

А.И. Аболиц, А.А. Гриценко

Пространственно-временная
низкоорбитальная
многоспутниковая связь
(ПВ НО-МСС) в
миллиметровом и оптическом
диапазонах волн

Постановка вопроса

- За 55 лет существования спутниковой связи созданы всего 2-3 «больших» коммерческих системы НО-МСС (Иридиум, Глобалстар и, условно, О3b) и несколько менее информативных т.н. «малых» систем передачи данных. Тогда как **количество не реализованных («бумажных») проектов в этой области исчисляется десятками.**
Тем более несоизмеримо число действующих систем с использованием геостационарной орбиты (ГСО).
- Не останавливаясь на известных достоинствах и недостатках тех и других систем, проблемах спроса и т. п., отметим лишь, что **главная причина такого «неравенства»,** казалось бы, лежит на поверхности, ибо **обусловлена прежде всего количеством спутников (КА) в орбитальных группировках (ОГ) НО-МСС.** И, как следствие, **значительно большими затратами на реализацию,** ибо отдельно взятый КА НО-МСС обычно подобен среднему или малому КА на ГСО.
- В связи с этим **периодически встает вопрос о неэффективности НО-МСС как класса (!),** но вместе с тем столь же периодически в мире, в т.ч. и у нас, появляются **новые, зачастую интересные, предложения.**
Однако, в массе своей не решают главной – экономической, а также научно-производственных проблем, в связи с чем по-прежнему повисают в воздухе.
- Разработчики проектов обычно не задаются сакраментальным вопросом, исходя из здравого смысла: **а нельзя ли «обменять» количество КА на их стоимость?**
Правда, уже во всю в мире **производятся и запускаются микро- и наноспутники,** но, во-первых, в основном, для приложений, далеких от «нормальной» спутниковой связи, а во-вторых, пока не видно попыток серьезной оценки подобного рода «обмена».
- Имеются также **иные причины** низкой конкурентоспособности НО-МСС.

Системное несовершенство традиционных решений по НО-МСС: от Иридиума до наших дней (Teledesik, LeoSat, OneWeb, Yaliny и др.)

- Неоправданные производственные и финансовые затраты, приводящие к снижению рентабельности, из-за **сплошного покрытия всей видимой земной поверхности** лучами антенн десятков и сотен СР.
- Наличие **перекрывающихся зон покрытия СР при пространственно-частотных методах разнесения зон, радиолиний** и распределении общего ограниченного орбитально-частотного ресурса (ОЧР), но с приоритетом для ГСО, препятствует развитию НО-МСС.
- Создание достаточно тяжелых (даже средних и малых) платформ с полезной нагрузкой (ПН) НО-МСС **«по образу и подобию» СР на ГСО** и в тех же диапазонах частот не позволяет получить «ожидаемого» выигрыша по пропускной способности, эффективности и стоимости относительно высокоорбитальных систем.
- **Потенциальный выигрыш в энергетике радиолиний** относительно ГСО (28-34 дБ для высот орбит от 1500 до 750 км) **снижается на 10-20 дБ** из-за «экономии» на размерах бортовых антенн (уменьшения по сравнению с КА на ГСО) при сохранении (??) тех же размеров парциальных зон лучей (сотни км в диаметре).
- Использование **земных станций (ЗС) со слабо направленными антеннами** без слежения снижает пропускную способность и помехозащищенность, ограничивая назначение и применение НО-МСС.

Предложения по исправлению ряда недостатков традиционных НО-МСС

- **Создание индустрии телекоммуникационных микро-СР (микроспутников) со стоимостью, ~ обратно пропорциональной их количеству в ОГ**, позволяющее при сопоставимой пропускной способности уменьшить стоимость систем по сравнению с затратами на современные КА-ГСО класса HTS. При этом условии можно уверенно говорить о конкурентоспособности НО-МСС.
- Отказ от повсеместно **глобального распределения и регулирования частотного спектра (ОЧР)** при перекрывающихся зонах обслуживания множества спутниковых систем.
- Переход к естественному **разнесению линий спутниковой связи (ЛСС) в пространстве и времени**, заложенному во всех формах земной жизни (как в живой природе, так и в техногенных областях).
- Обеспечение необходимой ЭМС путем пространственного и пространственно-временного **выборочного (адресного, по запросу) разделения зон обслуживания, парциальных зон покрытия (ПЗП), линий связи в целом**, как на участках КА-Земля, так и между СР.
- Использование с этой целью **пакетных сетей и управляемых многолучевых и сканирующих (следящих) антенн в оптических и ММ диапазонах волн со сверх узкими ПЗП размахом до сотен метров на всех участках радиолиний.**
- Одновременное решение задач повышения **пропускной способности (ПС), помехозащищенности и скрытности** на всех участках ЛСС.
- Построение **ПВ НО-МСС с относительно малым количеством СР в ОГ (20-40) для региональной связи в районах Арктики и Антарктики**, в частности, в оптическом диапазоне, а также обслуживания других территорий с теми или иными перерывами связи.

Системная стратегия ПВ НО-МСС

(другая парадигма спутниковой связи, «Электросвязь», 2014, №8)

- **Целевые орбитальные (стратосферные, атмосферные) микроспутники-ретрансляторы (МСР)** с долей массы и энергопотребления служебных систем не более (10-15)% – вместо «классических» средних и малых КА с предоставлением ресурсов для ПН «по вторичному, остаточному принципу».
- **Выборочное покрытие** зон обслуживания по запросу абонентов сверхузкими адресными лучами бортовых антенн – вместо сплошного покрытия территорий и регионов
- **Пространственно-временное динамичное разнесение** линий связи СР-ЗС, ЗС-СР, СР-СР – вместо пространственно-частотного с жестким административным распределением частотного ресурса.
- **Следящие антенные системы** КА и ЗС с высокоэнергетическими, управляемыми по командам (координатно-адресными) лучами как основной функциональный компонент – вместо наращивания ЭИИМ за счет энергоресурса КА и ЗС.
- **Миллиметровый и/или оптический диапазоны волн**, позволяющие получать сверхузкие (сотые и тыс. доли град.) лучи и зоны покрытия (десятки и сотни метров) – **без существенного утяжеления и усложнения МСР.**
- **Проект построения пилотной системы НО-МСС оптического диапазона для обслуживания полярных (высокоширотных) районов Арктики и Антарктики с пропускной способностью при ШПД до 1 Гбит/с.**

Основные направления работ по пилотному Проекту:

- 1. Формирование тактико-технических характеристик и пространственно-временной структуры, параметров, принципов функционирования системы, ее сегментов и комплексов на базе существующих лазерно-фотонных и оптоэлектронных технологий.
- 2. Обоснование и выбор орбитального построения, облика малых (микро) космических аппаратов (КА) стоимостью порядка \$(1-2)M\$, их служебных подсистем (энергоснабжения, ориентации и т.д.), принципов поддержания положения и восполнения СР на орбите.
- 3. Анализ путей обеспечения энергетике лазерно-оптических линий связи (с учетом атмосферы), а также межспутниковых линий, с расчетом их пропускной способности при широкополосном доступе (ШПД) со скоростями до 1 Гбит/с на абонентском участке и количестве одновременно работающих ЗС пользователей не менее 10000.
- 4. Анализ существующих и разработка необходимых способов (технологий) управления и формирования управляемых сканирующих лучей СР и ЗС для поддержания требуемой пропускной способности и многостанционных алгоритмов предоставления связи.
- 5. Изыскание организационно-технических форм производства легких (микро) КА, средств их группового выведения на низкие орбиты и путей решения соответствующих процедурно-правовых вопросов – на базе создания коопераций предприятий среднего и малого бизнеса телекоммуникационного, оптико-электронного и космического профилей.

Основные направления работ по Проекту (продолжение):

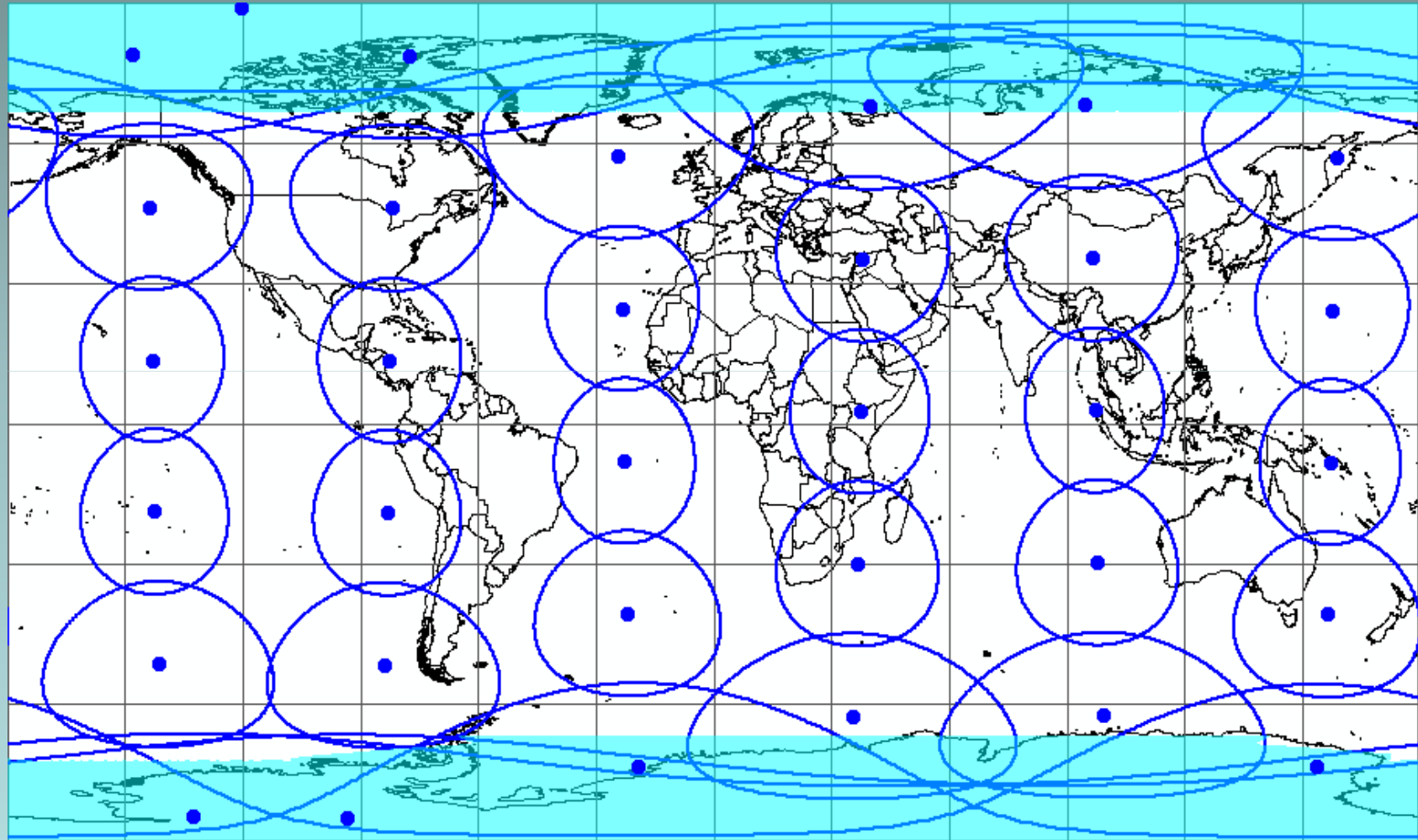
- 6. Детальный анализ, опробование и выбор существующих лазерных, оптоэлектронных, радиофотонных и др. технологий, оборудования, компонентов от многочисленных разработчиков, производителей и поставщиков, пригодных для применения в беспроводных (free space), в частности, космических, линиях связи.
- 7. Разработка системно-технических решений (вариантов) по реализации Проекта, включая обеспечение служебных функций управления связью, земными средствами и КА на орбите, как необходимое условие решения целевых задач системы.
- 8. Технико-экономическое обоснование принятых решений и путей их внедрения для организации корпоративных и операторских сетей связи.

По предварительным оценкам:

- Стоимость разработки концептуальных предложений 15 млн. руб.
- Стоимость системного проектирования 35 млн. руб.
- Стоимость эскизно-технического проекта (НИОКР) 120 млн. руб.
- Стоимость создания и развертывания системы не более \$100М.

Работы по концепции и системному проекту предполагается проводить творческим коллективом специалистов с многолетним стажем системного анализа, проектирования, разработок по спутниковой связи и указанным направлениям, на базе ИКЦ «Северная Корона», с привлечением представителей специализированных организаций в той или иной области.

Пример формирования арктической региональной зоны обслуживания с помощью ОГ из 33 КА (3 плоскости по 11 КА).
Высота орбиты 1000 км, наклонение 89гр., угол места 25гр.

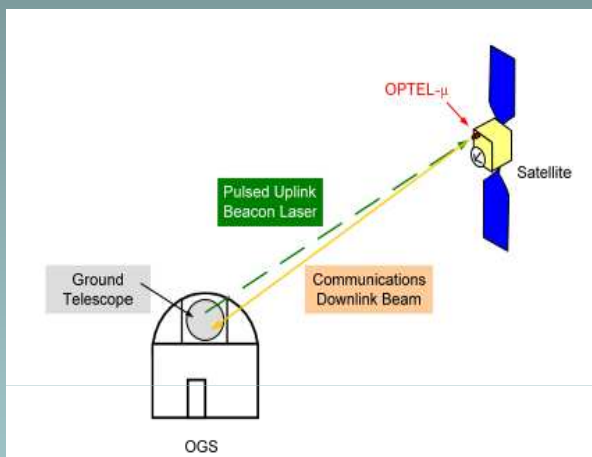


Проблематика и задачи реализации пилотного проекта ПВ НО-МСС

- Разработка целевых ретрансляционных платформ и их служебных подсистем (энергопитание, ориентация и стабилизация, маяки, конструкция и т.д.) с массо-габаритными показателями, удовлетворяющими требованиям к классу микроспутников.
- Минимизация стоимости микро-СР (КА) до 1-2 млн. долл. при ЭИИМ и чувствительности (добротности) бортового приемо-передающего оборудования (прежде всего антенных, излучающих, и приемных элементов), обеспечивающих скорости передачи не менее 1 Гбит/с на всех участках линий связи (ЛС)
- Использование существующих и разработка новых алгоритмов отклонения лучей и управления лучами при многостанционном многоспутниковом доступе (МССД) с пространственно-временной синхронизацией ЛС,
- Изыскание и развитие путей минимизации влияния облачности, осадков, турбулентности атмосферы на качество и надежность передачи информации
- Разработка мобильных земных станций со следящими антеннами в указанных диапазонах волн.

Примеры опытной разработки технологий по тематике Проекта

1. Оптическая линия (КА-ЗС) для малых спутников и ее основные параметры (OPTEL, RUAG Space)



Level	Features, Parameters and values	
	Feature	Value
System	Supported LEO altitudes	400km 900km
	Downlink Wavelength	1525nm .. 1565nm
	Uplink Wavelength	1064nm
	Channel Data Rate (Raw / User)	1.25 / 1.0 Gbps
	No. of optical downlink channels	2
	No. of optical uplink channels	1 (service channel)

Level	Features, Parameters and values	
	Feature	Value
System	Downlink modulation format	OOK / 8-PPM
	Uplink modulation format (for ARQ)	16-PPM
Space Terminal	3 physical units, goal spec	4.5kg, 4.5ltr, 45W
Space Terminal	Field of Regard	70deg cone angle (option: hemispherical)
	Transmit wavelength band	1525nm .. 1565nm
	Space beacon laser (optional)	808nm
	Internal buffer memory size	100– 200 Gbyte
	Mass Memory I/F	SpaceWire (alternatives available)
	Power I/F (unregulated)	24V up to 36 V DC
Ground Terminal	Mount configuration	ALT-ALT
	Field of Regard	0-90° El, 0..360°
	Telescope diameter	0.6m
	4-beam pulsed uplink beacon	1064nm (Laser Class 1M)

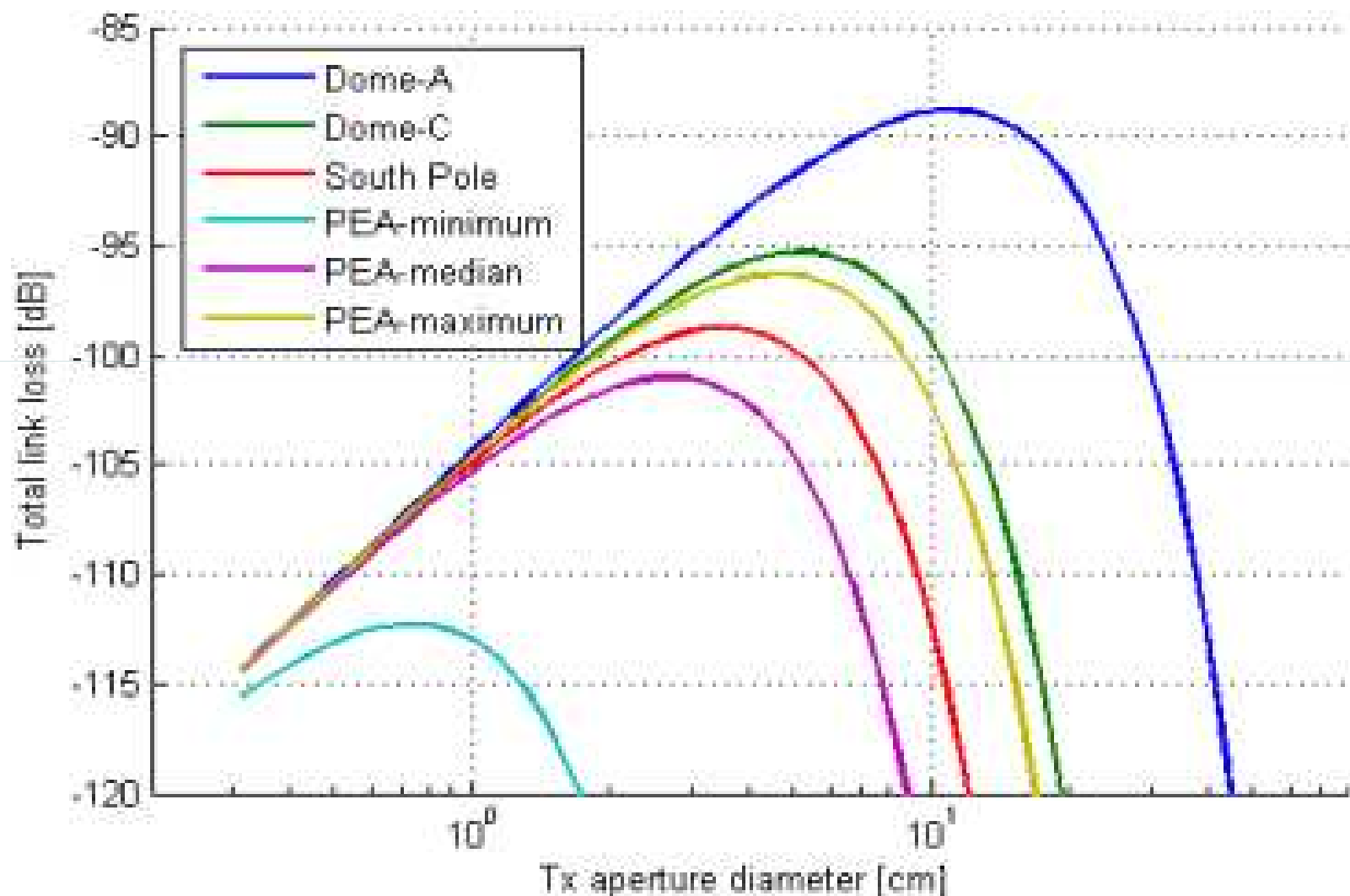
Примеры (прототипы) опытной разработки технологий по тематике Проекта
Бортовой терминал КА (вверху), включающий 3 модуля: оптический, лазерный, электронный
Земные терминалы 0,6м (внизу): стационарный, мобильный (транспортабельный)



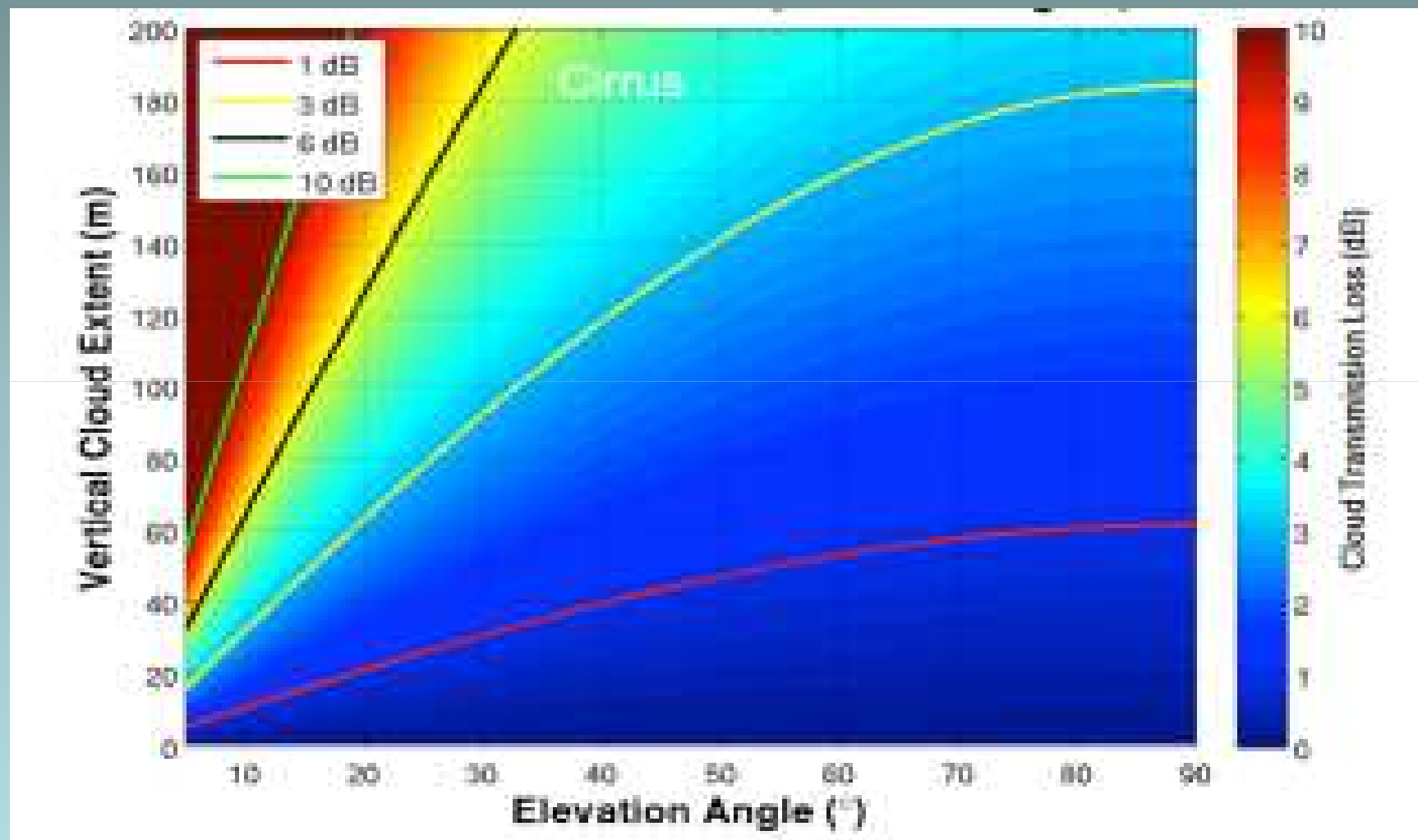
2. Оптическая линия через ГСО-КА *EDRS* из Антарктиды при скорости передачи до 1800 Мбит/с (1064 nm, без учета блокирования облаками)

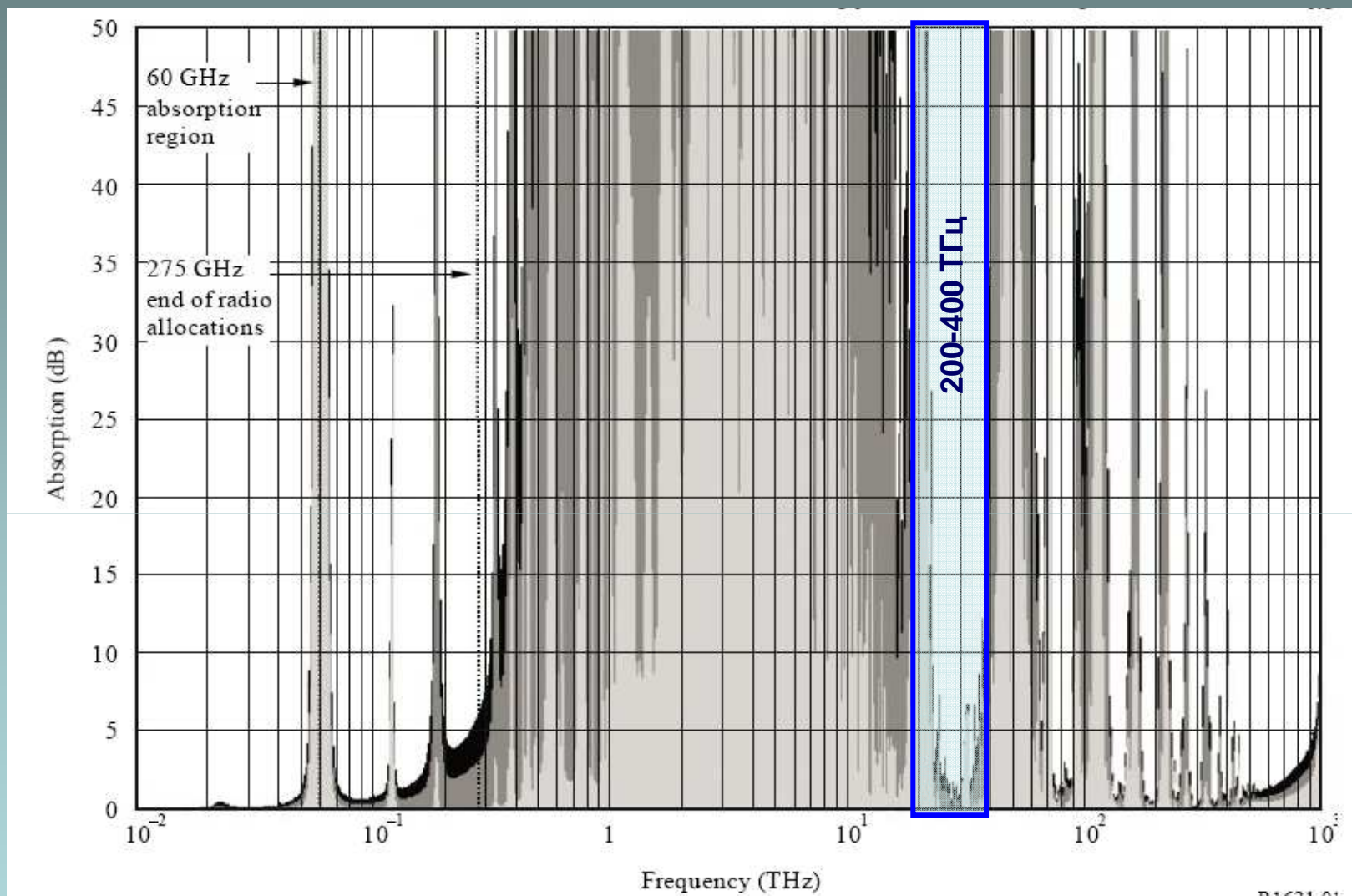
Parameter	Fried parameter r_0 value @ 1064nm		
	<i>minimum 1.5cm</i>	<i>median 5.5cm</i>	<i>maximum 9.5cm</i>
Tx aperture diameter [cm]	0.72	2.70	4.72
Tx antenna gain	83.54	95.02	99.87
Tx optical loss	-3.00	-3.00	-3.00
Free-space loss	-293.63	-293.63	-293.63
Atmospheric loss	-3.00	-3.00	-3.00
Spreading loss	-1.34	-1.39	-1.41
Beam wander loss	-3.82	-3.85	-4.05
Rx antenna gain	112.01	112.01	112.01
Rx optical loss	-3.00	-3.00	-3.00
Total link loss	-112.26	-100.85	-93.23
Rx Sensitivity BER=10 ⁻⁸	-51.00	-51.00	-51.00
Required Tx power [dBm]	61.26	49.85	45.23
Required Tx power [W]	1338.09	96.70	33.34

Зависимость суммарных потерь на линии от апертуры антенны



Зависимость потерь в облаках от угла места земной станции





Поглощение в атмосфере для вертикальной трассы

Результаты объемных исследований состояния проработки в мире отдельных вопросов по данной тематике и проблемы в целом, существующие технологические решения в смежных и близких областях (опто-радио-фотоника, электроника, космическая техника) не оставляют сомнений в технической и экономической реализуемости ПВ НО-МСС в оптическом диапазоне волн и ее преимуществах для региональной спутниковой связи.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !