам загоризонтной связи. Однако в условиях растущей геополитической напряжённости и уязвимости спутниковых систем для радиоэлектронного подавления тропосферная связь сохраняет свои позиции как надёжный и неуязвимый канал.

Заключение

Проведённый анализ позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Возрождение технологии. Загоризонтная тропосферная связь переживает второе рождение. Благодаря цифровизации, появлению компактных высокоскоростных станций и автоматизированных систем наведения она из громоздкой военной технологии превращается в востребованный гражданский инструмент.

2. Уникальная применимость в Арктике. Специфические условия Арктической зоны – огромные расстояния, отсутствие наземной инфраструктуры, ненадёжность спутниковой связи в высоких широтах – делают тропосферную связь не просто одним из вариантов,

а во многих случаях единственным технически реализуемым решением.

3. Экономическая целесообразность. Применение тропосферных средств в коммерческих сетях может быть экономически целесообразнее использования средств спутниковой связи, особенно при организации связи на удалённых месторождениях и промышленных объектах.

4. Российские достижения. Разработка и успешные испытания станций семейства «Гроза», включая модернизированную версию «Гроза-1.5», демонстрируют, что Россия сохранила и развивает компетенции в этой области. Положительные результаты испытаний на Ямале подтверждают готовность техники к эксплуатации в экстремально низких температурах.

5. Международный тренд. Активные испытания тропосферных систем Вооружёнными силами Канады (Archer) и интерес армии США к этой технологии свидетельствуют о том, что загоризонтная связь вновь становится приоритетом для ведущих арктических держав.

6. Гибридный подход – оптимальная стратегия. Не следует противопоставлять тропосферную связь спутниковой или волоконно-оптической. Наиболее рациональным представляется создание гибридных телекоммуникационных сетей, в которых каждый из видов связи занимает свою нишу: ВОЛС – магистральные каналы, спутники – широкий охват, тропосферные станции – связь в локальных зонах с отсутствием иной инфраструктуры и резервирование критически важных каналов.

7. Государственная поддержка. Для полноценной реализации потенциала тропосферной связи в АЗРФ необходима системная государственная поддержка: включение тропосферных станций в программы развития инфраструктуры СМП, субсидирование создания опорных сетей в отдалённых районах, подготовка квалифицированных кадров.

Таким образом, загоризонтная тропосферная связь на современном этапе является не пережитком прошлого, а перспективной и востребованной технологией, способной внести существенный вклад в обеспечение устойчивого развития Арктической зоны.

Библиографический список

1. Кулешов И.А., Солозобов С.А., Махортов Ю.Ф., Шевченко В.В. Анализ опыта строительства тропосферных радиолиний и предложения по созданию сети тропосферной радиосвязи в Арктической зоне Российской Федерации // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 1 (145).
2. Якушенко С.А., Забело А.Н., Антонов В.В., Веркин С.С., Егрушев В.Е. Способы повышения эффективности применения тропосферных линий радиосвязи в условиях Заполярья и Арктики // Colloquium-Journal. – 2020. – № 12 (64).
3. Проблемы радиосвязи в Арктике // Техника радиосвязи. – 2022. – № 3 (54). – С. 27-34.
4. Разработка научно-технических предложений по обеспечению многоканальной радиосвязи в районах Крайнего севера // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17, № 4. – С. 44-49.
5. Развитие тропосферной связи для Арктики // Электросвязь. – 2025. – № 3. – С. 2-8.
6. Анализ точности прогнозирования качества работы интервалов цифровых тропосферных радиолиний связи // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 2. – С. 52-59.

ANALYSIS OF THE USE OF OVER-THE-HORIZON TROPOSPHERIC COMMUNICATION IN THE ARCTIC ZONE AT THE PRESENT STAGE

S.S. Verkin, *Candidate of Technical Sciences*

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny (Russia, St. Petersburg)

***Abstract.** This article examines current issues related to the use of over-the-horizon tropospheric communications in the Arctic zone. It analyzes the physical principles of tropospheric communication lines, the historical experience of their use at high latitudes, and the current state of technology. Particular attention is paid to Russian developments (the Groza family of stations) and foreign systems (Archer manufactured by Ultra I&C). A comparative analysis of tropospheric communications with alternative technologies – satellite, radio relay, and fiber-optic communications – is conducted. The advantages and limitations of the tropospheric method in Arctic conditions are identified. A conclusion is drawn regarding the feasibility of the integrated use of tropospheric communications as an element of a hybrid telecommunications infrastructure in the Arctic zone. It is shown that tropospheric communications are currently experiencing a renaissance thanks to digitalization and the emergence of compact, high-speed stations.*

***Keywords:** over-the-horizon communication; tropospheric communication; Arctic zone; Groza-1.5; Archer; Northern Sea Route; hybrid communication networks; telecommunications infrastructure.*