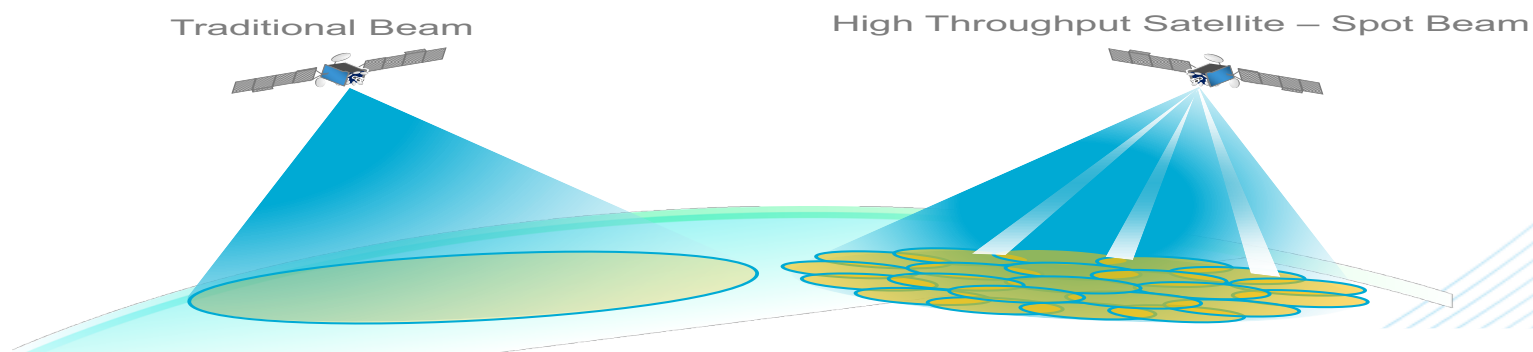


Региональный семинар МСЭ «Тенденции развития и опыт использования технологий спутниковой связи» Минск, Республика Беларусь, 22-23 мая 2018 г.

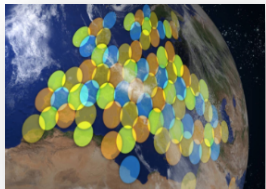


## Исследование новых технологий спутниковой связи: спутники с высокой пропускной способностью (HTS) и многоспутниковые НГСО системы

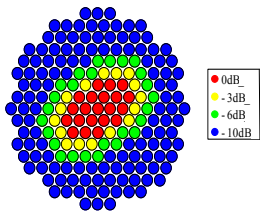
Докладчик: **Симонов Михаил Михайлович**  
Ведущий научный сотрудник, к.т.н.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
**НАУЧНО–ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИО** 2018

## Содержание доклада



- ✓ **Спутники с высокой пропускной способностью (High Throughput satellites - HTS)**



- ✓ **Адаптивные системы спутникового вещания РВСС в диапазоне частот 21 ГГц**



- ✓ **Современные многоспутниковые НГСО системы**

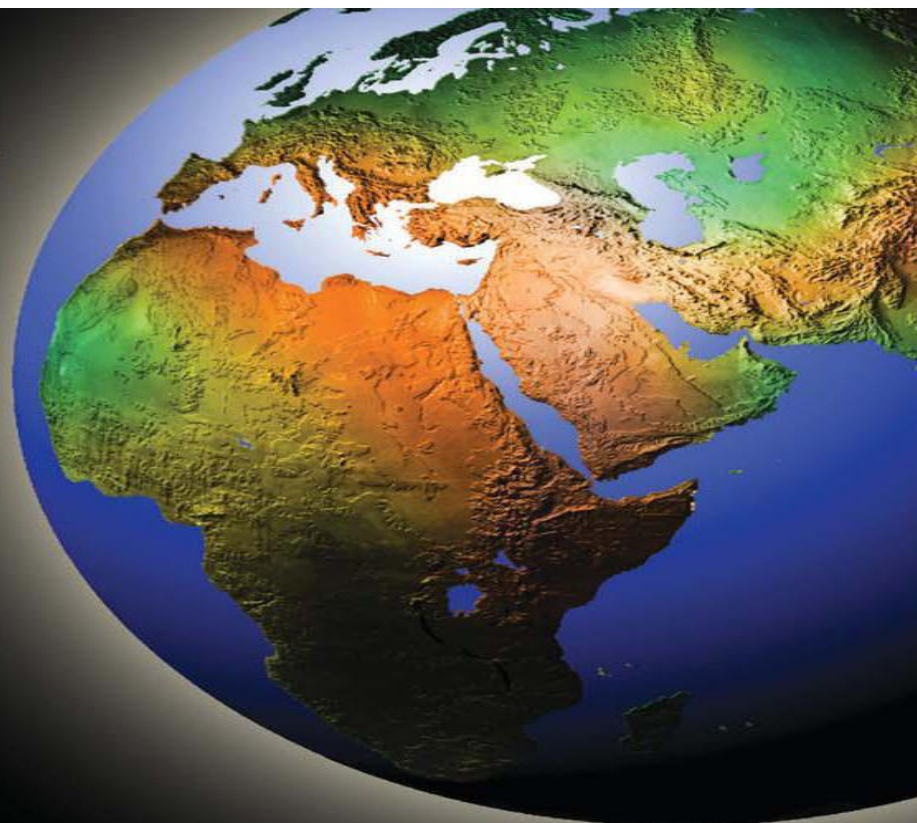


## Международные проблемы создания новых систем спутниковой связи и вещания в начале XXI века

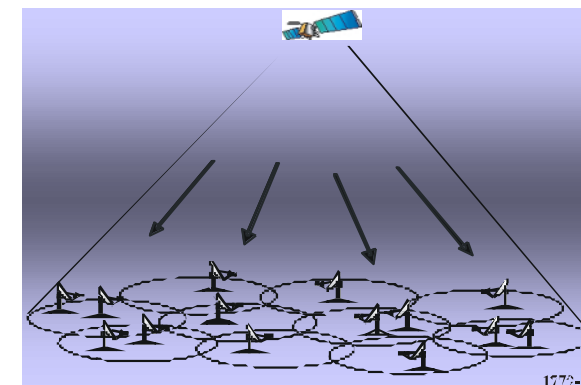
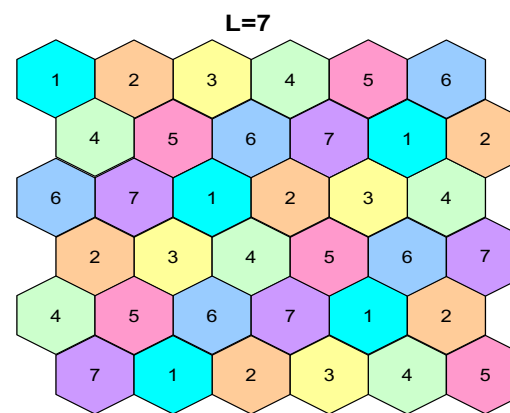
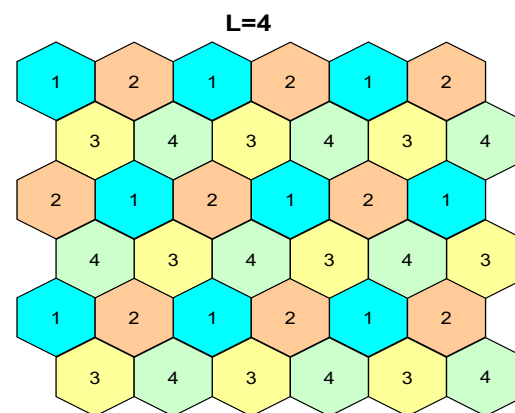
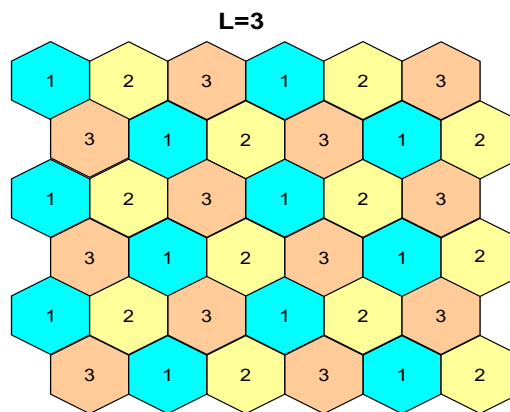
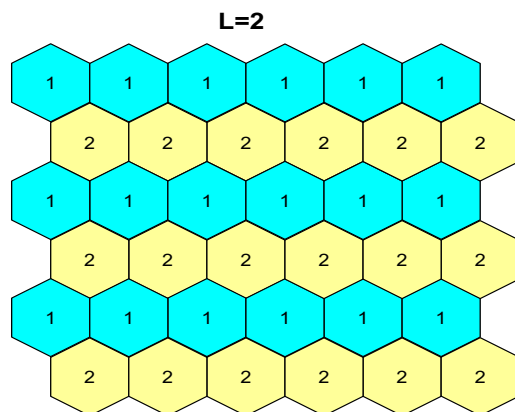


### ПРОБЛЕМЫ:

- Наличие острого дефицита в получении и реализации частотного ресурса на ГСО
- Сложная помеховая обстановка из-за перегрузки ГСО спутниками не завершившими процедуру координации («условная» регистрация спутниковых сетей в МСРЧ по п.11.41 РР)
- Невозможность успешной координации и размещения на ГСО новых спутниковых сетей в освоенных диапазонах частот ( L, S, C, Ku )



# Варианты повторного использования полос частот в парциальных лучах бортовой МЛА (HTS)



Варианты  
развязки зон покрытия МЛА:

**L = 7** – 7-частотный, ( $F1 \div F7$ )

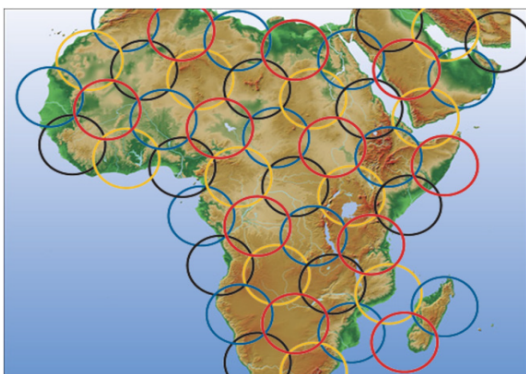
**L = 4** – 4-частотный, ( $F1 \div F4$ )

**L = 3** – 3-частотный, ( $F1 \div F3$ )

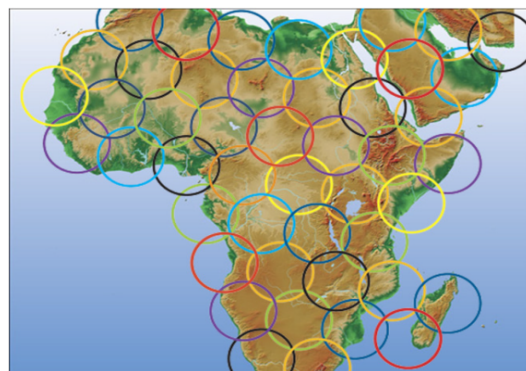
**L = 2** – 2-частотный, ( $F1 \div F2$ )



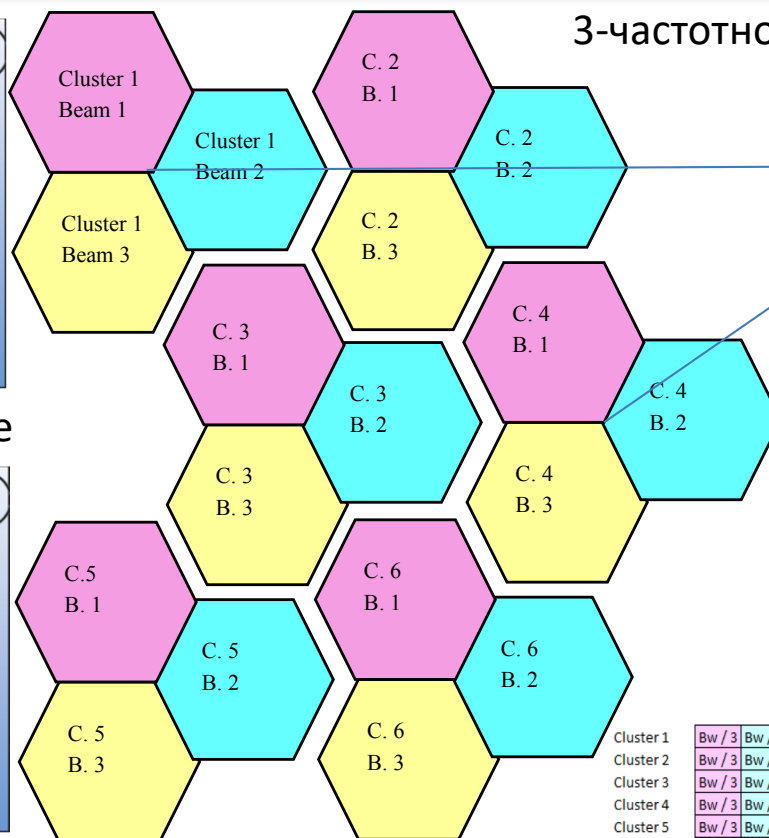
# Особенности построения спутниковых систем с высокой пропускной способностью (HTS)



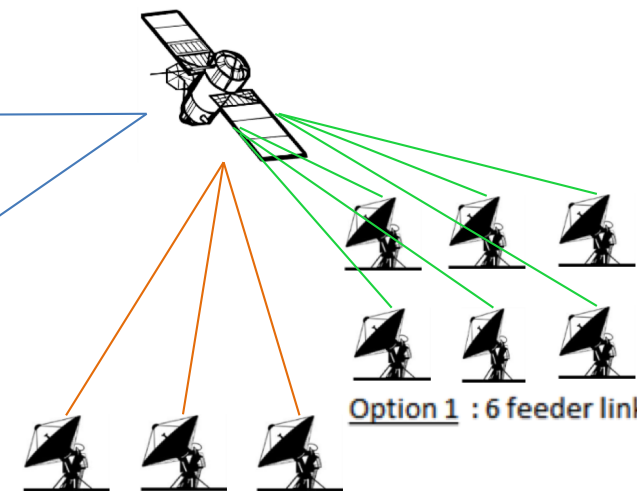
4-частотное использование



8-частотное использование



3-частотное использование



Option 1 : 6 feeder links

Option 2 : 3 feeder links

Option 1 : 6 feeder links

|               |    |
|---------------|----|
| Feeder Link 1 | Bw |
| Feeder Link 2 | Bw |
| Feeder Link 3 | Bw |
| Feeder Link 4 | Bw |
| Feeder Link 5 | Bw |
| Feeder Link 6 | Bw |

Option 2 : 3 feeder links (when more spectrum allocated to FSS)

|               |    |    |
|---------------|----|----|
| Feeder Link 1 | Bw | Bw |
| Feeder Link 2 | Bw | Bw |
| Feeder Link 3 | Bw | Bw |

|           |        |        |        |
|-----------|--------|--------|--------|
| Cluster 1 | Bw / 3 | Bw / 3 | Bw / 3 |
| Cluster 2 | Bw / 3 | Bw / 3 | Bw / 3 |
| Cluster 3 | Bw / 3 | Bw / 3 | Bw / 3 |
| Cluster 4 | Bw / 3 | Bw / 3 | Bw / 3 |
| Cluster 5 | Bw / 3 | Bw / 3 | Bw / 3 |
| Cluster 6 | Bw / 3 | Bw / 3 | Bw / 3 |

Total User Link Bandwidth = 6 . Bw (Hz)

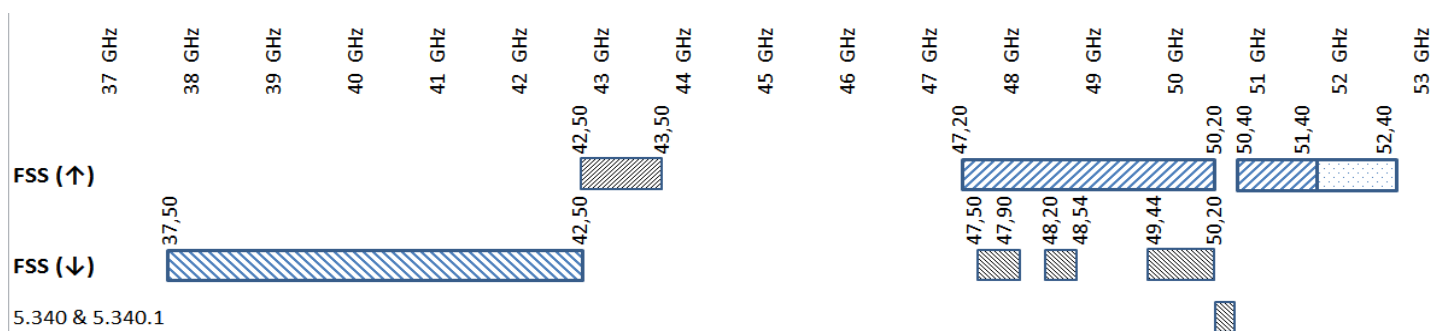
Total User Link Bandwidth with either option 1 or 2 = 6 . Bw (Hz)

frequency →

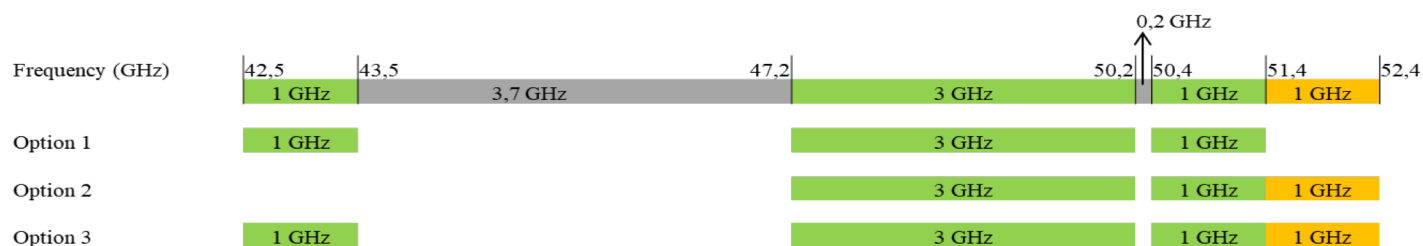
# Требования к спектру для обеспечения фидерных линий спутниковых систем с высокой пропускной способностью



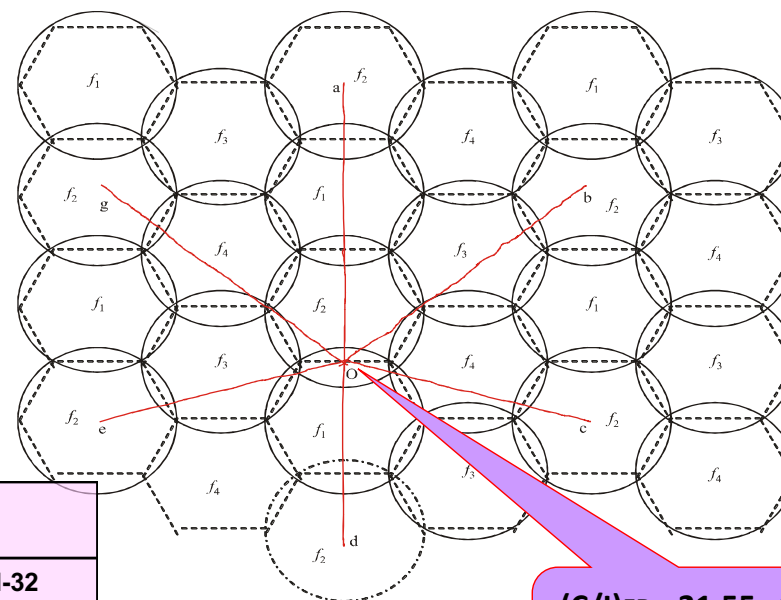
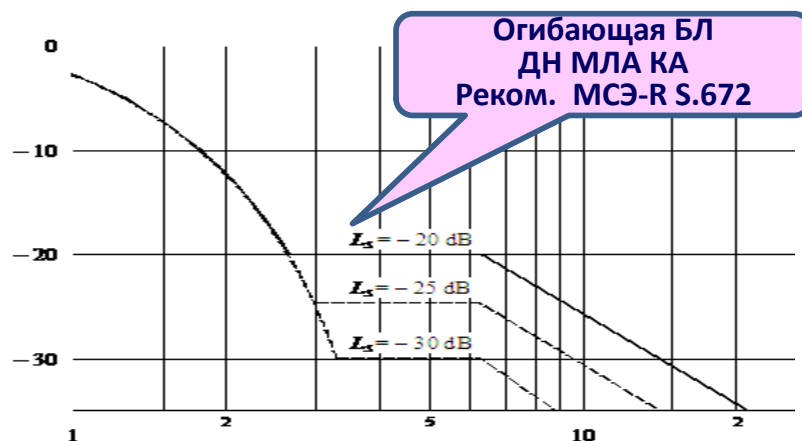
Текущее распределение спектра в диапазонах 40/50 ГГц



Предложения по использованию спектра в диапазонах 40/50 ГГц в рамках вопроса 9.1.9 ВКР-19



## Пример расчета уровня межлучевых помех $(C/I)_{FR}$ для 4-х частотного варианта МЛА спутника HTS



| Внутрисистемные помехи в МЛА |                    | СКК DVB-S2<br>Требуемое отношение $C/(I+N)$ , дБ |                    |                      |                      |
|------------------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------|----------------------|
| Уровень БЛ<br>ДН антенны     | $(C/I)_{FR}$<br>дБ | ФМ-4<br>1/4 - 9/10                               | ФМ-8<br>3/5 - 9/10 | АФМ-16<br>2/3 - 9/10 | АФМ-32<br>3/4 - 9/10 |
| -30 дБ                       | 21,55              | - 2,3 / 6,5                                      | 5,5 / 11,0         | 9,0 / 13,2           | 12,7 / 16,1          |
| -25 дБ                       | 16,55              | - 2,3 / 6,5                                      | 5,5 / 11,0         | 9,0 / 13,2           | 12,7 / 16,1          |
| -20 дБ                       | 11,55              | - 2,3 / 6,5                                      | 5,5 / 11,0         | 9,0 / 13,2           | 12,7 / 16,1          |

Пример расчета помех  
для гексагональной сетки лучей МЛА  
с использованием 4-х частот ( $F_1, F_2, F_3, F_4$ )  
(Рекомендация МСЭ-R S.1782)

## Зависимость спектральной эффективности СКК от $(C/N)_{ref}$ (Линейный канал - АБГШ)



### Эволюция стандартов Интерактивных Широкополосных Спутниковых Служб

DVB-S – 1997 г.

DVB-S2 – 2005 г.

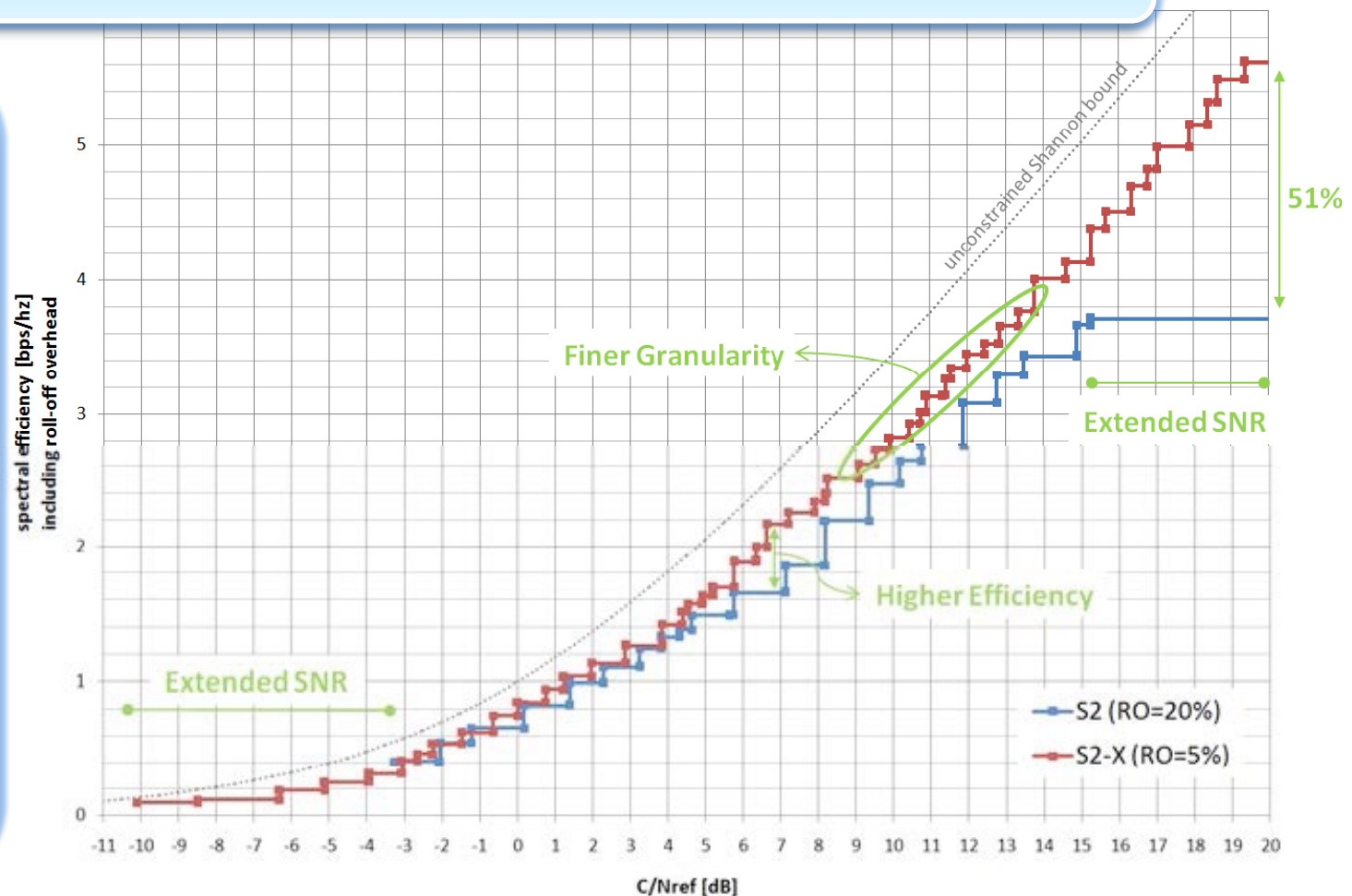
DVB-S2-X – 2015 г.

DVB-S (Roll\_off) = 35%

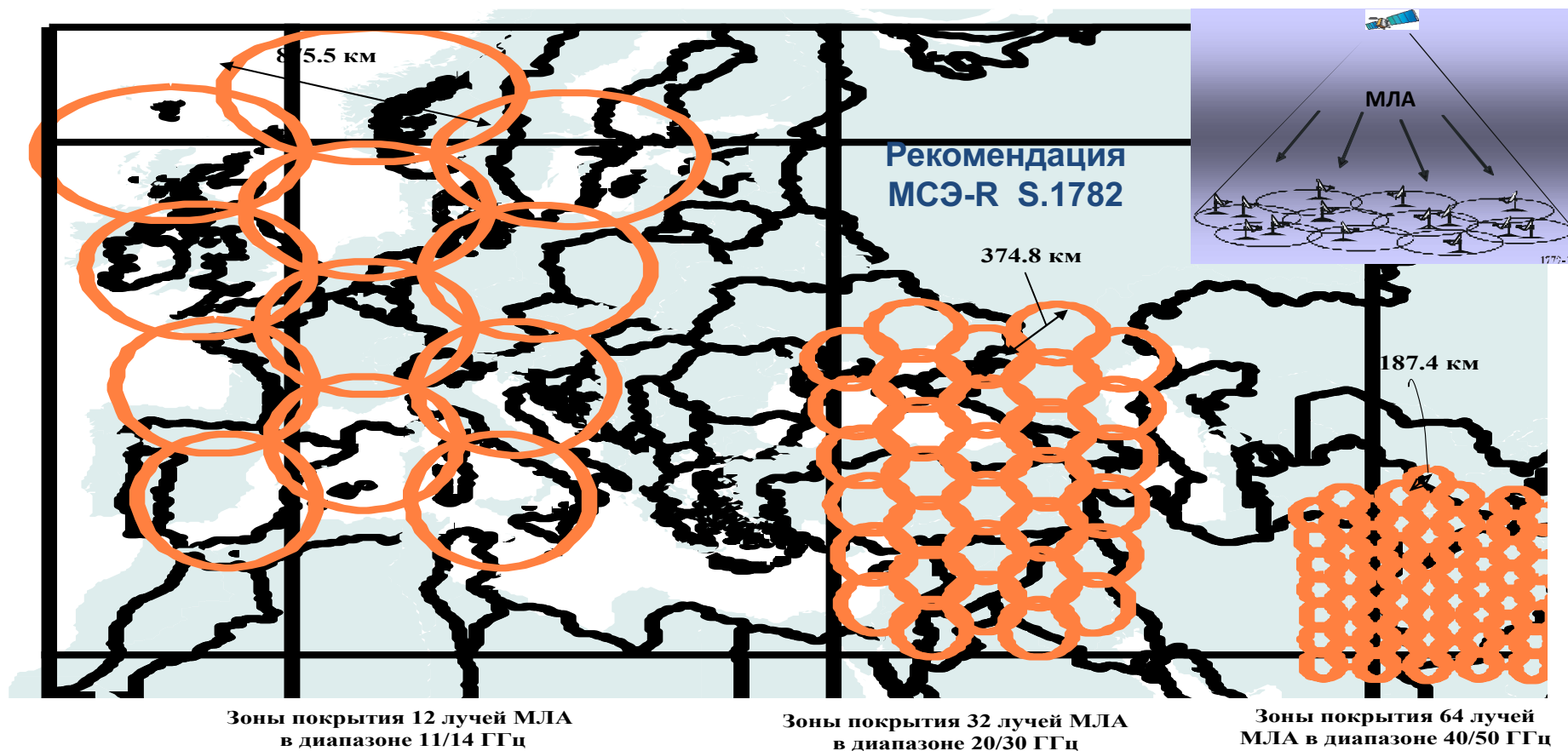
DVB-S2 (Roll\_off) = 20%

DVB-S2X (Roll\_off) = 5%

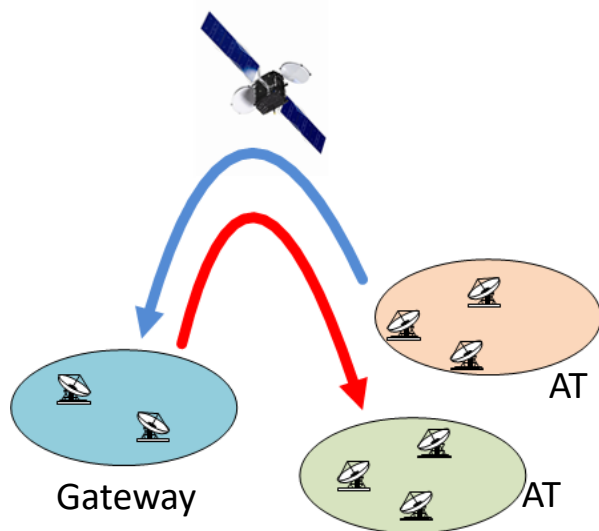
Рост дополнительных потерь  
за счет МСИ на 0,1 – 0,3 дБ



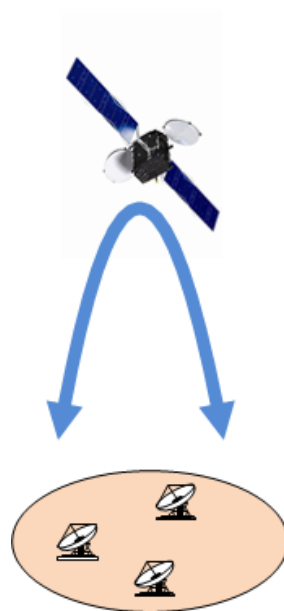
## Примеры многолучевой структуры спутников HTS для широкополосного доступа к Интернет



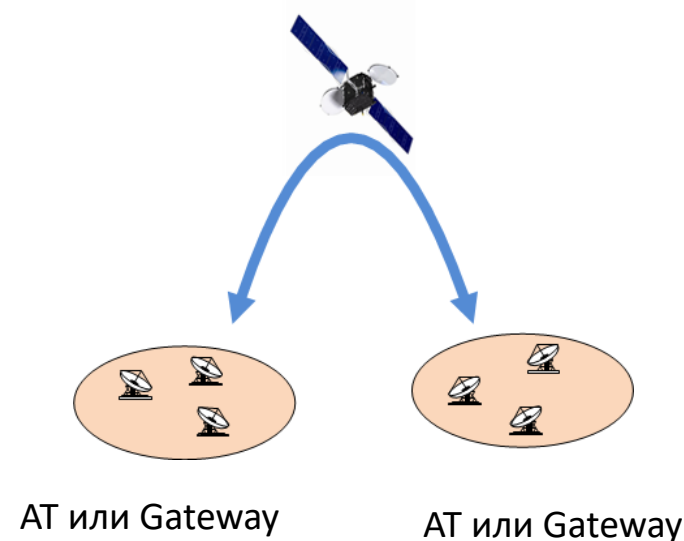
## Открытая архитектура спутниковых систем с высокой пропускной способностью (HTS)



Звезда



АТ или Gateway  
Абонент –  
абонент/Gateway



Сеть полного доступа  
(Mesh)

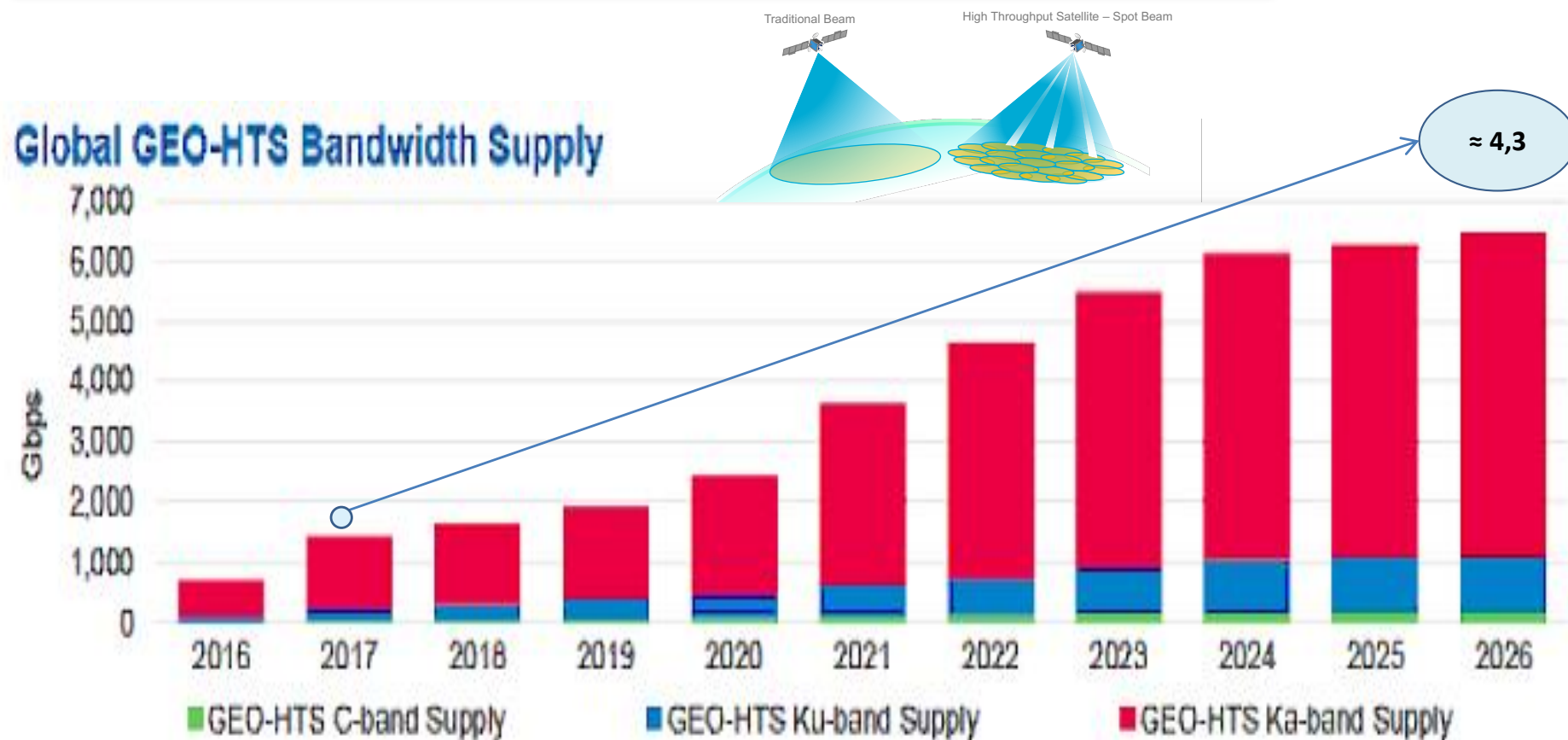


## Сравнительный анализ эффективности спутниковых систем с высокой пропускной способностью (HTS)



| Спутник                            | Эквивалентная цена спутника на орбите | Частотный ресурс, МГц   | Емкость, Гбит/с |
|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------|
| Традиционный спутник               |                                       |   |                 |
| Ямал 402                           | 280 млн. \$                           | 2 376   | 4.8             |
| Глобальные системы на основе HTS   |                                       |   |                 |
| Inmarsat 5, сеть Xpress            | 400 млн.\$                            | 5 760 (Ka) фиксированные лучи<br>1 500 (Ka) перенацеливаемые лучи | 18.5            |
| IS-29e, сеть EpicNG                | 500 млн.\$ (экспертная оценка)        | 9 000 ( Ku) 450 ( Ka) 720 (C)                                     | 25              |
| Региональные системы на основе HTS |                                       |   |                 |
| Ka-Sat                             | 500 млн.\$                            | 33 000  | 90              |
| Viasat-1                           | 500 млн.\$                            | 60 000  | 140             |
| Viasat-2                           | 650 млн.\$                            | 130 000   | 350             |

## Прогноз роста суммарной пропускной способности спутниковых ГСО сетей нового поколения (HTS)

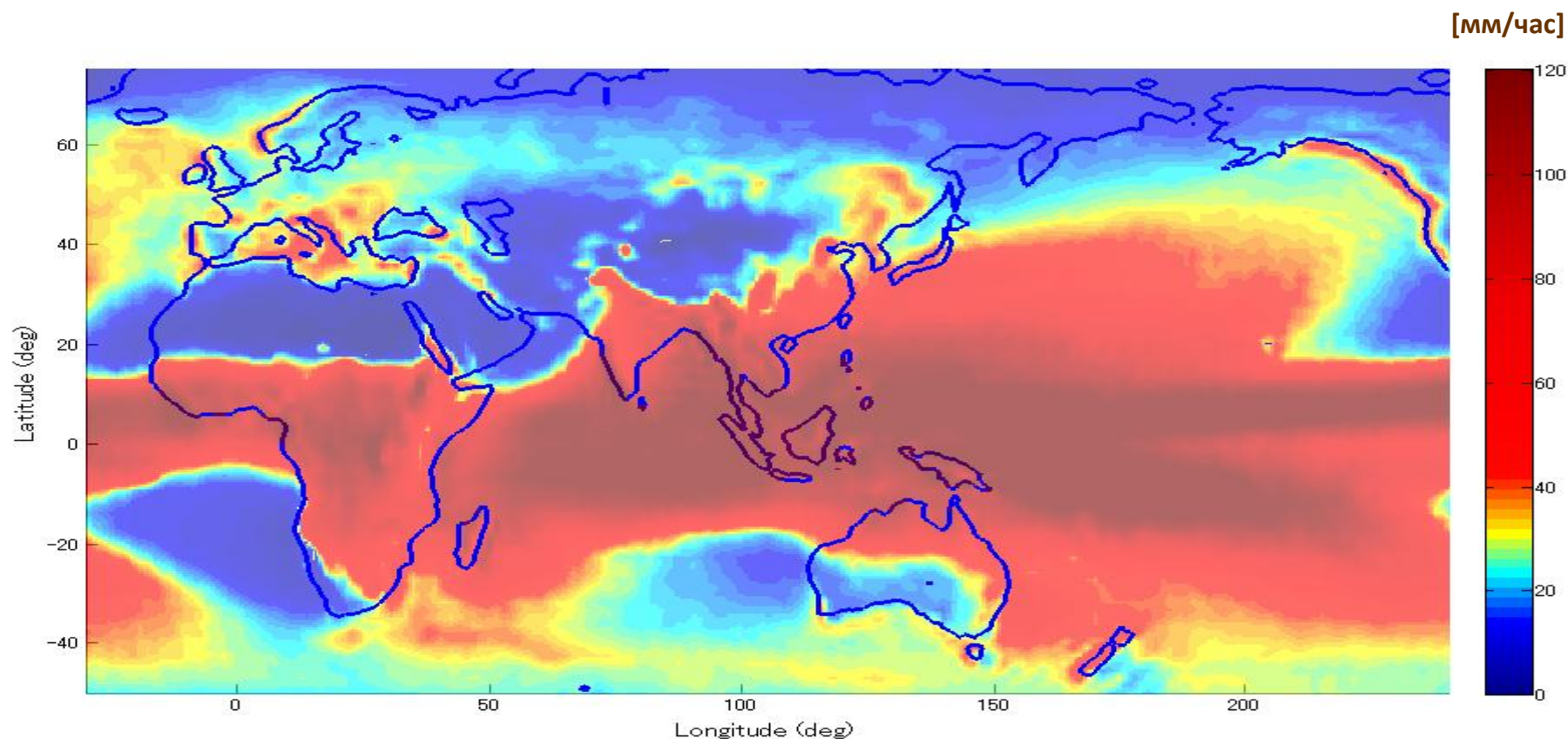


Source: NSR

**Распределение интенсивности осадков  
(R 0,01%) на территории Районов 1 и 3 (МСЭ)**

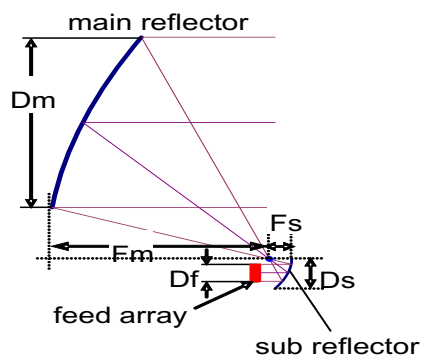


**Рекомендация МСЭ-R P.837-5**

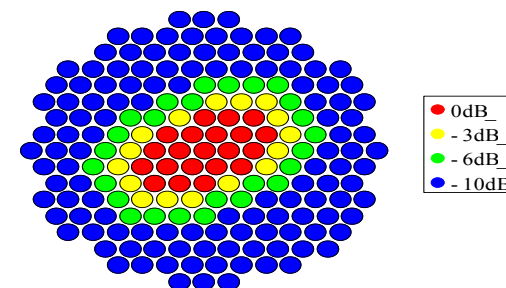


**Характеристики осадков, используемые при моделировании распространения радиоволн**

## Передающая МЛА КА РвСС с адаптивным управлением ЭИИМ в локальных зонах осадков ( диапазон 21 ГГц)



Конструкция бортовой передающей антенны (МЛА) в диапазоне 21 ГГц

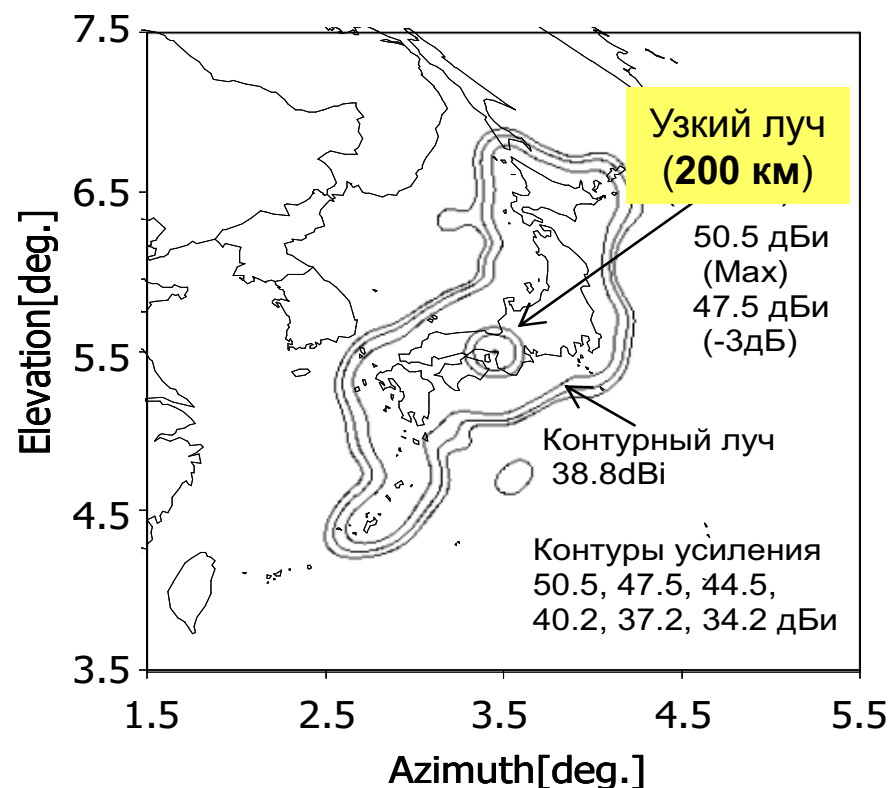
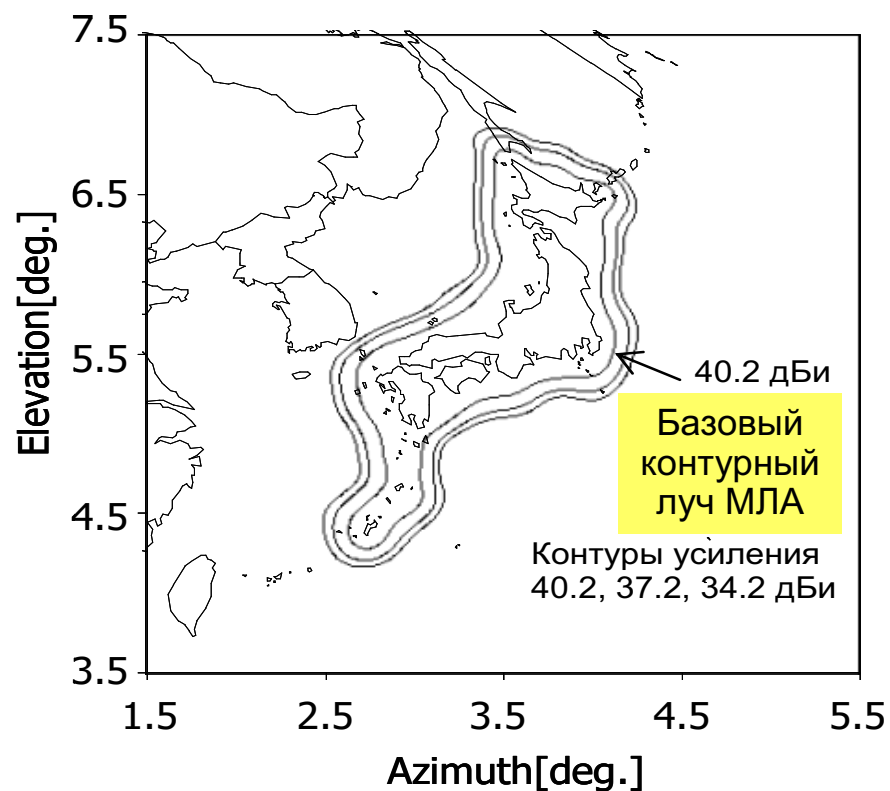


Структура облучающей системы из 188 облучателей

### Характеристики бортовой передающей антенны КА в диапазоне 21 ГГц

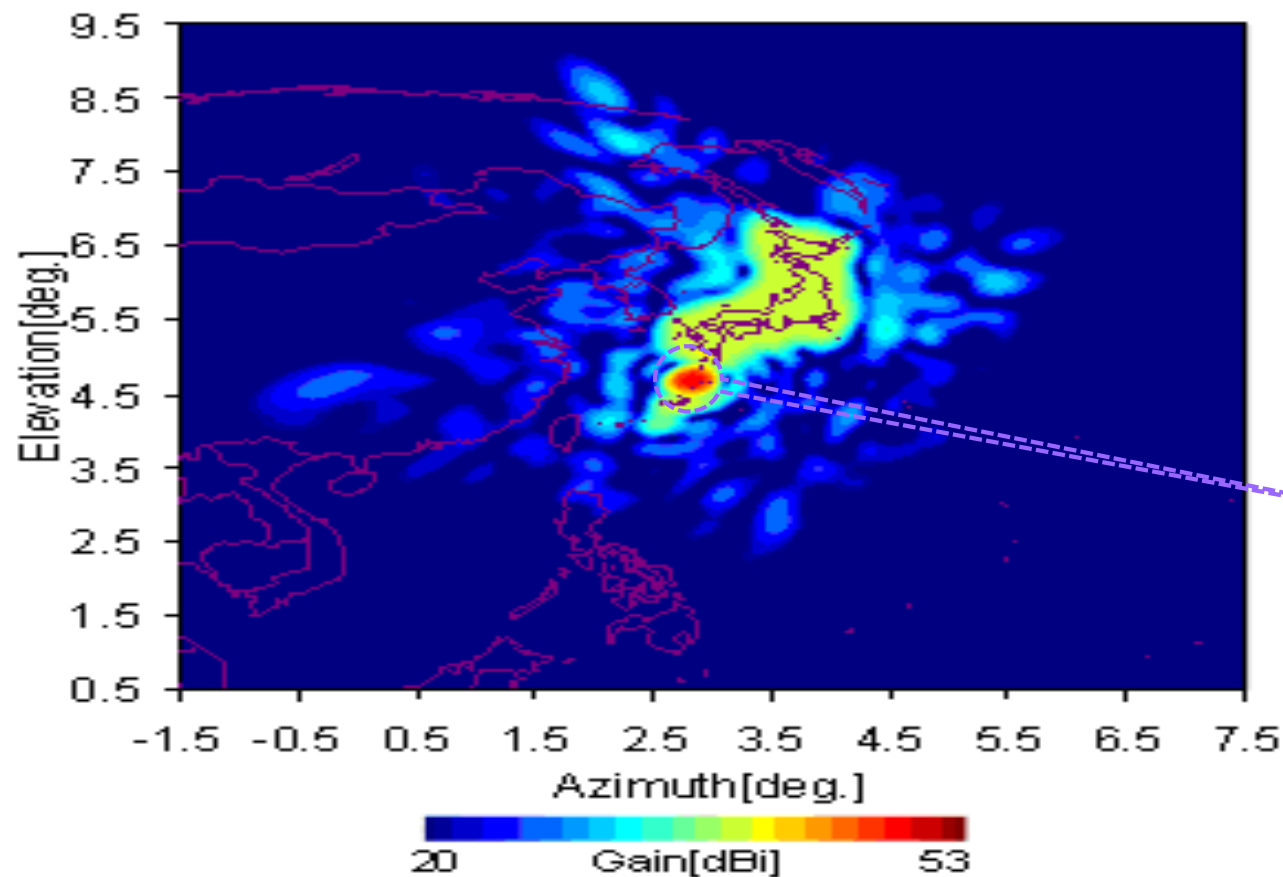
| Характеристика бортовой МЛА                           | Величина        |
|---|-----------------|
| Диаметр основного рефлектора ( $D_m$ ), м             | 4.0             |
| Фокусное расстояние основного рефлектора ( $F_m$ ), м | 4.0             |
| Диаметр облучающей решетки ( $D_f$ ), м               | 0.4             |
| Диаметр контррефлектора ( $D_s$ ), м                  | 0.52            |
| Фокусное расстояние контррефлектора ( $F_s$ ), м      | 0.4             |
| Число облучателей в облучающей системе                | 188             |
| Расстояние между соседними облучателями в решетке     | 1.8 длины волны |
| Поляризация сигнала                                   | Линейная        |

## Пример адаптивного управления ЭИИМ передающей МЛА в зоне покрытия КА РвСС (21 ГГц)

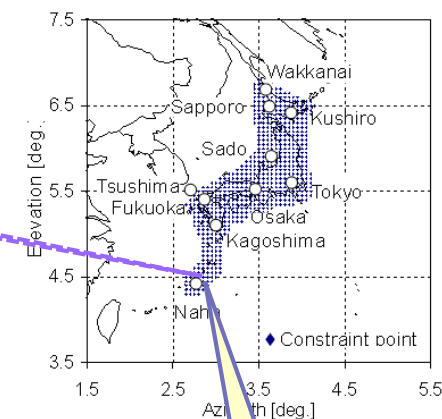


**Рекомендация МСЭ-R ВО.1659 - Mitigation techniques for rain attenuation  
for BSS systems in frequency bands between 17.3 GHz and 42.5 GHz**

Пример узкого луча МЛА ( $\varnothing \approx 220$  км ) с высокой ЭИИМ  
в южной части зоны покрытия КА ( 21 ГГц )



Зона  
покрытия



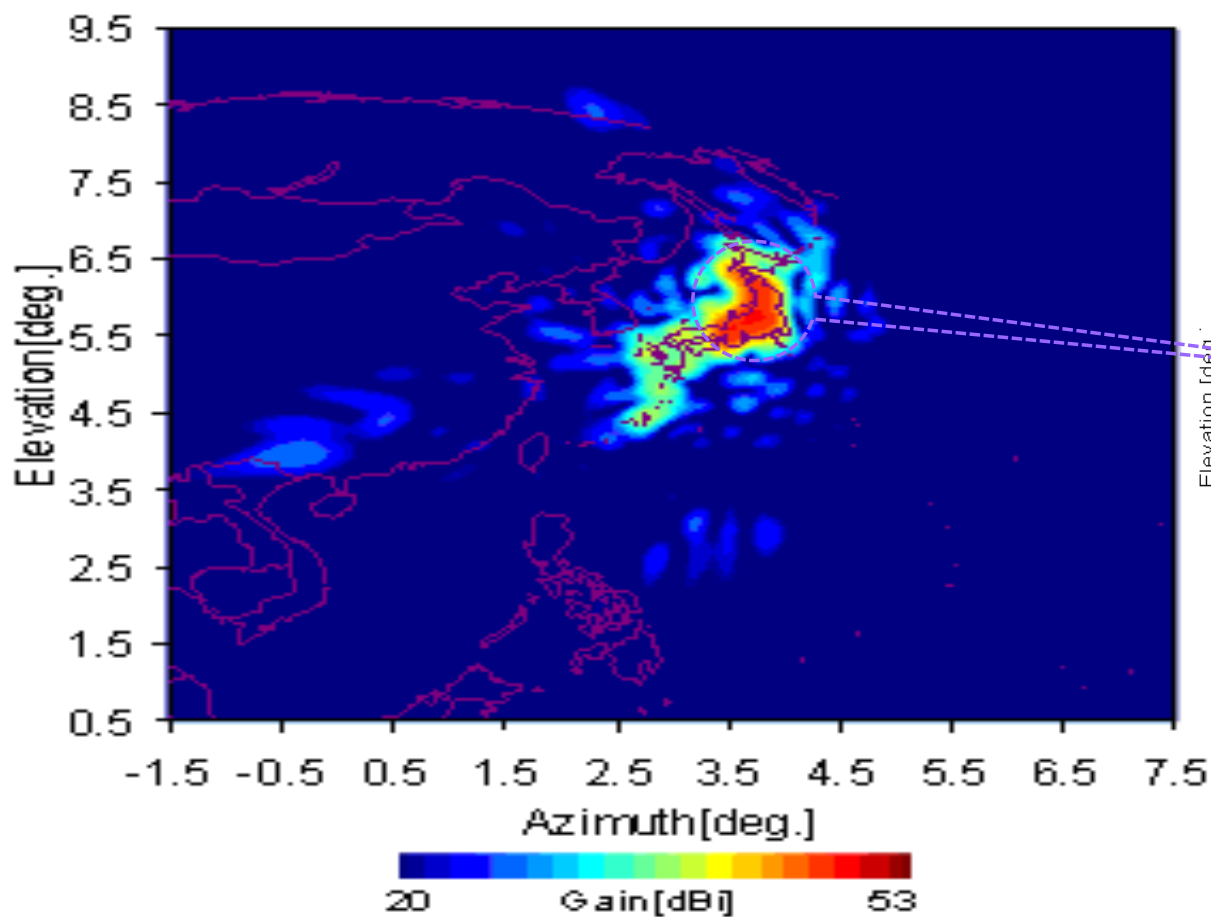
50,3  
дБи

Усиление  
МЛА КА  
Гант, дБи

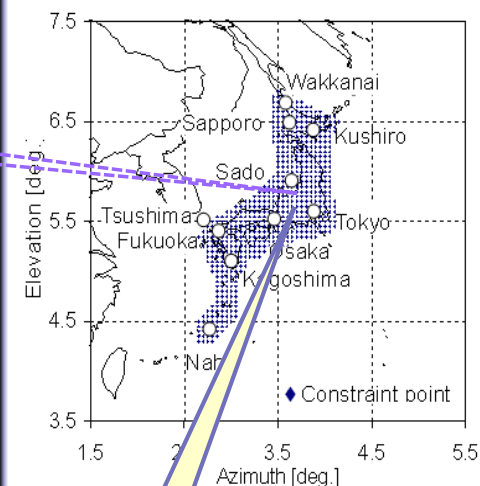




Пример луча МЛА (Ø > 400 км) с высокой ЭИИМ  
в северной части зоны покрытия КА (21 ГГц)

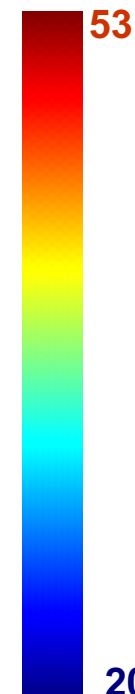


Зона  
покрытия



49,7  
дБи

Усиление  
МЛА КА  
Гант, дБи



## Требуемая мощность излучения КА РвСС для компенсации затухания сигнала в осадках ( 21 ГГц )



| Система РвСС (21 ГГц)   |  | Параметры системы РвСС с адаптивным<br>локальным изменением ЭИИМ спутника                 |                |                | Величина   |
|---|---|---|----------------|----------------|--|
| Диаметр узкого луча антенны<br>КА с повышенной ЭИИМ<br>(% от общего покрытия) |   | 200 км<br>(2%)  | 300 км<br>(5%) | 400 км<br>(7%) | —  |
| Усиление в узком луче антенны<br>КА (по -3дБ), дБи                            |   | 47.5  | 47.3           | 46.7           | —  |
| Усиление антенны КА<br>в общей зоне покрытия, дБи                             |   | 38.8  | 38.8           | 38.0           | 40.2   |
| <b>Применяемые СКК<br/>(модуляция/кодирование)</b>                            |   | <b>Необходимая мощность сигнала<br/>в полосе 27 МГц (Вт)</b>                              |                |                |  |
| QPSK (1/2)  |   | 28.8  | 30.2           | 34.6           | 151  |
| QPSK (3/4)  |   | 59.3  | 62.1           | 71.4           | 311  |
| TC 8PSK   |   | 130   | 136            | 156            | 679  |
| 16QAM (2/3)   |   | 648  | 679            | 780            | 3404  |

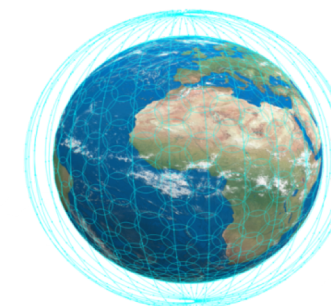
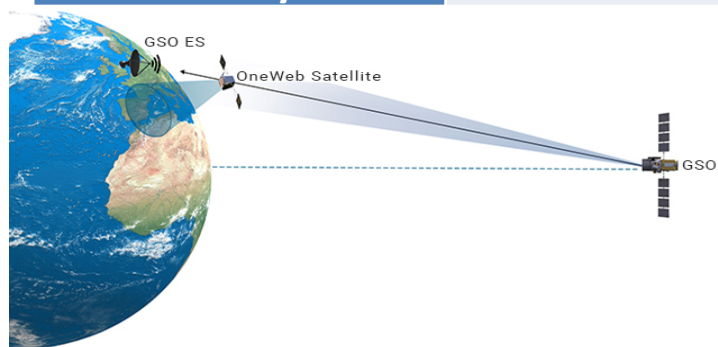


**Экономия излучаемой мощности каждого ствола БРТР КА более 7 дБ**

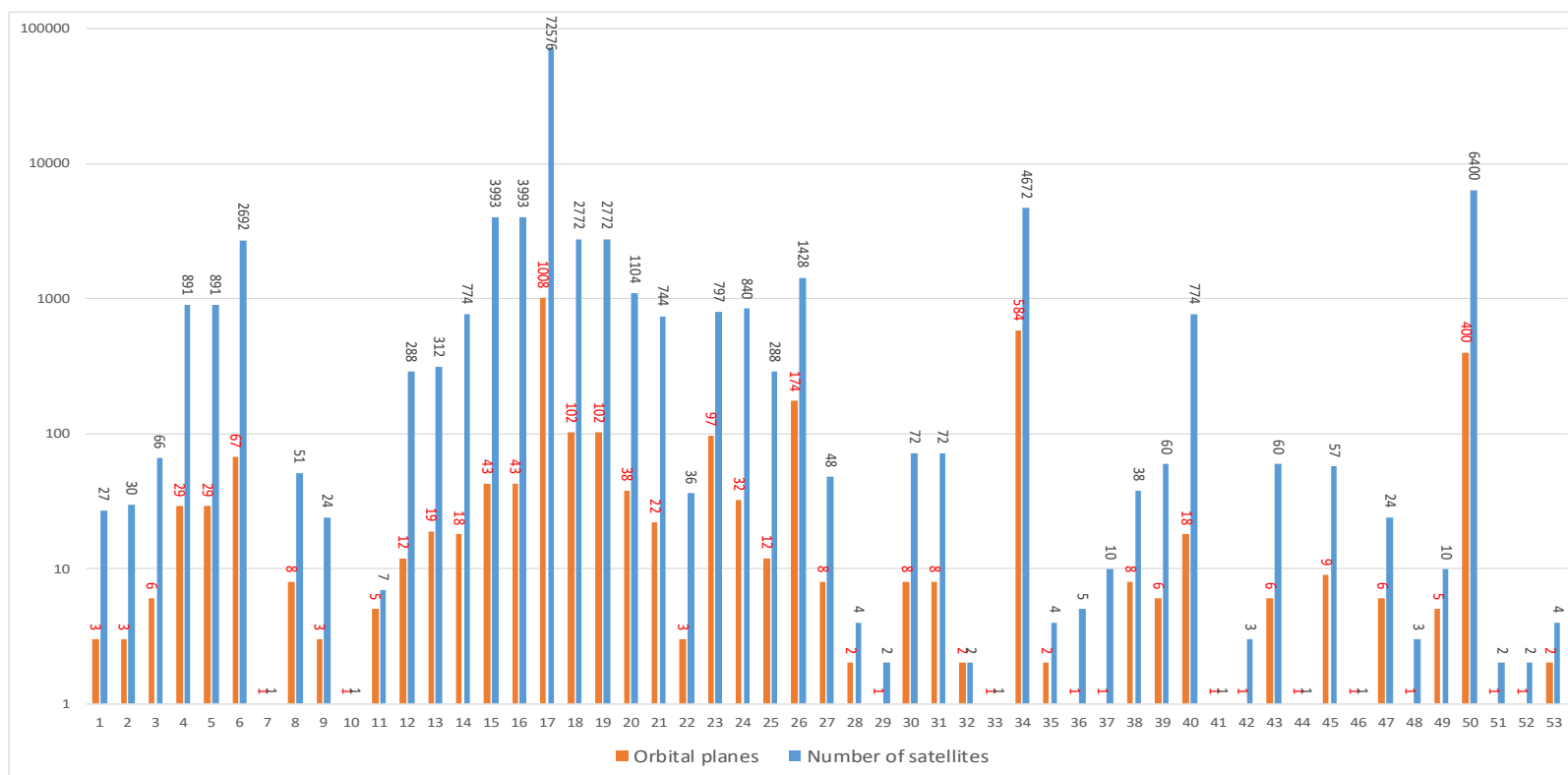
## Современные многоспутниковые НГСО системы



| Проект         | Диапазон частот | Высота круговой орбиты         | Количество спутников           | Планируемая реализация |
|----------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| OneWeb         | Ku              | 1200 км                        | 720 (всего по программе - 900) | 2018-2020              |
| SpaceX         | Ka или Ku       | 1150 км (начальное размещение) | До 4025                        | 2018-2020              |
| Samsung        | W (100 ГГц)     | 1250 км                        | 4600                           | После 2020             |
| Telesat Canada | Ka              | 1000 км                        | 72 круговая<br>45 полярная     | 2019-2020              |
| Valiny         | Н.д.            | 600 км                         | 135-144                        | 2019-2020              |



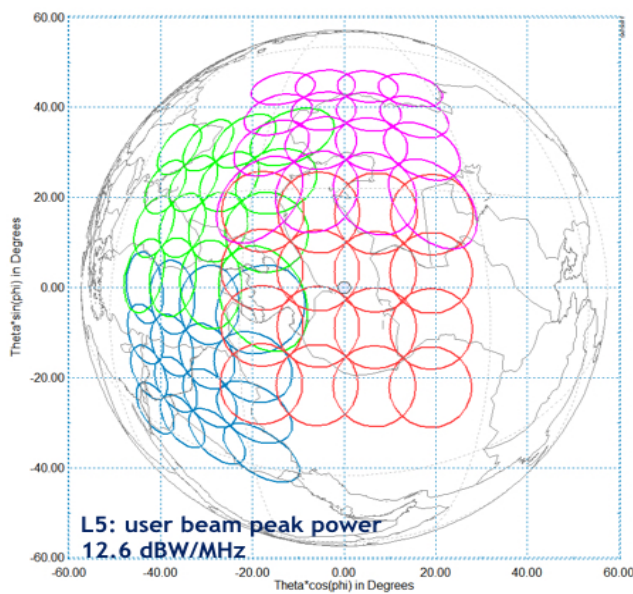
## Заявки на многоспутниковые НГСО системы в Бюро радиосвязи МСЭ в 2014-2016 гг.



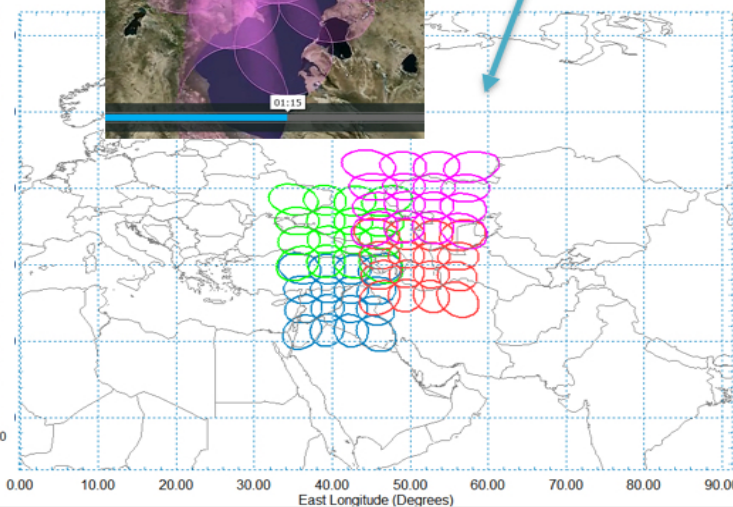
# Формирование лучей в многоспутниковой НГСО системе



Зоны покрытия абонентских  
лучей от 1200 км



3-х мерный вид абонентских  
лучей и вид на плоскости

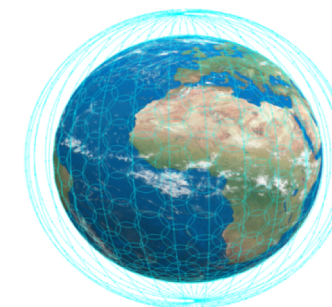
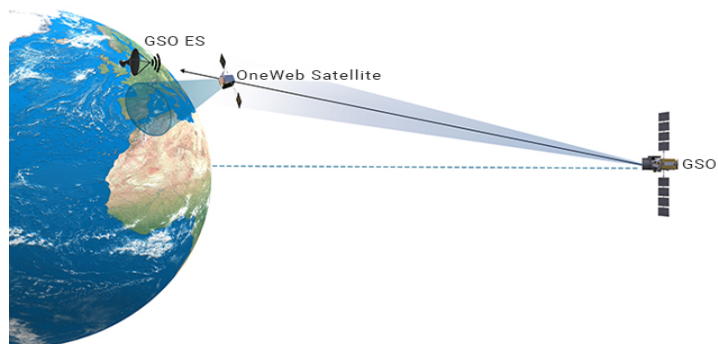


- Simultaneous footprints of 4 satellites are shown from the point of view of one (red) satellite. Note that 12 out of 16 beams of each satellite overlap with the other satellites footprints

## Эффективность многоспутниковых НГСО систем



| Спутниковая система                                 | Эквивалентная цена спутника на орбите | Частотный ресурс, МГц | Емкость, Гбит/с |
|---|---------------------------------------|-----------------------|-----------------|
| Глобальные системы на основе LEO- HTS               |                                       |                       |                 |
| OneWeb (2018-2020г.)                                | 4.0 млн. \$                           | 6 000                 | 10.7            |
| Space X ( 2018-2020г.)                              | 3.7 млн. \$                           | 9 000                 | 14.0            |
| Региональные и глобальные системы на основе МЕО-НТС |                                       |                       |                 |
| О3b (2013-2015г.)                                   | 88 млн.\$ (группировка)               | 4 320                 | 12.0            |





## Экономическая эффективность многоспутниковых НГСО систем



| Спутник                         | Диапазон частот | САС, лет | Полоса частот, МГц | Цена спутника на орбите, млн.\$ | Себестоимость МГц, приведенная к месяцу, \$ |
|---------------------------------|-----------------|----------|--------------------|---------------------------------|---|
| Традиционные ГСО спутники       |                 |          |                    |                                 |   |
| “Ямал 402”                      | Ku              | 15       | 2376               | 280                             | 655   |
| “Интелсат-9”                    | C, Ku           | 13       | 3264               | 221                             | 435   |
| Спутники ГСО-HTS                |                 |          |                    |                                 |   |
| 1-ое поколение Wildblue-1       | Ka              | 15       | 4200               | 400<br>(250)                    | 530<br>(330)                                |
| 2-ое поколение Viasat-1, Ka-Sat | Ka              | 15+      | 39000              | 430                             | < 61  |
| 3-е поколения Viasat-3          | Ka              | 15+      | 130000             | 650                             | 28  |
| Спутники LEO-HTS                |                 |          |                    |                                 |   |
| LEO-HTS OneWeb                  | Ka/Ku           | 7+       | 6000               | 4.0                             | 8   |

**Региональный семинар МСЭ «Тенденции развития и опыт  
использования технологий спутниковой связи»  
Минск, Республика Беларусь, 22-23 мая 2018 г.**



**Благодарю за внимание!**

**Thank you for attention!**

**[www.niir.ru](http://www.niir.ru)**

**[mms@niir.ru](mailto:mms@niir.ru)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИО**

*2018*