

XVI

МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
НАВИГАЦИОННЫЙ  
ФОРУМ



РОСКОСМОС

—  
Конгресс

СОФЕРА



## **Моделирование орбитальных группировок на негеостационарных орбитах**

**Андрей Гриценко**

Генеральный директор, к.т.н.

**XV Международный навигационный форум и конгресс «СФЕРА»**

**13 апреля 2023 г**

**Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»**



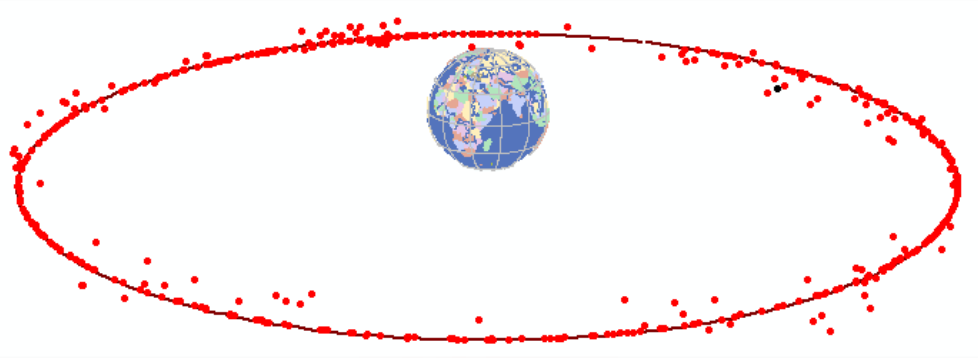
# Специфика ГСО и НГСО

## 1. Специфика ГСО:

все стабильно и аналитически прогнозируемо (положение спутника, энергетика, покрытие)

## Повышение эффективности систем с КА на ГСО:

1. Переход к спутникам класса HTS и VHTS;
2. Использование адаптивной (гибкой) полезной нагрузки:
  - использование большого числа узких (до 0.2 град) лучей;
  - повторное использование частот;
  - динамическое перенацеливание и группирование лучей;
  - изменение ширины и усиления лучей;
  - перераспределение мощности между лучами;
  - перераспределение трафика между лучами;
3. Возможность динамического изменения позиции на ГСО.

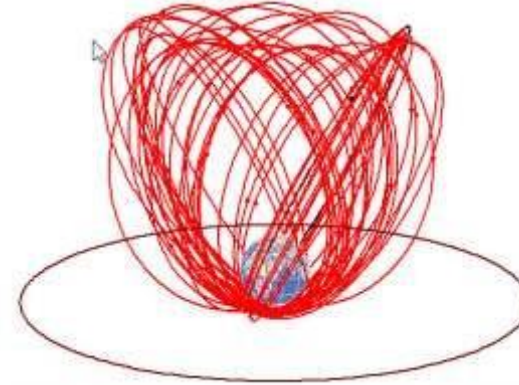


## 2. Специфика НГСО:

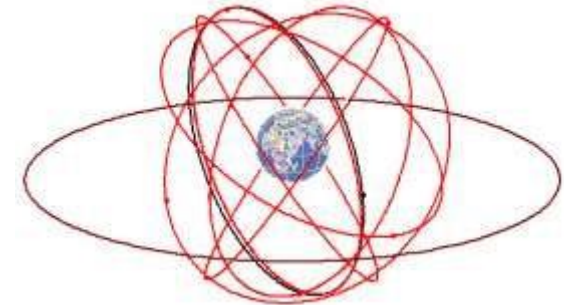
всё не стабильно и аналитически плохо прогнозируемо (взаимное положение спутников, энергетика, покрытие, ...)

## Основные типы НГСО:

### А) ВЭО (НЭО)



### Б) СКО (МЭО)



### В) НКО (LEO), в том числе ССО (SSO)





# Специфика НГСО - LEO

Число спутников в ОГ LEO-НГСО есть функция от высоты орбиты и требуемого минимального значения угла места.

При классическом построении ОГ, с уменьшением наклона орбиты требуемое число спутников растет (противоречие, так как площадь покрытия сокращается).

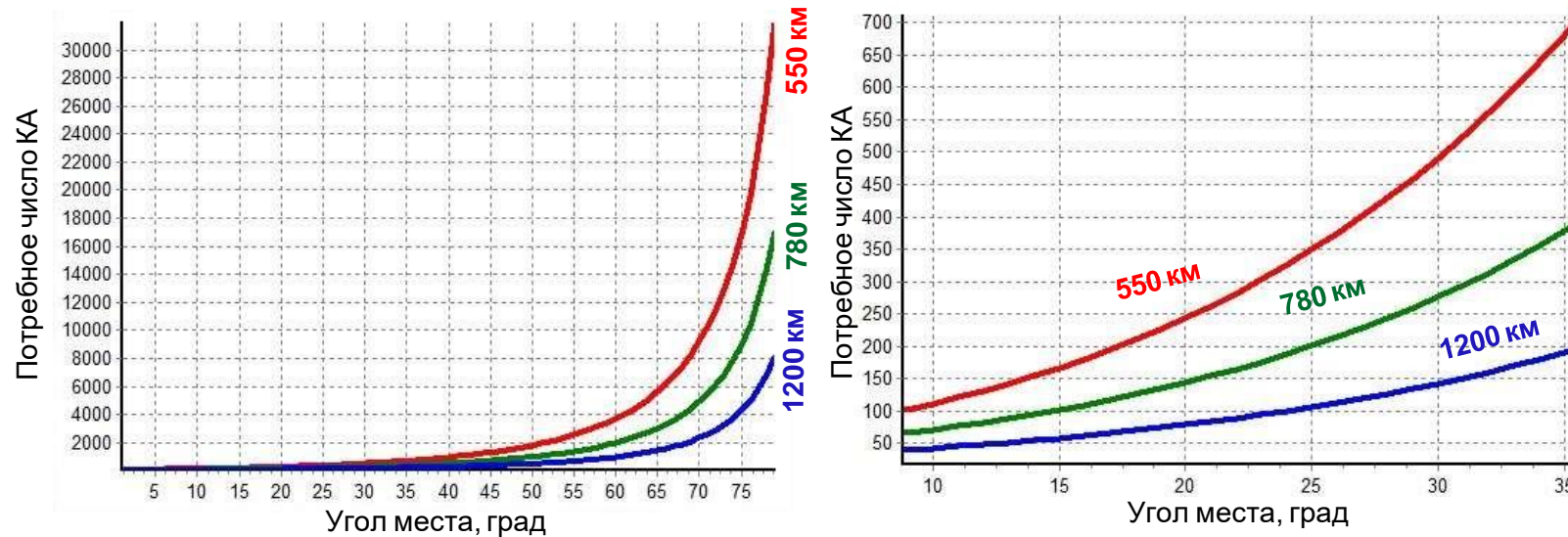
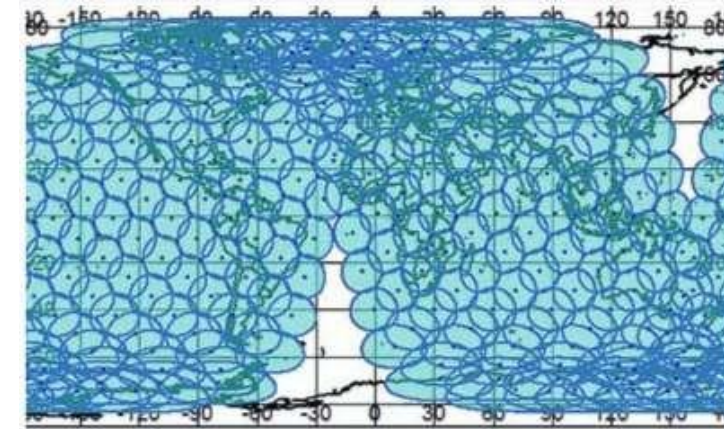
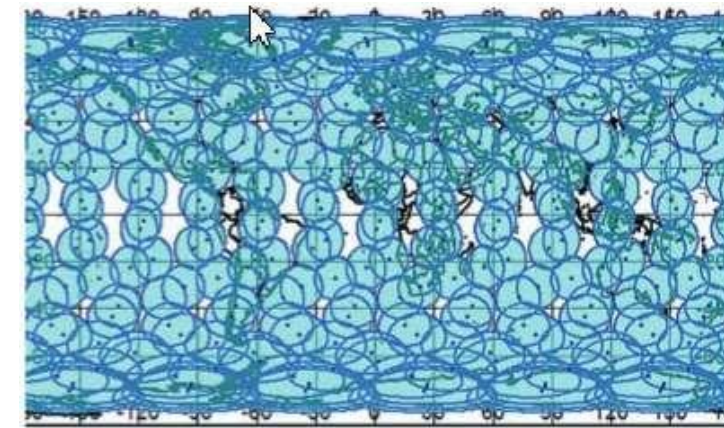


Рис.1. Число спутников при полярном наклоне (глобальное непрерывное радиопокрытие)



а) Конструкция Уолкера (расстановка плоскостей на дуге 180 град)



б) «Дельта-конфигурация» (расстановка плоскостей на дуге 360 град)

Рис.2. Наклонные орбиты

**! - Для непрерывности радиопокрытия необходимо увеличение числа спутников**



# Специфика НГСО-LEO

## Классификация ОГ по числу спутников

Мощность ОГ	Обозначение	Число КА
Единичная	UP (Unit Power)	1
Малая	LP (Low Power)	2...50
Средняя	MP (Medium Power)	51...100
Большая	HP (High Power)	100...1 000
Очень большая	VP (Very High Power)	1 000...10 000
Гипербольшая	GP (Hyper High Power)	> 10 000

## Большие орбитальные группировки (HP, VP и GP) на LEO:

1. Абонентские станции ориентированы на работу на больших углах места (более 25 град);
2. Особенно выражен эффект концентрации спутников на широте, численно равной наклонению;
3. Необходимо использовать многослоенные (прежде всего по наклонению) орбитальные группировки;
4. Спутники должны быть максимально легкими и дешевыми;
5. Специфика выведения и развертывания;
6. Необходимо поэтапное наращивание;
7. Необходимо оптимальное управление группировкой;
8. Необходимо гарантированное захоронение;
9. Необходима оценка вероятности опасного сближения.

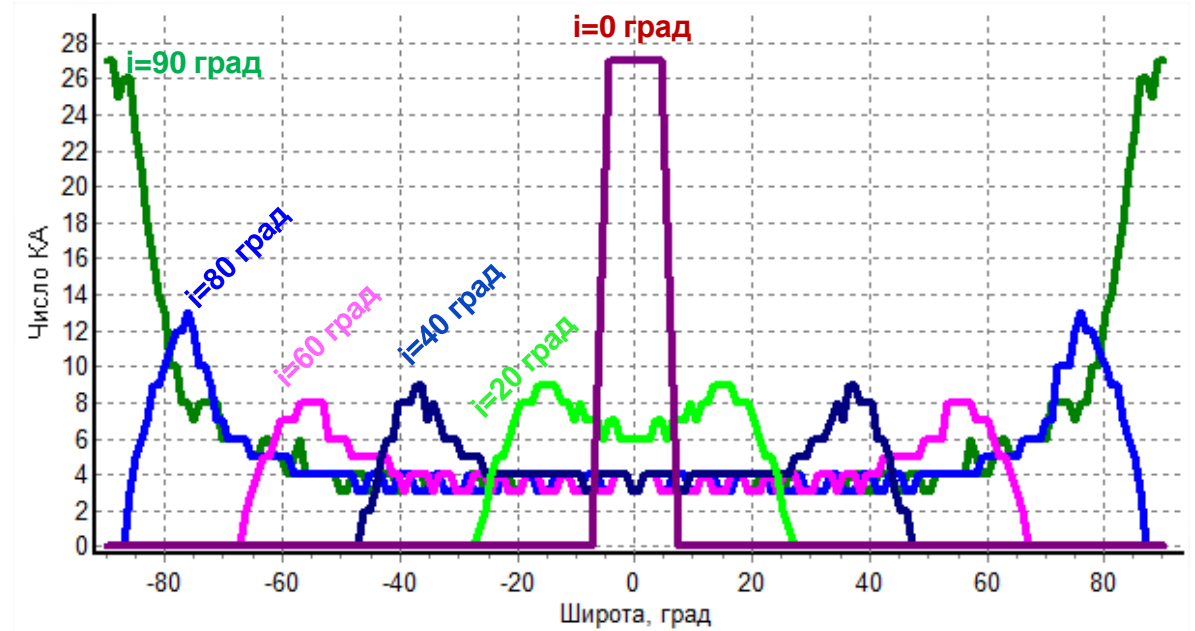


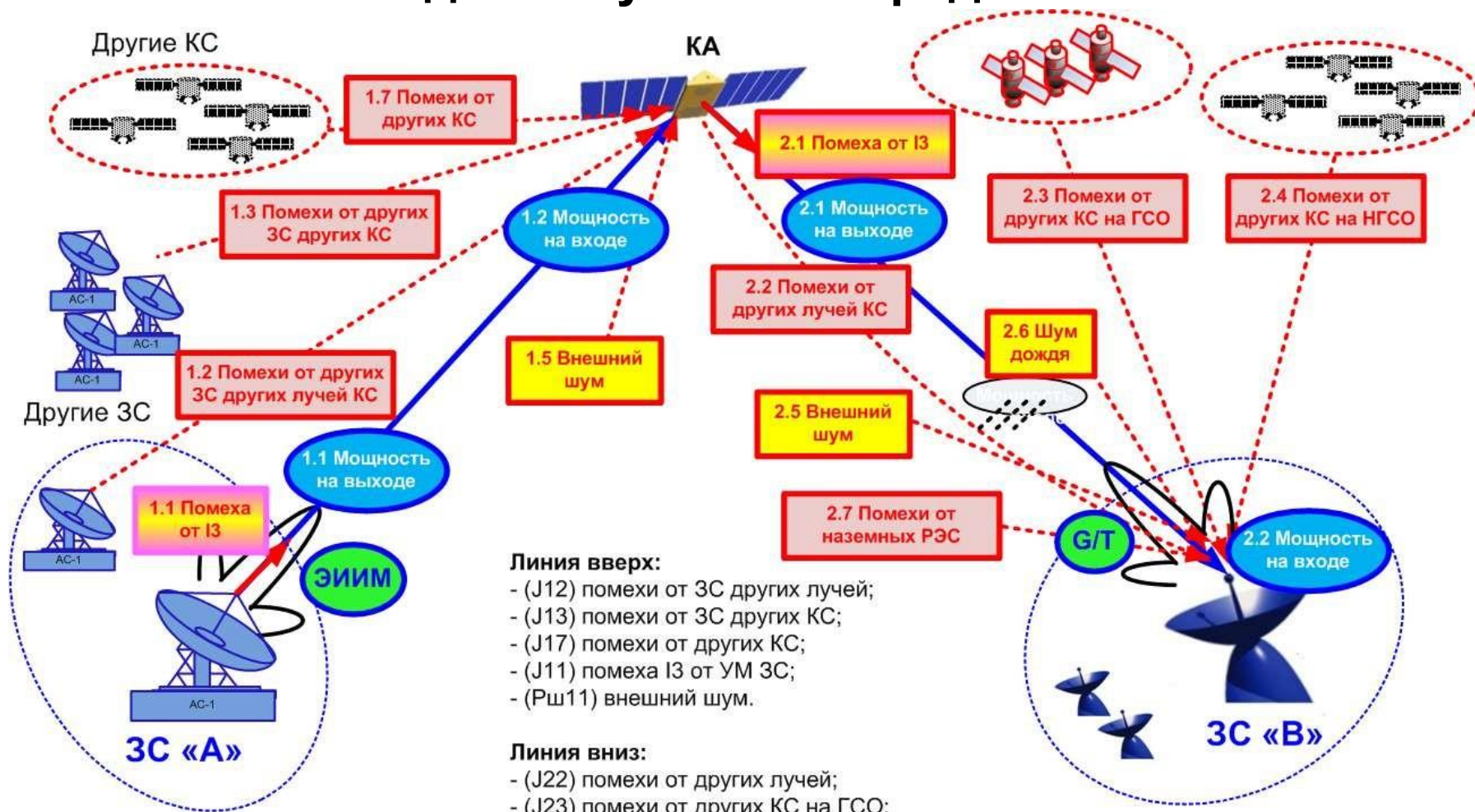
Рис.1. Число наблюдаемых КА в функции широты положения АС для табулированных значений наклонения орбит

## В части подсистемы связи:

1. Непрерывное изменение радиальной дальности и скорости;
2. Непрерывное изменение углового положения спутника относительно абонентской станции
3. Доплеровский сдвиг частоты – значителен;
4. Сложность и дороговизна изготовления следящих антенных систем АС;
5. Непрерывное изменение мощности сигнала на входе приемника (КА и АС).



# ЭМС НГСО-LEO (внутрисистемная и межсистемная) и бюджет спутниковой радиолинии



## Линия вверх:

- (J12) помехи от ЗС других лучей;
- (J13) помехи от ЗС других КС;
- (J17) помехи от других КС;
- (J11) помеха I3 от УМ ЗС;
- (Pш11) внешний шум.

## Линия вниз:

- (J22) помехи от других лучей;
- (J23) помехи от других КС на ГСО;
- (J24) помехи от других КС на НГСО;
- (J21) помеха I3 от УМ ствола БРТК
- (Pш21) внешний шум;
- (Pш22) шум дождя.



# Баллистическая структура НГСО-LEO

## Баллистическая структура ОГ КА –

упорядоченное взаимное расположение КА в околоземном пространстве, характеризуемое требуемыми соотношениями между элементами их орбит.

## Баллистическая структура ОГ КА:

1. Полностью определяет потенциальные возможности спутниковой системы в части применения по назначению;
2. Существенно влияет на облик и основные характеристики космического аппарата (платформы и полезной нагрузки);
3. Существенно влияет на массово-габаритные, стоимостные и технические характеристики абонентских станций;
4. Определяет стоимость (потребное число запусков РН) и время развертывания (запуски и довыведение на рабочие орбиты) спутниковой системы

## Выведение и развертывание

- выведение группы КА на опорную орбиту;
- последующее доразвертывание ОГ КА за счет собственных двигателей малой тяги.

**Выбор стратегии развертывания** многоспутниковой орбитальной группировки, оптимальной с точки зрения минимизации стоимости пусковых услуг, предусматривает:

- определение типа РН (и соответственно, космодрома);
- определение типа двигателя малой тяги (ДМТ), применяемого в составе КА;
- разработку методики управления орбитальным движением спутников с учетом особенностей проектируемой системы и ее орбитальной группировки.

**Выбор варианта построения ОГ из множества возможных является комплексной задачей, сопряженной с целевой функцией спутниковой системы**



# Схема развертывания ОГ системы Starlink



Рис.1 Графики изменения высоты КА из состава группового запуска (57 КА) системы StarLink от 07.01.2020 ( $i=53$  град, время развертывания в рабочих плоскостях: 1,5 мес+1,5 мес + 1.5 мес.)

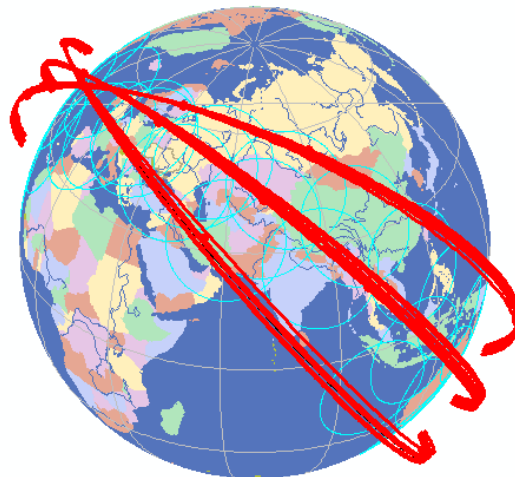
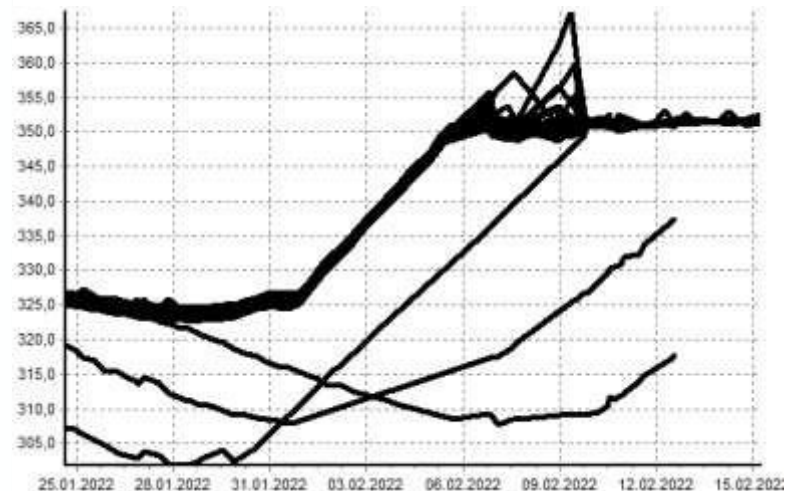
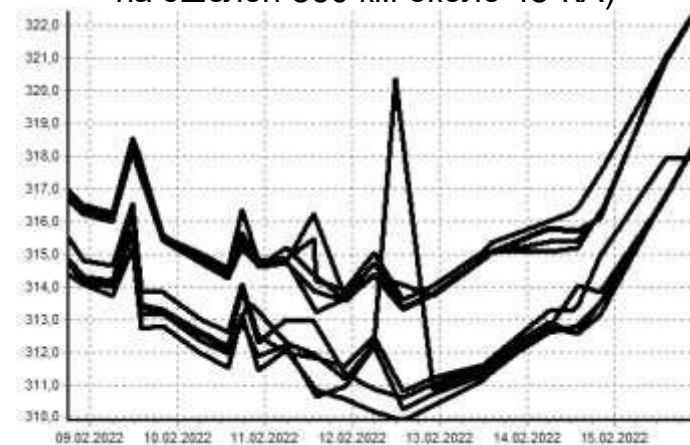


Рис.2 Результат : через 4,5 мес сформированы три плоскости ОГ системы StarLink



а) запуск 2022-005 от 19.01.2022 (выведено на эшелон 360 км около 48 КА)



б) запуск 2022-010 от 03.03.2022 (удалось сохранить только около 10 КА)

Рис.3 Деструктивное влияние атмосферы в период солнечной активности





# Проект системы ШПД «Бюро 1440»

(по данным BR ITU, IFIC 2991, спутниковые сети RASSVET-1 и RASSVET-2)

## а) Сеть RASSVET-1 (эшелон на наклонных орбитах)

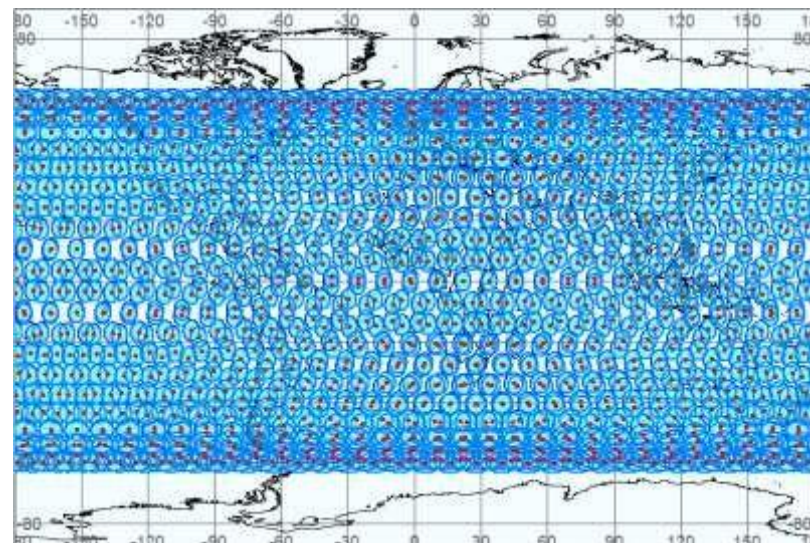
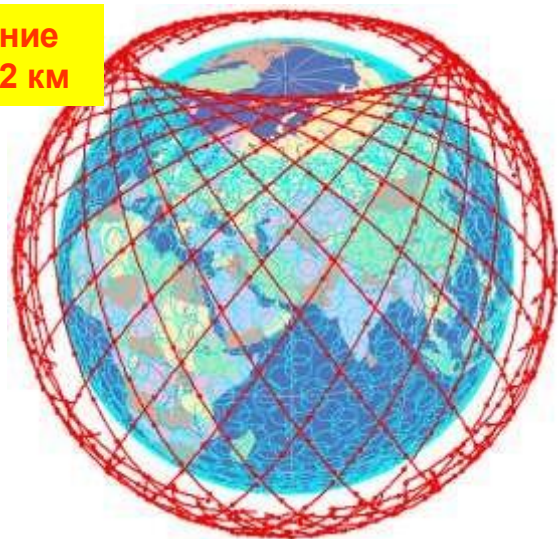
### Параметры орбиты:

- высота 600 км;
- наклонение 60 град;

### Параметры ОГ:

- 30 пл. по 45 КА (всего 1350 КА);
- угол между плоскостями 12 град;
- фазовый угол между КА: 8,27 град
- БРТК: диапазон частот Ku, Ka
- межспутниковые линии: есть 33/23 ГГц

Сближение  
КА до 2.2 км



## б) Сеть RASSVET-2 (эшелон на полярных орбитах)

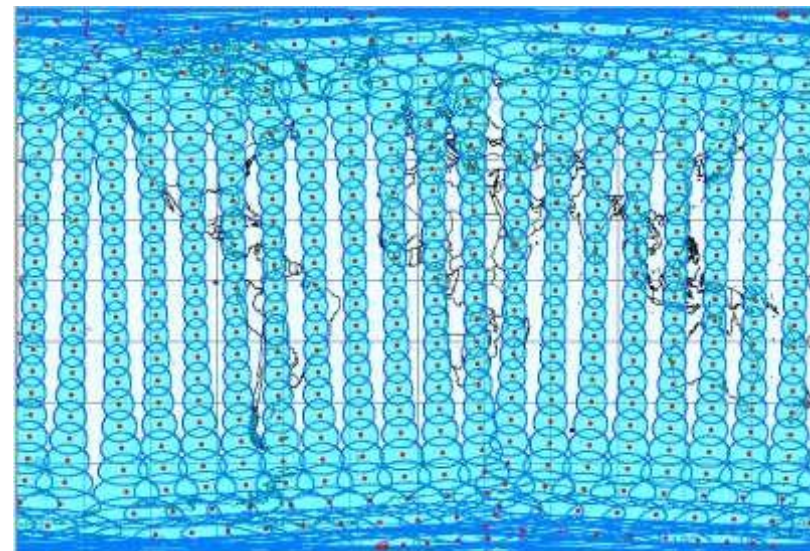
### Параметры орбиты:

- высота 800 км;
- наклонение 88 град;

### Параметры ОГ:

- 10 пл. по 50 КА (всего 500 КА);
- угол между плоскостями 18 град;
- фазовый угол между КА: 7,92 град
- БРТК: диапазон частот Ku, Ka
- межспутниковые линии: есть 33/23 ГГц

Сближение  
КА до 2.5 км



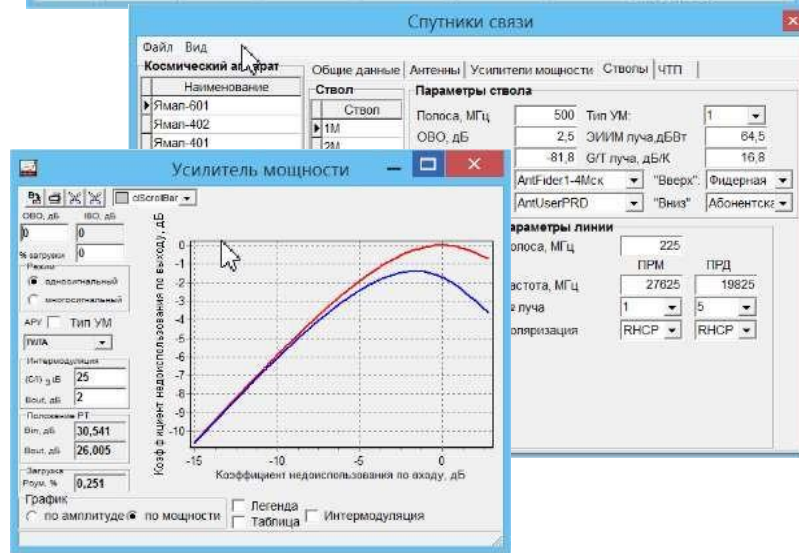
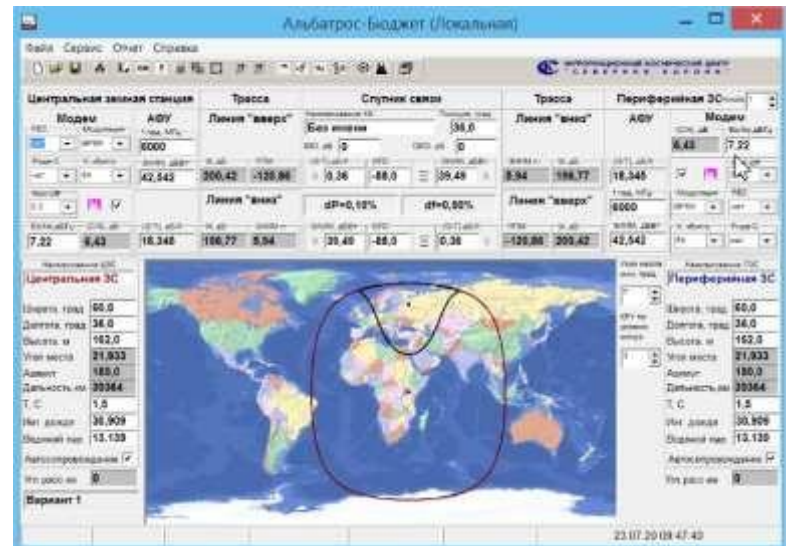
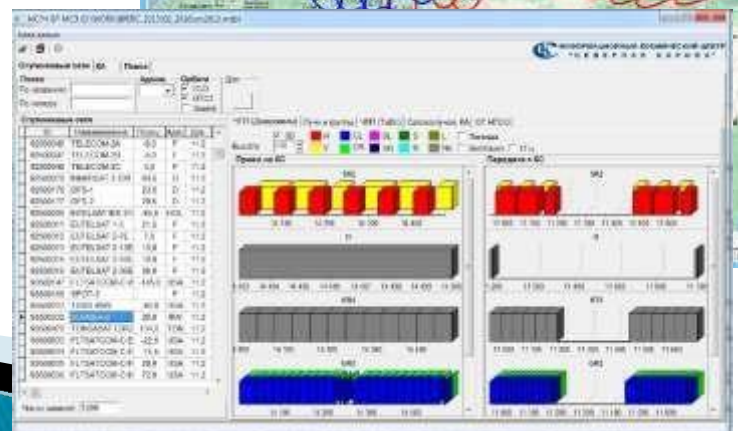
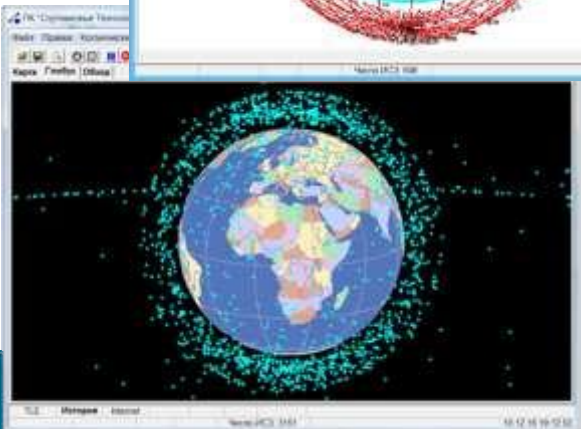
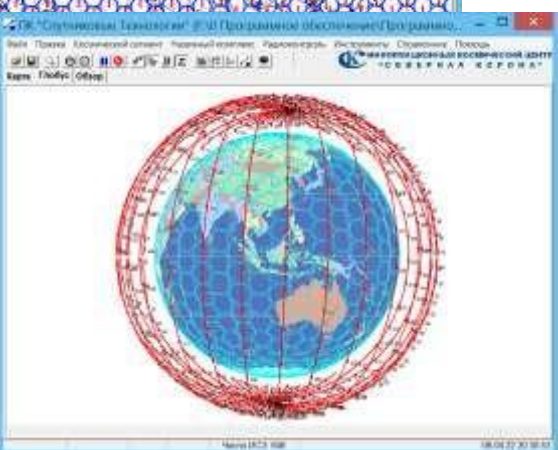
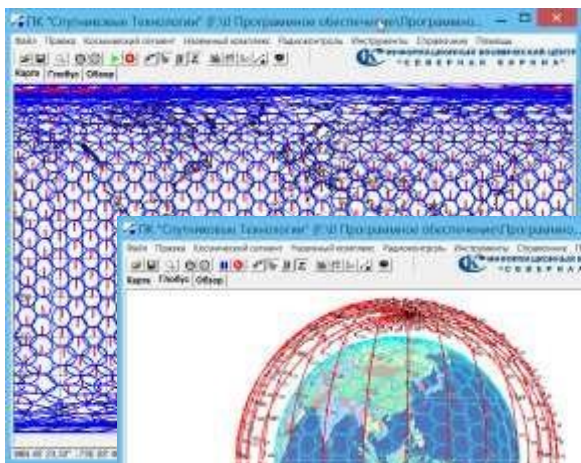
Угол места 50 град



# САПР «Альбатрос»

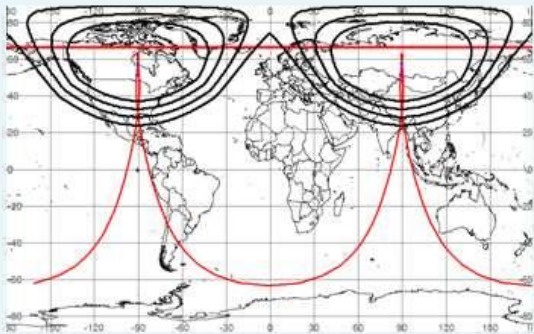
## Математическое имитационное моделирование и выполнение инженерных расчетов спутниковых систем и сетей различного назначения

1. ПК «Спутниковые технологии» - системное проектирование и ситуационный анализ, частный каталог NORAD
2. ПК «Бюджет» - расчет спутниковых радиолиний
3. ПК «БРИФИК» - анализ информации Международного справочного Регистра частот (BRIFIC)





# Новые решения, полученные на САПР «Альбатрос»



а) ГЗРВ (УМ = 45, 50, 55 и 60 град



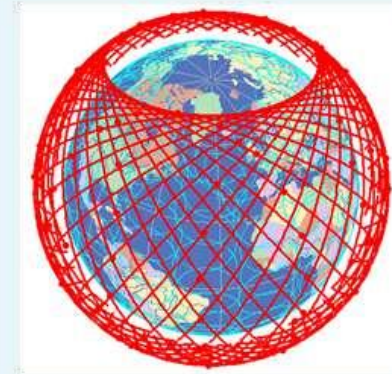
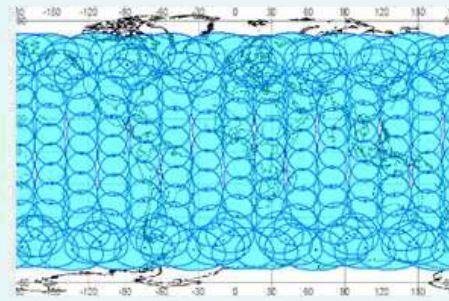
Структура орбитальной группировки

Планируется к использованию в системе «Экспресс-РВ»



Патент на орбиту «Кентавр» ИКЦ «Северная Корона», 2001 г

(более 20 лет назад !!!)



Баллистическая структура на LEO типа «оптимальная DELTA-конфигурация»

Заявление о выдаче патента, Анпилогов В.Р., Гриценко А.А., 2022 г



# ВЫВОДЫ

1. Орбитальная группировка является существенной составной частью спутниковой системы. Выбор варианта построения ОГ из множества возможных является комплексной задачей, сопряженной с целевой функцией спутниковой системы.
2. Одним из ключевых критериев при оптимизации построения ОГ является минимизация пусковых услуг. По сути, это минимизация эквивалентной стоимости спутника на орбите.
3. Многоспутниковые системы не создаются одномоментно. Должны быть определены этапы наращивания ОГ исходя из возможности начала предоставления коммерческих услуг.
4. Ключевым фактором на этапе разработки новых систем на LEO является использование эшелонированных орбитальных группировок, группировок с оптимальной структурой, а также управляемыми лучами для формирования динамических зон обслуживания.
5. САПР «Альбатрос» - эффективное средство математического имитационного моделирования работы спутниковых систем на НГСО с целью получения оптимальных технических решений.



*Информационный Космический Центр «Северная Корона»*

---

---

***Спасибо за внимание!***



199034, Россия, Санкт-Петербург,

17-я линия В.О., д.4-6

тел/факс +7 (812) 320-65-04

+7 (812) 922-36-21

e-mail: [org@spacecenter.ru](mailto:org@spacecenter.ru)

сайт: [www.spacecenter.ru](http://www.spacecenter.ru)