



Информационный Космический Центр «Северная Корона»

Повышение эффективности применения многоспутниковых систем на базе малых космических аппаратов

Гриценко А.А.

Генеральный директор, к.т.н.

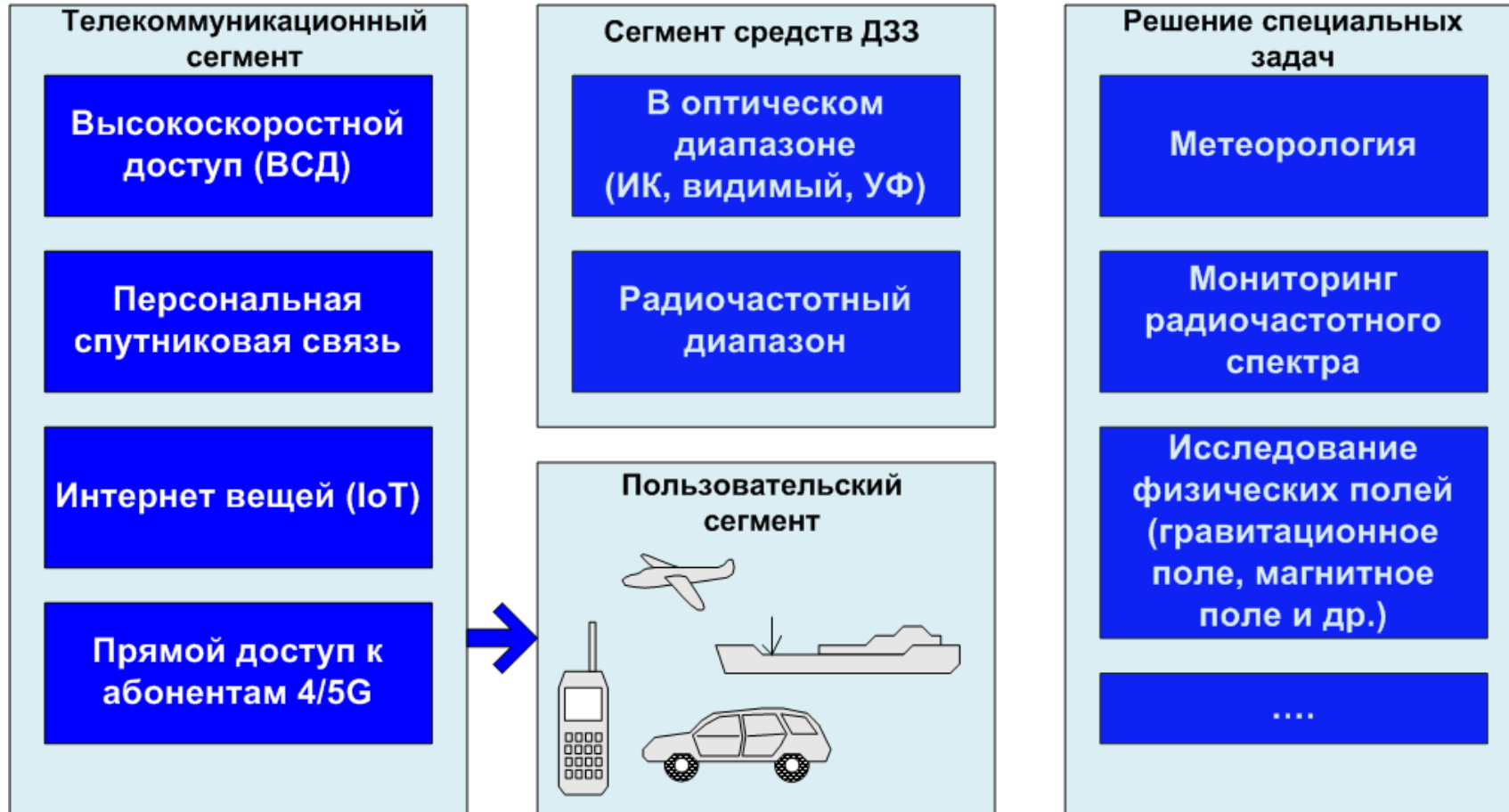
Пятый Евразийский аэрокосмический конгресс

24 июля 2023 года

Конгресс-Центр ЦМТ, Москва



Основные области применения спутниковых систем с орбитальными группировками малых космических аппаратов



Главная задача – оптимизация пользовательского сегмента

Основные критерии:

- максимизация скорости (оперативности) передачи информации;
- компактность абонентского оборудования;
- минимизация стоимости абонентского оборудования;
- минимизация стоимости предоставления услуг.

Многоспутниковая орбитальная группировка - это одна из ключевых составляющих спутниковой системы. Ее баллистическое построение определяется функциональной задачей, которая в свою очередь зависит от конечной услуги, предоставляемой спутниковой системой потребителям на Земле.

Целесообразно комплексное взаимоувязанное развитие спутниковых систем различного целевого назначения (связь, навигация, ДЗЗ) с ориентацией на конечного пользователя, что может дать сверхсуммарный эффект.



Классификация МКА, типы используемых орбит

Таблица 1 Классификация КА по массе

Группа		Полная масса, кг
тяжелые*		> 3000
средние*		1000 ... 3000
легкие*		500 ... 1000
малые	мини	100 ... 500
	микро	10 ... 100
	нано	1 ... 10
	пико	0,1 ... 1
	фемто	< 0.1

* - в разных источниках могут обозначаться по разному

Таблица 2 Классификация ОГ по мощности

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

Таблица 3 Потенциальные орбиты МКА

LEO	низкие круговые орбиты ($e=0$, $h=300...1500$ км)
ССО (SSO)	солнечно-синхронные орбиты ($e=0$, $i=96...99$ град, $h=200...600...1500$ км)
VLEO	очень низкие круговые орбиты ($e=0$, $h=100...300$ км)

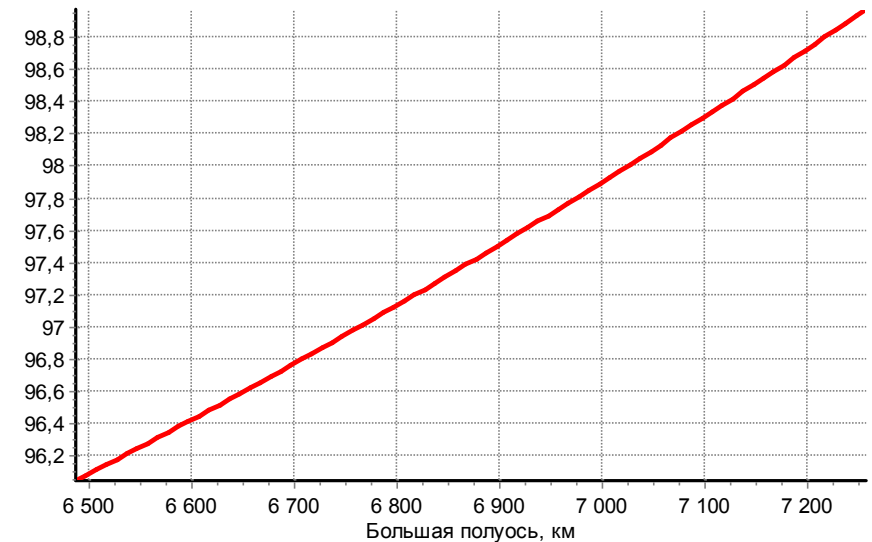


Рис.1 Наклонение ССО при ее высоте от 200 км до 1500 км



VLEO – очень низкая околоземная орбита

VLEO (Very low Earth orbit) – круговая околоземная орбита высотой примерно от 100 км (линия Кармана) до 350 км.

Ключевые особенности:

- предельно малая дальность между спутником и поверхностью земли (абонентом);
- высокая угловая скорость движения спутника (период обращения на высоте 200 км составляет 16.3 об/сут);
- достаточно высокая плотность атмосферы.

Производные факторы:

- самая низкая себестоимость выведения МКА на орбиту;
- предельно высокое разрешение для системы ДЗЗ;
- минимальные энергетические потери на участках Космос-Земля и Земля-Космос;
- предельно малая задержка в прохождении сигнала;
- небольшие зоны обслуживания (наблюдения), что предполагает использование МКА;
- отсутствует космический мусор;
- захоронение МКА происходит автоматически, не требуется дополнительных ресурсов.

Актуальность использования VLEO:

- в июне 2021 года состоялся «1-й Международный симпозиум по миссиям и технологиям VLEO»;
- в конце 2022 года в документах DARPA преимущества VLEO рассматриваются как перспективные для развертывания созвездия малых КА с поддержкой технологии 6G;
- значительное число публикаций на тему использования VLEO.

Необходимое условие: наличие двигателя малой тяги, обеспечивающего парирование негативного воздействия атмосферы.

В России идут разработки двигателей малой тяги (ионный двигатель открытого типа), обеспечивающих длительное пребывание спутника на орбитах высотах до 200 км.

Ключевой фактор: проработка концепции, в которой остаточная атмосфера на высоте VLEO собирается и используется в качестве топлива для электрического двигателя, что теоретически устраняет необходимость наличия топлива на борту.

DISCOVERER – Европейской проект по созданию системы ДЗЗ на орбитах VLEO.

Включает:

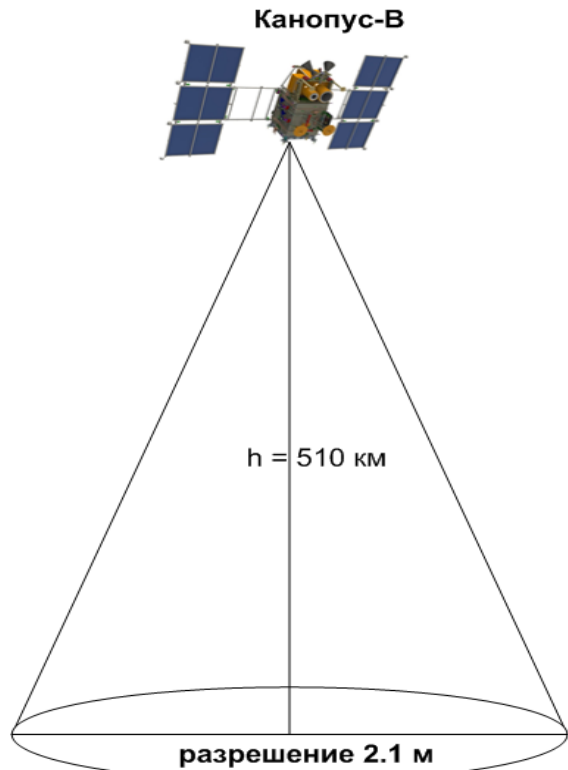
- разработка материалов, обеспечивающих малое сопротивление и устойчивость в среде VLEO;
- разработка атмосферных электроракетных двигателей;
- разработка методов активного аэродинамического управления;
- компоновку малого КА для VLEO.

Стартап Kreios Space из Барселоны также планирует раскрыть потенциал спутниковых миссий на очень низкой околоземной орбите (VLEO).

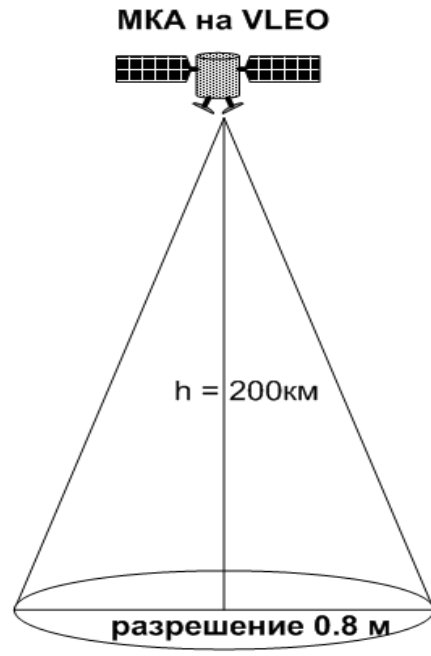


VLEO – очень низкая околоземная орбита

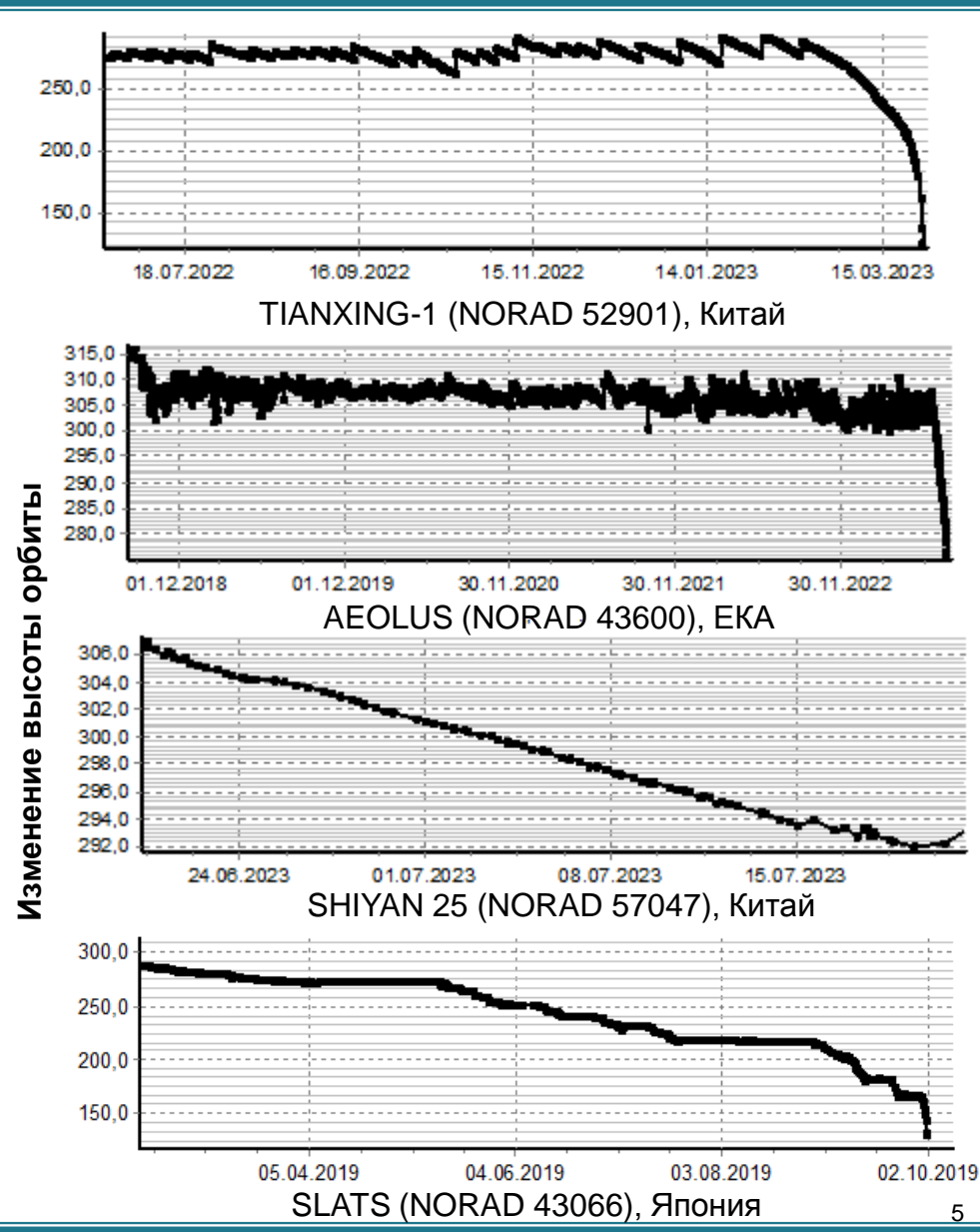
ДЗЗ

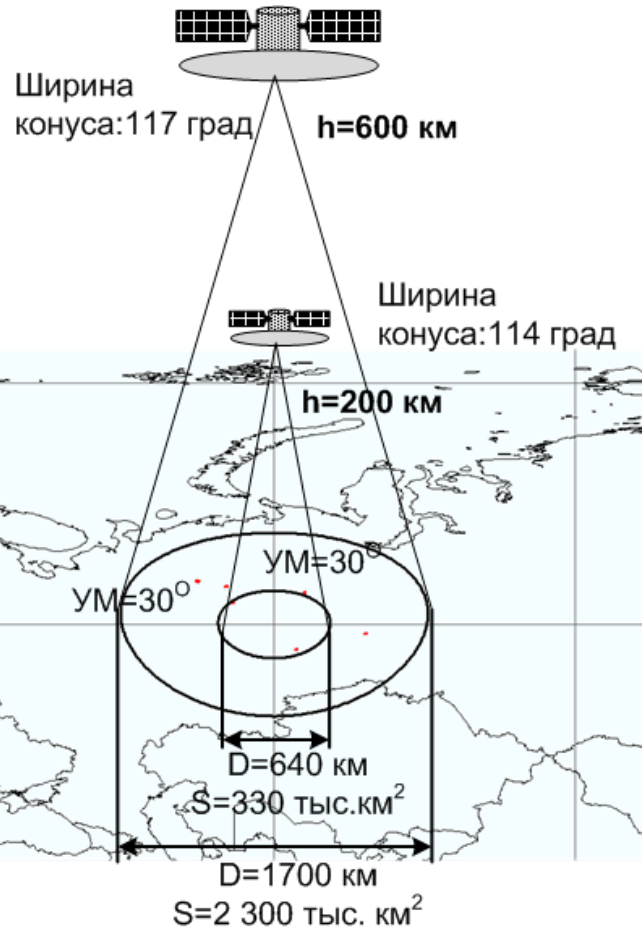


Полоса захвата 20..23 км
Полоса обзора: 856 км



Полоса захвата 8 км
Полоса обзора: 330 км





Абонентская линия, участок «вниз»

Ограничение РР: значение эквивалентной ППМ при $УМ > 25$ град в полосе 1 МГц не должно превышать (Ka-band) -105 дБ(Вт/м²);

Это значит, что все НГСО системы потенциально могут обеспечить предельное значение ППМ. Следовательно, SNR на входе приемника у всех систем примерно одинаков (помехи в данном случае не учитываются).

Однако мощность передатчика на VLEO высотой 200 км будет в 7 раз меньше, чем мощность передатчика на LEO высотой 600 км. То есть вместо СЭС мощностью 100 Вт достаточно СЭС мощностью 14 Вт.

Достоинства VLEO:

- на линии «вниз» могут использоваться в 7 раз более маломощные передатчики, чем на МКА на стандартных LEO высотах;
- энергетический выигрыш на линии «вверх», по сравнению с LEO, составляет около 10 дБ, что обеспечивает более высокую (по сравнению с LEO) скорость обратного направления, т.е. поддержка беспилотных систем;
- целесообразно проработка технологии динамического перераспределения пропускной способности между прямым и обратным направлением (в качестве примера – LTE TDD);
- не требуется покрывать всю зону радиовидимости, необходимо реализовать «прыгающий луч»;
- проработка концепции МКА: «спутник – луч».

Абонентская линия, участок «вверх»

Ограничений РР нет.

Потери в свободном пространстве, например в Ka-диапазоне (30 ГГц):

- для спутника на VLEO (200 км): 168 дБ;
- для спутника на LEO (600 км): 178 дБ.

То есть, при прочих равных условиях выигрыш при использовании VLEO составит 10 дБ.

Это значит, что использование VLEO обеспечивает безальтернативно высокие скорости в обратном канале от абонентских станций, размещенных, например, на беспилотных системах.



Минимизация стоимости выведения и разведения

Типовые (для России) этапы выведения и развертывания МКА на LEO:

Этап 1 РН выводит группу МКА на опорную орбиту высотой примерно 200...250 км;

Этап 2 РБ (Третья ступень) доводит группу МКА на рабочую орбиту (например, высотой 600 км);

Этап 3 Осуществляется разведение МКА по рабочей орбите.

Для VLEO – выведение завершается на Этапе 1.

Для LEO - с целью минимизации стоимости разведения целесообразно: на Этапах 2 и 3 использовать не маршевые двигатели (высокий удельный импульс, но малый КПД), а двигатели малой тяги ДМТ (малый удельный импульс, но высокий КПД).

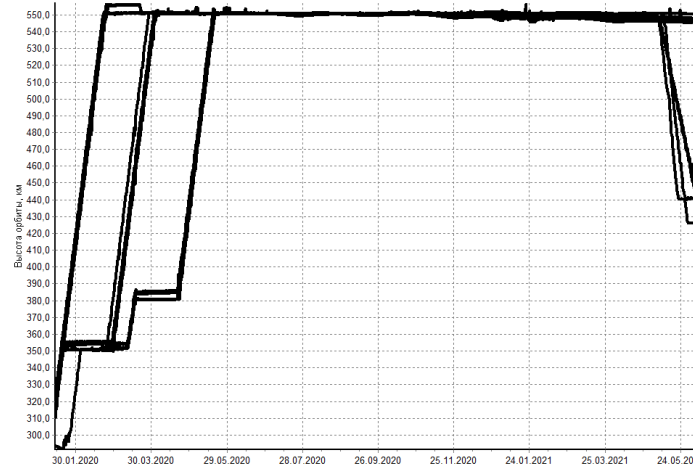


Рис.1 Графики изменения высоты КА из состава группового запуска (57 КА) системы StarLink от 07.01.2020 ($i=53$ град, время развертывания в рабочих плоскостях: 1,5 мес+1,5 мес + 1.5 мес.)

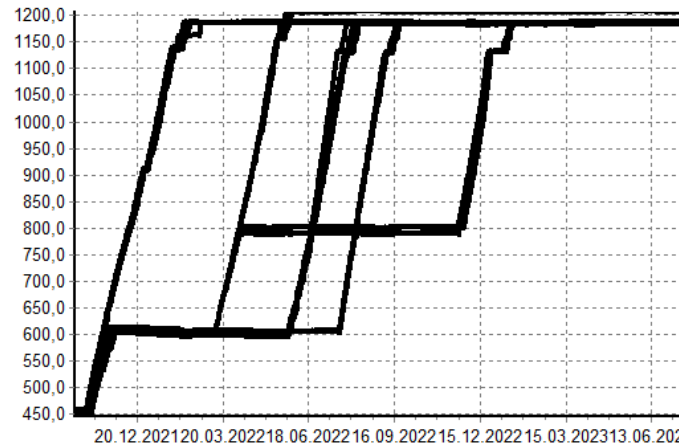


Рис.3 Графики изменения высоты КА из состава группового запуска (36 КА) системы OneWeb от 14.10.2021 (2021-090)

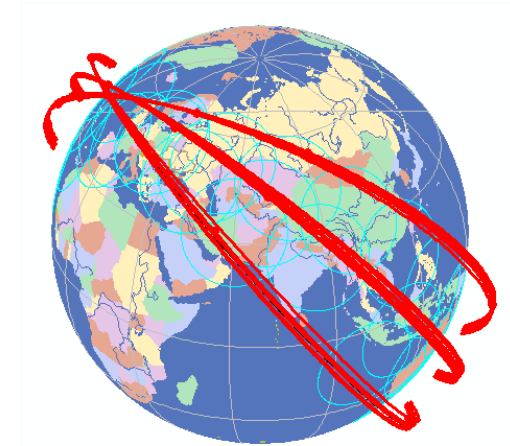


Рис.2 Результат : через 4,5 мес сформированы три плоскости ОГ системы StarLink

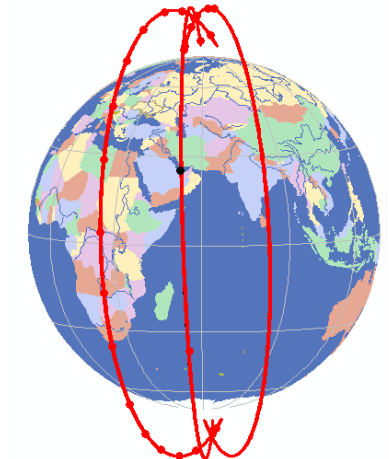


Рис.4 Результат : через 1 год и 2 мес сформированы три плоскости ОГ системы OneWeb

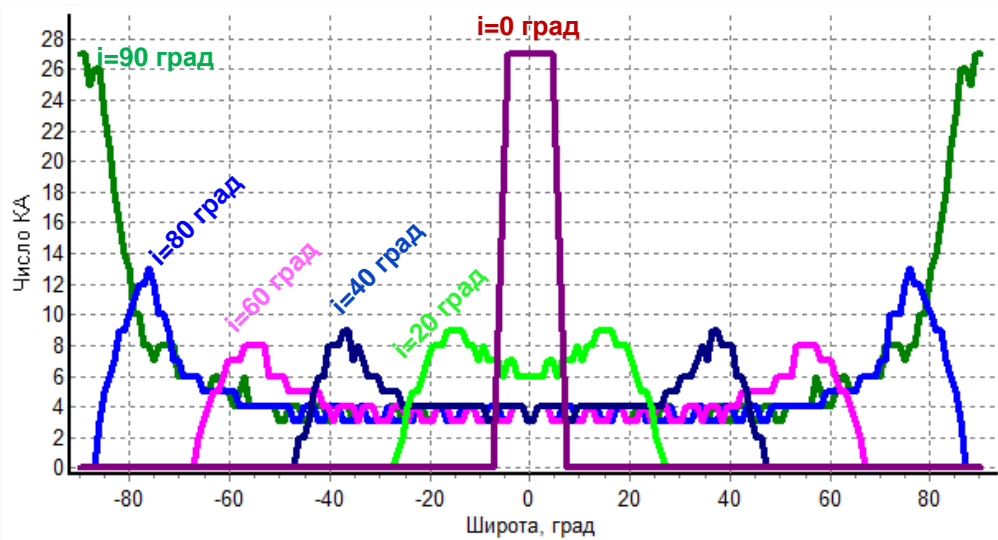


Рис.1. Результаты моделирования: число наблюдаемых КА в функции широты положения АС для табулированных значений наклона орбит

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

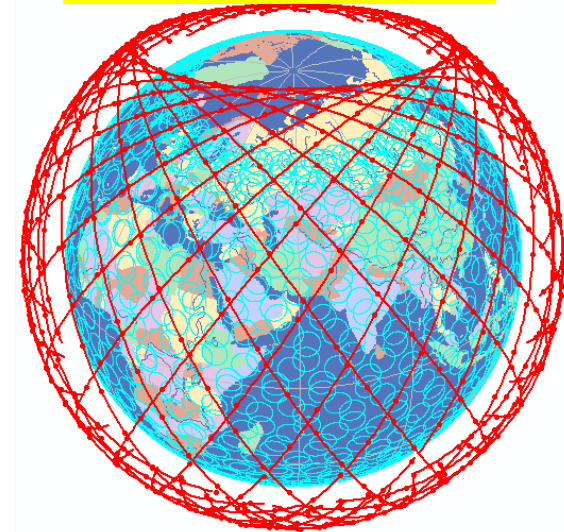
Параметры орбиты:

- 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

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

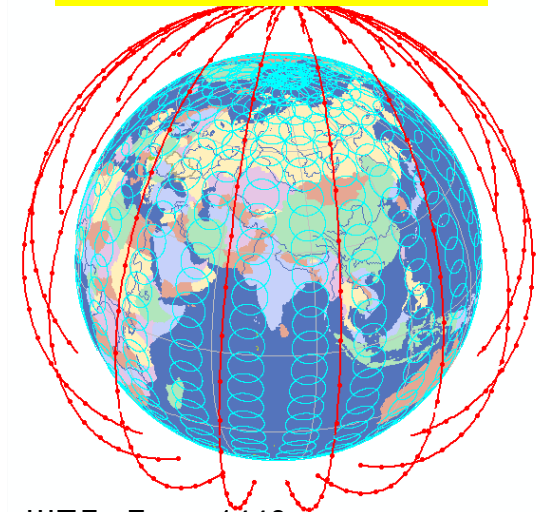


Рис.2. Проект системы ШПД «Бюро 1440» (по данным BR ITU, IFIC 2991)

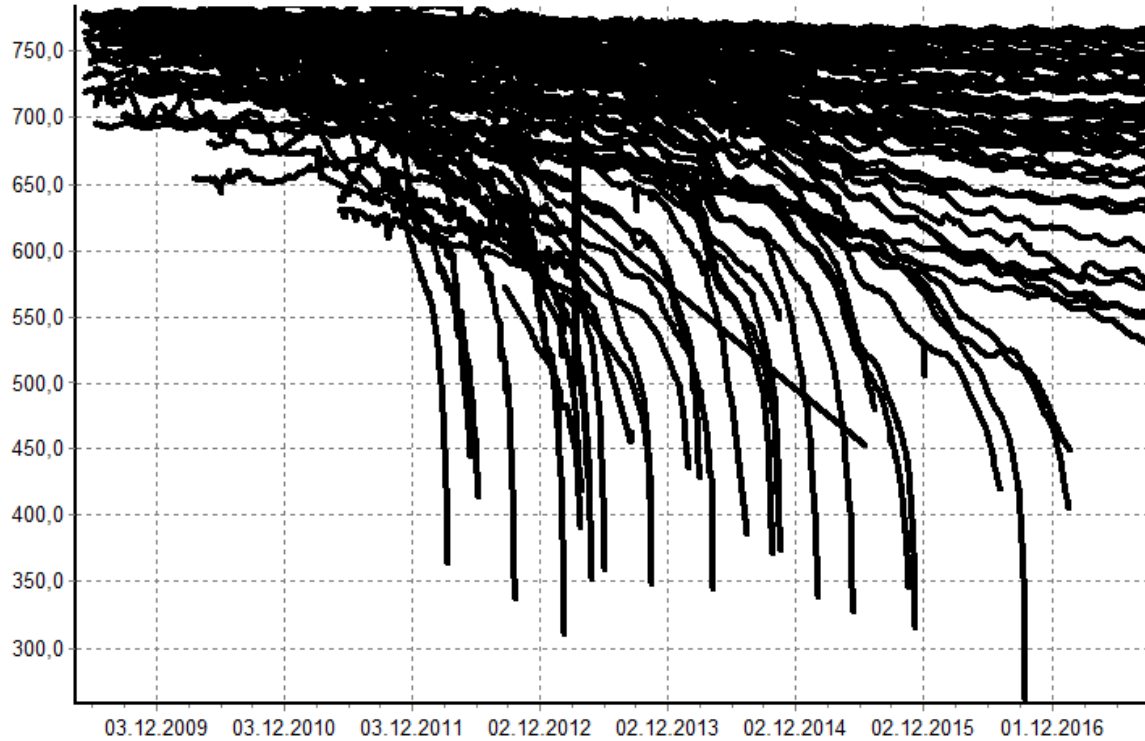


Рис.1. Снижение высоты орбиты фрагментов КА IRIDIUM 33 (всего зафиксировано 657 фрагментов, по состоянию на июль 2023 г на орбите остается более 200 фрагментов)

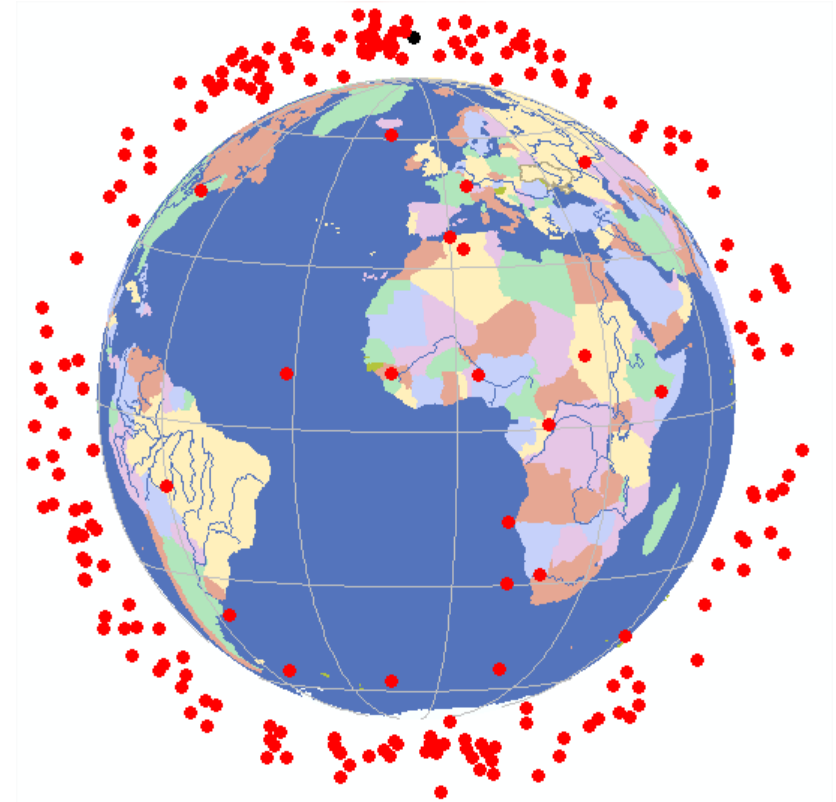


Рис.2. Положение фрагментов IRIDIUM 33 по состоянию на июль 2023 г

Предварительные выводы:

- должны быть предусмотрены гарантированные методы захоронения МКА, развернутых на LEO орбите;
- для VLEO – захоронение автоматическое

Обновление и совершенствование документов ГОСТ необходимо:

- для выполнения моделирования/прогнозирования спутниковых систем с требуемой точностью на этапах разработки, эксплуатации и последующего захоронения;
- для обеспечения функционирования спутниковых систем на орбите (например, определение координат по картам магнитного поля Земли и т.д.).

Примеры:

1. Гравитационное поле Земли:

- ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛИ 1990 ГОДА (ПЗ-90.11), Специализированный справочник, 2020 г, где описана «Модель аномального гравитационного поля Земли ТМ-60»

2. Атмосфера Земли:

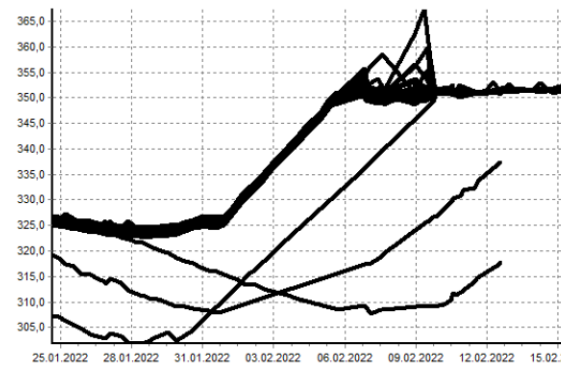
- ГОСТ 4401-81 (1981 г) Атмосфера стандартная.
- ГОСТ Р 25645.166-2004 Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли
- ГОСТ 25645.302-83(1983г) Расчеты баллистические искусственных спутников Земли. Методика расчета индексов солнечной активности.

3. Магнитное поле Земли

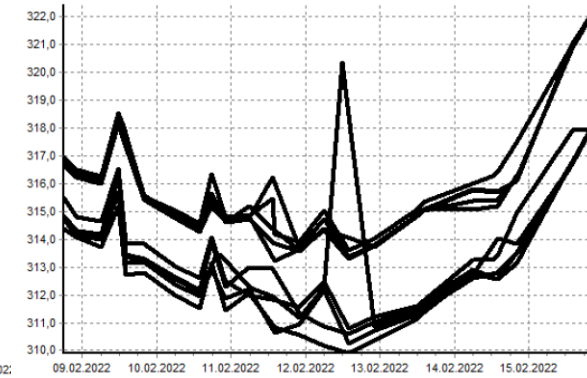
- 25645.127-85(1985г) Магнитосфера Земли

4. Солнечный ветер

- ГОСТ 25645.136-86 (1986г) Ветер солнечный



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.1 Деструктивное влияние атмосферы в период солнечной активности

Предварительные выводы:

- как в моделях для прогнозирования, так и в составе ПО на борту МКА необходимо использовать российскую нормативно-техническую базу;
- необходимо актуализировать документы ГОСТ, прежде всего в части описания моделей различных физических полей и явлений (атмосфера, гравитация, магнитное поле, солнечные пятна и т.д.)
- если актуализировать не удастся, то в соответствующем ГОСТе нужно указывать: «использовать такую то зарубежную модель» .



САПР «Альбатрос» - система имитационного моделирования функционирования орбитальных группировок различного назначения

В состав ПК АСТ входят:

- частный каталог ИСЗ (включая историю баллистических данных), сформированный на основе данных каталога NORAD;
- пользовательская база данных (БД) ИСЗ;
- пользовательская БД РЭС наземного базирования.

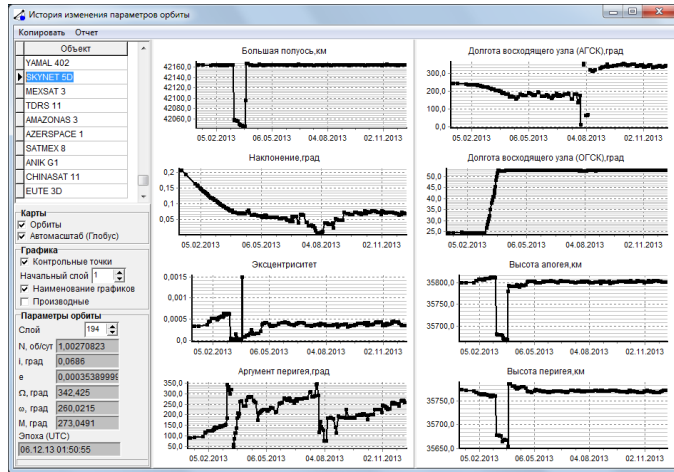


Рис.1. История баллистических данных

Орбитальная группировка

Поиск объекта: Наимен., NORAD, COSPAR

По типу орбиты: ГСО, Тандра, ГСО 24 ч, Молния, ГСО 12 ч, ССО (SSO), ГСО 8 ч, СКО (МEO), ГСО 6 ч, НКО (LEO)

Дата запуска: От: 01.01.1990, До: 05.12.2013

Позиция на ГСО: От: -180, До: 180

Тип объекта: Все, КА, РЕ

Орбитальная группировка

Объект	NORAD	COSPAR	ДВУ АГСК	ДВУ ОГСК	N об/орб	Наклонение	Экцентриситет	милг /
SKYNET 4A	20401	1990-001A	25.2031	157.845	0.99000284	12.3763	0.0013551	190
JCSAT 2	20402	1990-001B	54.5933	-6.973	0.98539642	11.0215	0.0061834	200
LEASAT 5	20410	1990-002B	23.0219	72.065	1.00271891	10.7352	0.0001893	201
COSMOS 2056	20432	1990-004A	255.6014	101.217	14.32937976	74.0334	0.0023363	336
SPOT 2	20436	1990-005A	149.832	-111.02	14.6394428	98.7409	0.014987	297
OSCAR 14 (IUSAT 3)	20437	1990-005B	273.8199	-116.921	14.3188841	98.5329	0.0010993	27.
OSCAR 15 (IUSAT 4)	20438	1990-005C	273.2878	-79.064	14.30708996	98.5772	0.0010927	68.
OSCAR 16 (PAC SAT)	20439	1990-005D	274.8315	-16.765	14.32242151	98.4895	0.0011101	21
OSCAR 17 (DOVE)	20440	1990-005E	276.7336	46.819	14.3258901	98.4695	0.001085	8.1
OSCAR 18 (WEBERSAT)	20441	1990-005F	275.3713	-66.828	14.32300689	98.4751	0.0011645	16.
OSCAR 19 (LUSAT)	20442	1990-005G	276.1393	-20.378	14.32449718	98.4596	0.0011806	10.
NAVSTAR 18 (USA 50)	20452	1990-008A	294.4494	111.414	1.89596655	55.7887	0.0012779	230
COSMOS 2058	20465	1990-010A	45.2708	131.676	14.93877391	82.493	0.0015508	311
STTW-4	20473	1990-011A	29.5314	84.813	1.00220458	13.9452	0.0004585	48.
MOS 1B (MOMO 1B)	20478	1990-013A	284.2384	-142.566	13.95186872	99.1193	0.0005824	26.
DEBIT (ORZURU)	20479	1990-013B	336.001	73.935	12.83758483	99.0214	0.0539983	67.
JAS 1B (FUJI 2)	20480	1990-013C	334.0622	-155.917	12.83387712	99.0221	0.0541029	73.
RADUGA 25	20499	1990-016A	16.9346	-57.564	1.00343931	14.4592	0.0005027	108
MADEZHDA 2	20508	1990-017A	214.2913	80.039	13.74139482	82.956	0.0043248	235
OKEAN 2	20510	1990-018A	327.3808	-164.28	14.94888479	82.5174	0.0013588	19.

Число записей - 1940

Рис.2. Текущие параметры орбит ИСЗ в околоземном космическом пространстве

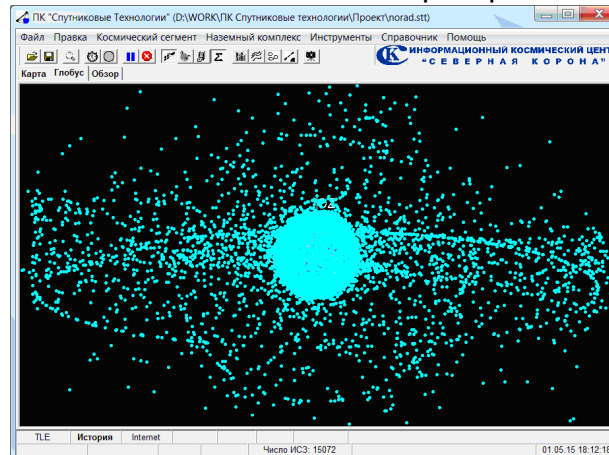


Рис.3. Космический мусор + действующие спутники (>50 тыс. объектов)

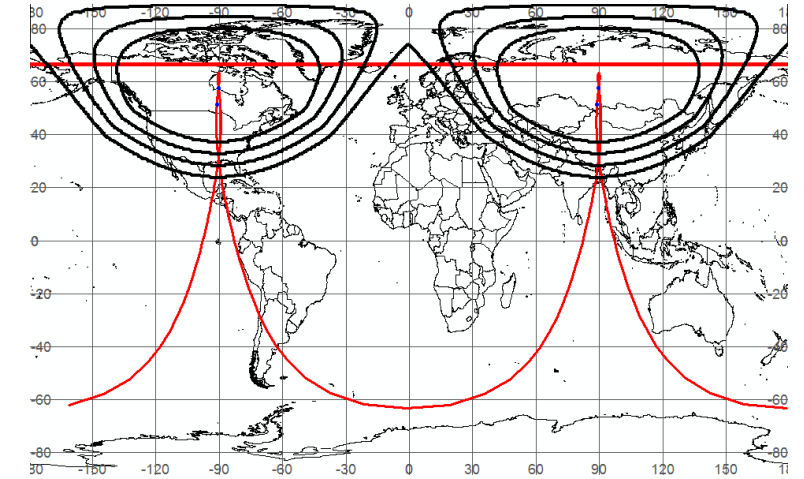


Рис.4. Трасса и гарантированные зоны радиовидимости проекта системы «Экспресс-РВ»

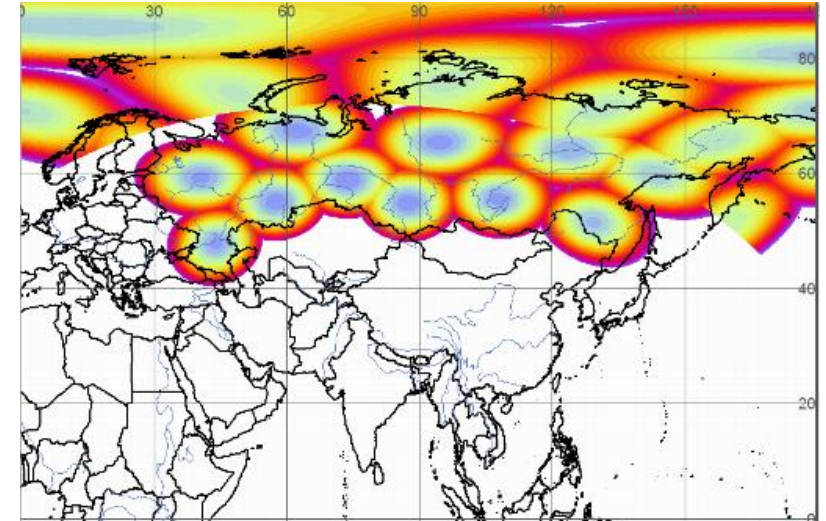


Рис.5. Парциальные зоны обслуживания лучей проекта системы «Экспресс-РВ»



САПР «Альбатрос» - система имитационного моделирования функционирования орбитальных группировок различного назначения

Анализ ЭМС «НГСО-НГСО» и «НГСО – GEO»

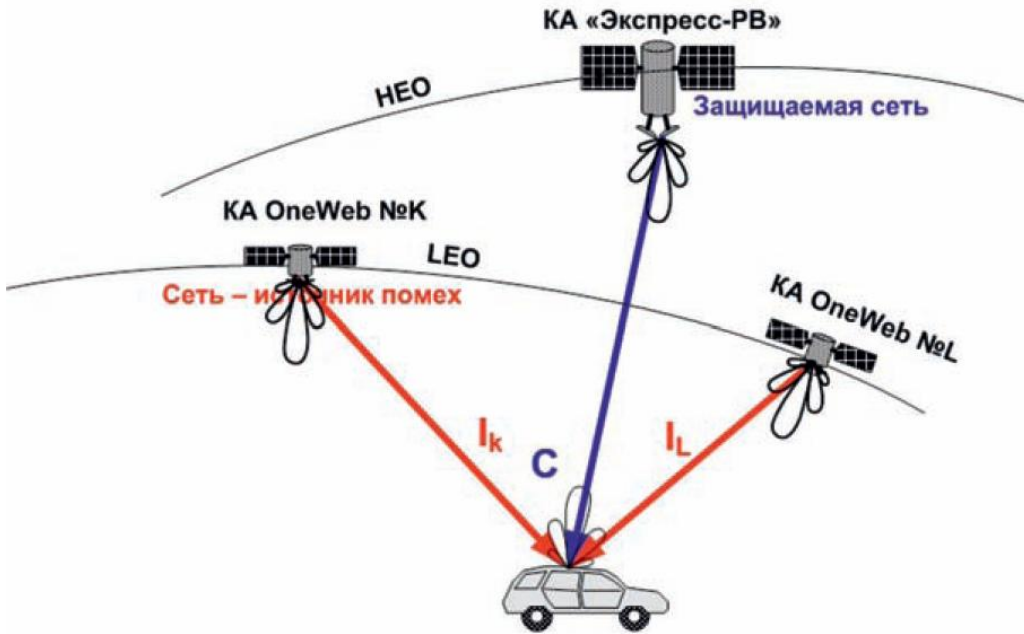
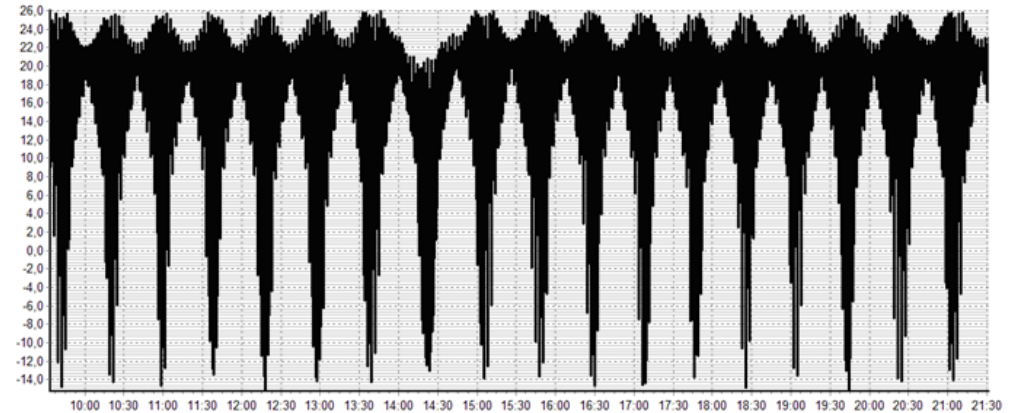


Рис.1. Постановка задачи анализа ЭМС между системами «Экспресс-РВ» и OneWeb – анализ помех по входу абонентской станции системы «Экспресс-РВ»



А) на интервале 12 ч



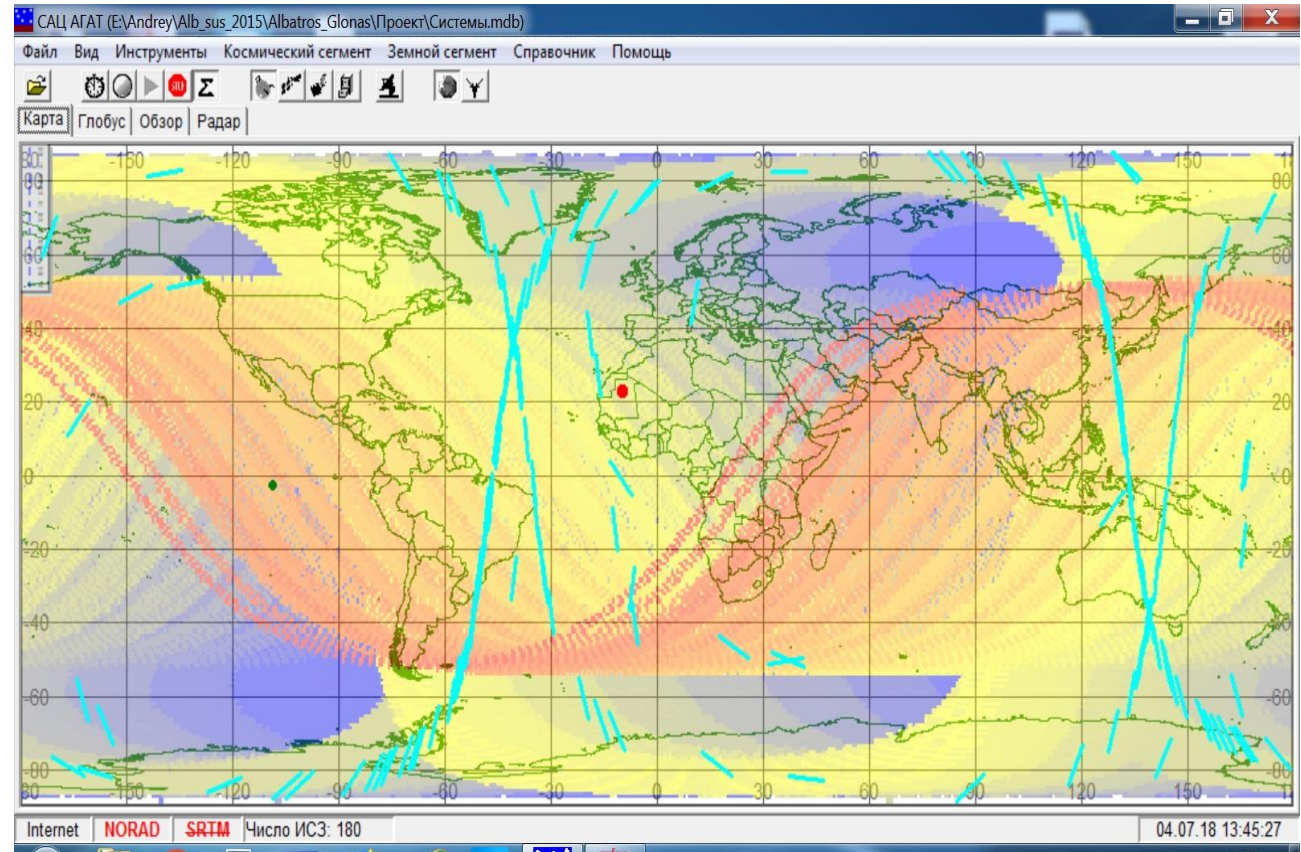
Б) на интервале 1 ч

Рис.2 Отношение C/I (дБ) на входе приемника абонентской станции (с антенной 40 см) системы «Экспресс-РВ» от спутников системы OneWeb при работе в сопряженной полосе частот



САПР «Альбатрос» - система имитационного моделирования функционирования орбитальных группировок различного назначения

Пример: оценка минимального, максимального и среднего временных интервалов прохода КА разнородной группировки ДЗЗ территории Земли с учетом углов захвата целевой аппаратуры. Цвет – значение интервала времени





САПР «Альбатрос» - система имитационного моделирования функционирования орбитальных группировок различного назначения

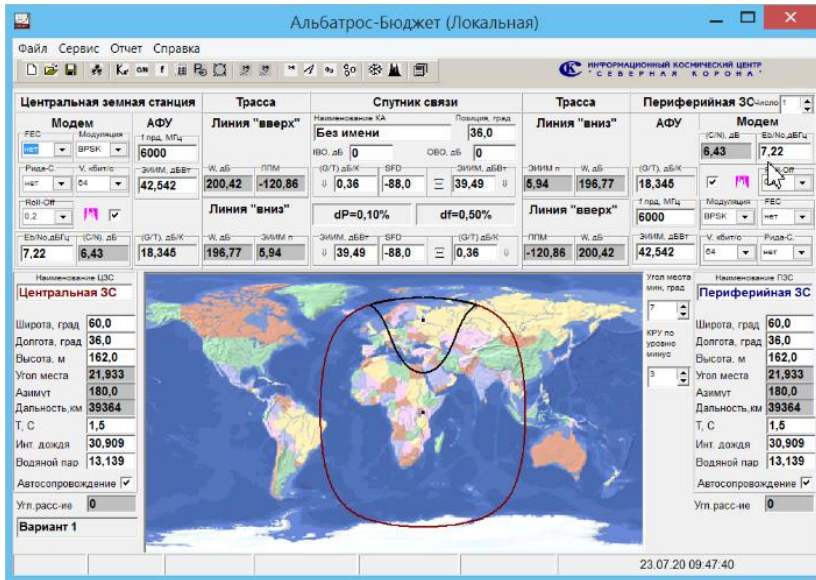


Рис.1 Расчет спутниковых радиолиний

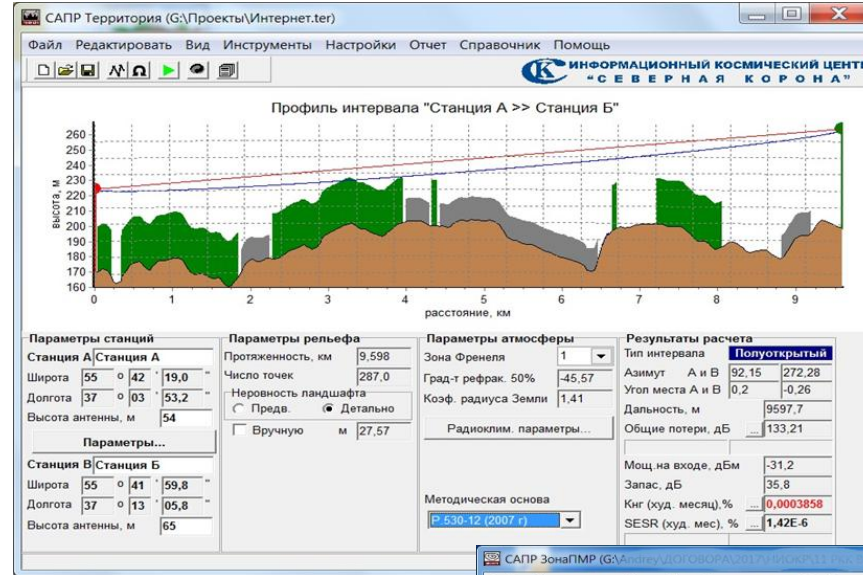


Рис.3 Расчет качественных показателей наземных радиолиний

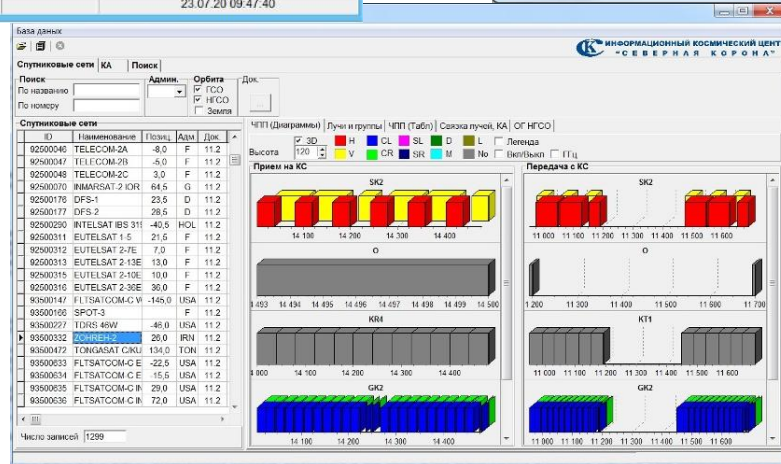


Рис.2 Анализ заявленных спутниковых сетей BRIFIC

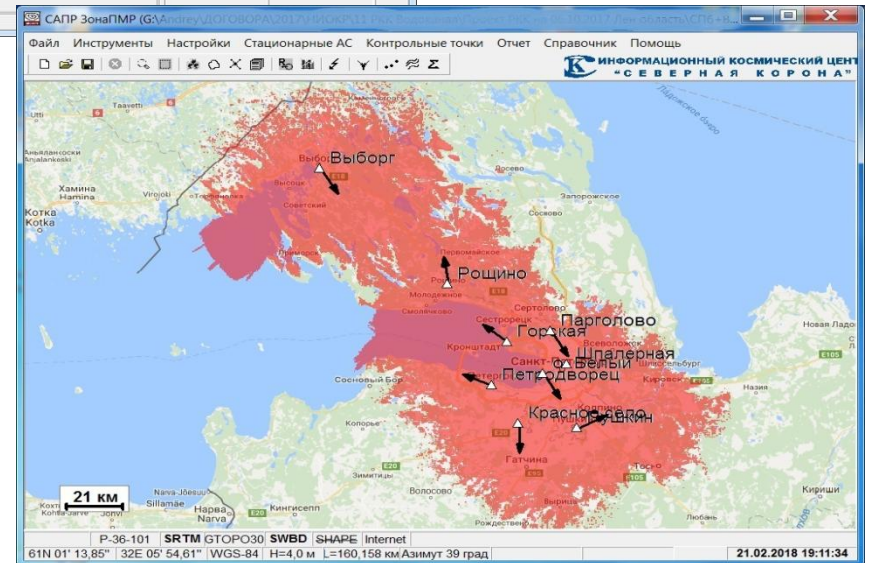


Рис.4 ЧТП сетей ПМР (TETRA, DMR, LTE и др.)



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
сайт: www.spacecenter.ru