

В.В. Сазонов, И.А. Самыловский*, А.А. Филиппов, А.Ю. Комаровский
MIDE – цифровая платформа для моделирования
космических систем целевого назначения

*ivan.samylovskiy@cosmos.msu.ru

<https://astro-dynamics.ru/>

06.09.2023 г.

Предпосылки разработок

- Потребность в программных средствах управления многоспутниковыми группировками (быстрое построение оптимальных и суб-оптимальных стратегий управления)
- Необходимость разработки и внедрения отечественных программных решений («Российский STK») для проектных расчетов космических систем, а также их моделирования и управления ими
 - Должны работать под ОС специального назначения
 - Должны поддерживать функциональность работу как с группировкой в целом, так и с узлами отдельных аппаратов
 - Должны обладать разумной универсальностью (диапазон орбит, состав моделируемых средств, настройка «нагрузки» отображения, ближний-дальний космос)

«STK от МГУ» – программный комплекс MIDE (интегрированная среда разработки миссий)



- Функциональное ядро – полностью отечественной разработки
- Основа – опыт коллектива ФКИ МГУ в разработке САПР для космоса:
 - Моделирование манёвров
 - Моделирование выработки электроэнергии, теплового потока, освещенности
 - Моделирование работы СЭС
 - Моделирование радиолинии «Земля-борт»
 - Моделирование работы системы стыковки
 - Планирование съемки ДЗЗ
 - Планирование и реализация сеансов связи в S,X-диапазонах
- Модульная, расширяемая, достраиваемая структура для разработки собственных приложений.
 - В настоящее время разрабатывается графическая оболочка на Unreal Engine
 - В настоящее время разрабатываются плагины Python
- Постоянно развивающаяся функциональность, в т.ч. по запросам пользователей
- Демо-версии и обновления доступны на сайте команды «Астродинамика» <https://astro-dynamics.ru/> и баллистического центра ФКИ МГУ
- Кроссплатформенность: MS Windows, Astra Linux 1.5, Astra Linux 1.6 Common, Special Edition

MIDE – архитектура – простой пример



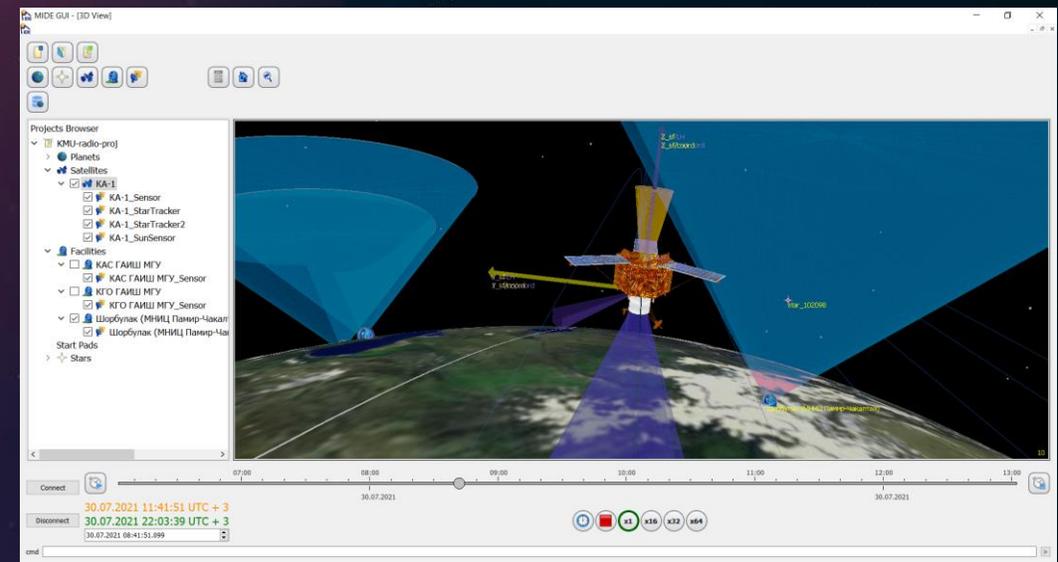
```

xml version="1.0"
<mideProject name="KMU-radio-proj" version="1.0" StartTime="Вт июл 30 11:38:20 2021 GMT" CurTime="Вт июл 30 08:48:46 2021 GMT" EndTime="Сб июл 31 11:38:20 2021 GMT">
<dataSources>
<dataSource key="DefaultEphemeris" type="DE430" path="..\PhysicalObjectsData\PlanetEphemeris\plnep4.430" />
</dataSources>
<stars>
<info J2000_key="J2000" J2000_GlobalKey="Earth/J2000">
<starFile filePath="..\PhysicalObjectsData\StarCatalogues\stars.txt" Type="h" nms="11767,15863,25336,25428,26311,26727,28360,30324,31681,33579,34444,36850" />
</info>
</stars>
<planet>
<planet key="Earth" imagePath="..\images/map/earth_day.jpg" EphemerisData="DefaultEphemeris" mu="398600.44188" B="6371" isChecked="true">
<orientation key="Attitude">
<properties defType="or_quat" check="false" color="#ffff00" scale="1" t="1" x="0" y="0" z="0" />
<dependentOn DependencyType="base_CS" key="Earth/ECEF" type="cs" />
</orientation>
<report key="Earth/Attitude_report">
<properties separator="|" secStep="60" format="time_utc" defType="user_report" check="false" color="#ffff00" scale="1" />
<dependentOn DependencyType="Earth/Attitude" key="Earth/Attitude" type="orientation" />
</report>
</planet>
<cs key="ECEF">
<properties defType="cs_GCS" check="false" in_time="Вт июл 30 11:38:20 2021 GMT" translMat="0.171341,0.985212,-0.000366229,-0.98521,0.171341,0.00203568" />
<dependentOn DependencyType="base_CS" key="Earth/J2000" type="cs" />
<depending key="Earth/Attitude" type="orientation" />
<depending key="Earth/ECEF" type="vector" />
<depending key="Earth/ECEF" type="vector" />
<depending key="Earth/ECEF" type="vector" />
<depending key="KAC FANSI MIV/Attitude" type="orientation" />
<depending key="KAC FANSI MIV/BF/axis" type="vector" />
<depending key="KAC FANSI MIV/BodyFrame" type="cs" />
<depending key="KAC FANSI MIV/position" type="dot" />
<depending key="KAC FANSI MIV/velocity" type="vector" />
<depending key="KTO FANSI MIV/Attitude" type="orientation" />
<depending key="KTO FANSI MIV/BF/axis" type="vector" />
<depending key="KTO FANSI MIV/BodyFrame" type="cs" />
<depending key="KTO FANSI MIV/position" type="dot" />
<depending key="KTO FANSI MIV/velocity" type="vector" />
<depending key="ШопБулак (НИИЦ Палео-Чкал) /Attitude" type="orientation" />
<depending key="ШопБулак (НИИЦ Палео-Чкал) /BF/axis" type="vector" />

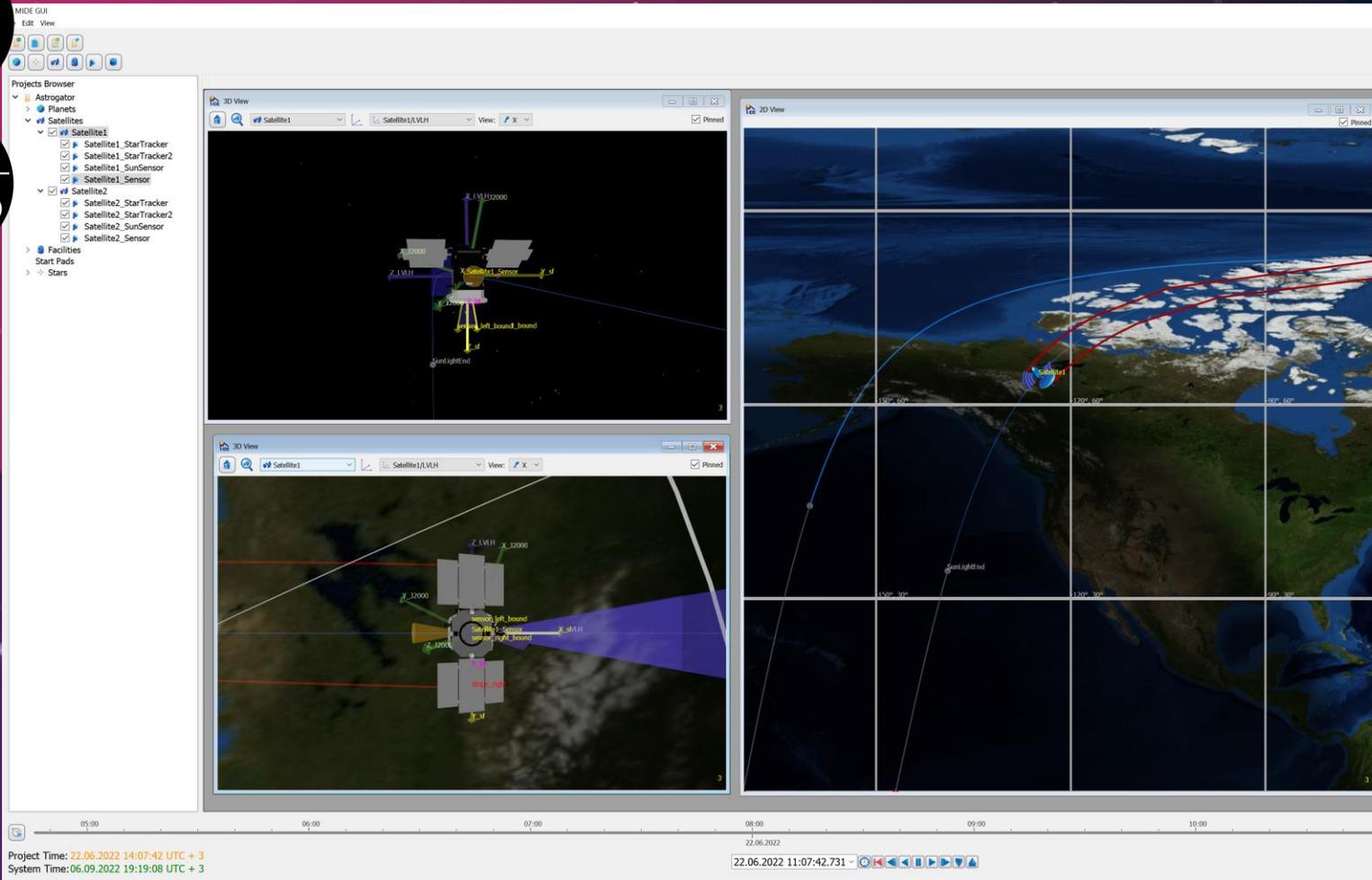
```

Вот пример проекта

- В проекте – спутник с четырьмя сенсорами, три наземные станции, планеты, навигационные звезды
- Источники данных – TLE, эфемериды DE 430, каталог Hipparcos



А вот результат его «запуска»



- Пример – модель КА ДЗЗ
- Настраиваемая орбита, маневры, системы координат, состав приборов
- Настраиваемые параметры покрытия

Текущая функциональность «под ключ» (доступно в демо-версии на сайте)



Моделирование КА:

Движение ЦМ пассивное:

- SGP4 / SDP4, оскулирующие элементы
- уравнения движения, с учетом:
 - Геопотенциала (EGM96 + .grv-файлы)
 - Атмосферы
 - Светового давления
 - Неравномерности вращения Земли
 - Гравитации планет

- Движение ЦМ активное : цепочки импульсных маневров с выбором СК привязки, направления, ΔV
- Моделирование группировок (см. примеры)
- Моделирование приборов: оптика, радио
- Вращательное движение:
 - Стабилизированное относительно СК
 - Кинематические уравнения Эйлера

Для ВСЕХ моделируемых объектов доступны:

- Пользовательское создание систем координат, точек, векторов, плоскостей, углов
- Треки точек и векторов
- Механизм построения отчетов

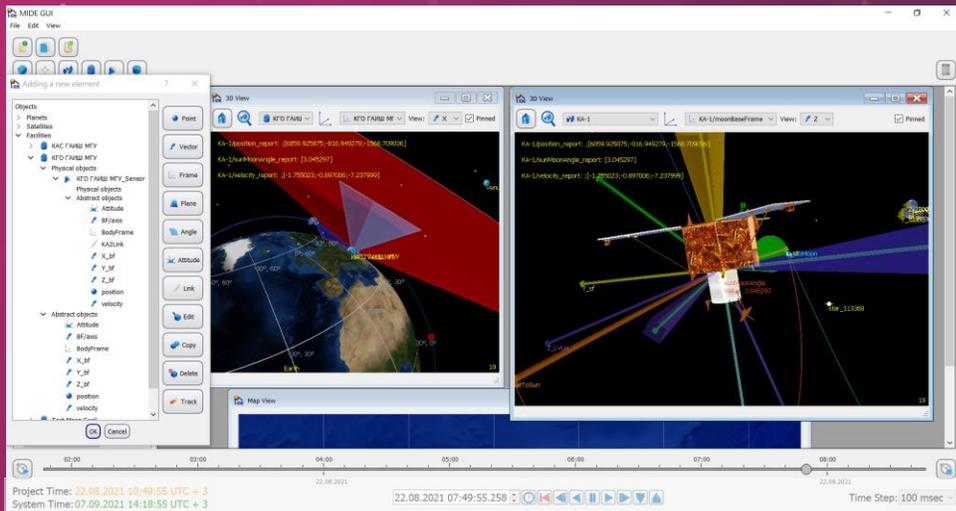
Моделирование окружающего пространства:

- Звезды
 - Пользовательский ввод
 - Загрузка звездного каталога
- Планеты
 - Эфемериды DE (JPL)
 - Эфемериды VSOP
 - Аналитические модели

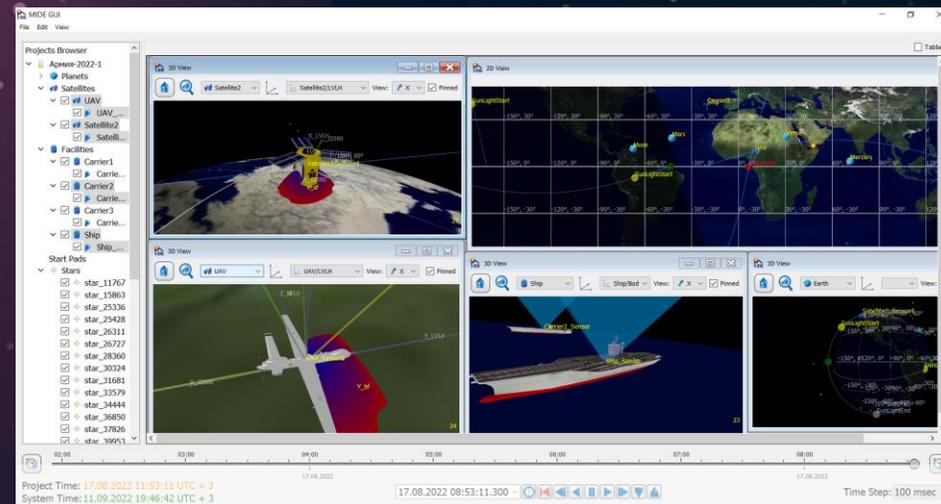
Наземные станции:

- Аналогично КА: расположение относительно выбранной СК, оптические / радио устройства
- Зоны видимости

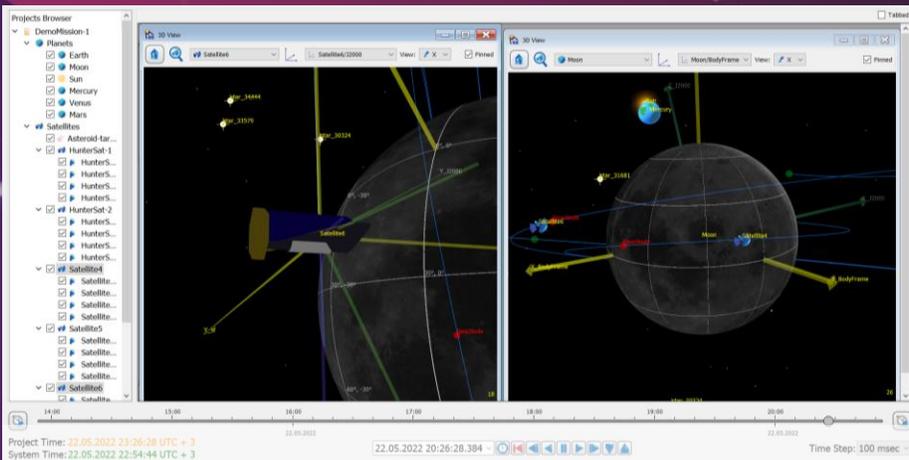
MIDE – примеры использования



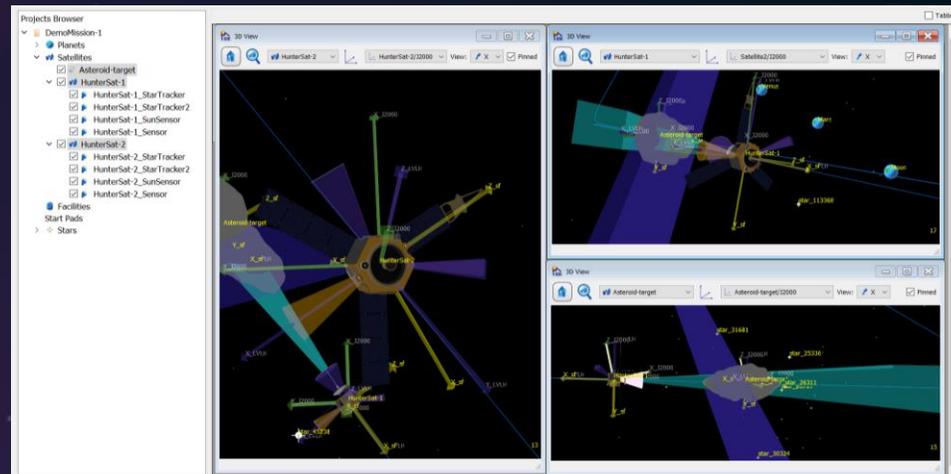
Спутник и наземные станции



Спутник, БПЛА, корабли



Земля-Луна



Дальний космос

MIDE – Астралinux



MIDE v. 1.0.1

Файл Редактировать Окна Настройки

Браузер проектов

- testProject
 - Планеты
 - Космические аппараты
 - Satellite1
 - Satellite1_Sensor4
 - NOAA 15
 - DMPSP 5D-3 F15 (USA 147)
 - DMPSP 5D-3 F16 (USA 172)
 - NOAA 18
 - METEOSAT-9 (MSG-2)
 - EWS-G1 (GOES 13)
 - DMPSP 5D-3 F17 (USA 191)
 - FENGYUN 3A
 - FENGYUN 2E
 - NOAA 19
 - GOES 14
 - METEOR-M 1
 - DMPSP 5D-3 F18 (USA 210)
 - GOES 15
 - COMS 1
 - FENGYUN 3B
 - SUOMI NPP
 - FENGYUN 2F
 - METEOSAT-10 (MSG-3)
 - METOP-B
 - FENGYUN 3C

3D окно

Earth Камера: X Прикрепить

05:00 06:00 07:00 08:00 09:00 10:00 11:00

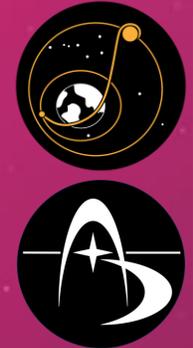
11.04.2023

Время проекта: 11.04.2023 12:26:48 UTC + 3
Системное время: 27.06.2023 17:49:56 UTC + 3

11.04.2023 09:26:48.146 Шаг времени: 100 мсек

цыплат... mide : b... springl... bin : MI... Систем... MIDE : b... mapwid... mide-b... bin : MI... MIDE v. ... Ассисте... EN 17:49

Моделирование группировок - СВЯЗЬ



Project Time: 27.06.2022 19:22:44 UTC + 3
System Time: 27.06.2022 19:12:46 UTC + 3

27.06.2022 16:22:44.322

Time Step: 100 msec

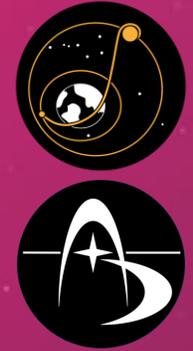
Группировка связи (OneWeb) + «модельный» спутник

Моделирование группировок - ДЗЗ



The screenshot displays the MIDE GUI software interface. On the left, a 'Projects Browser' lists various satellite constellations, including TERRA, MAROC-TUBSAT, AQUA, IRS-P6, SHIYAN 1, AURA, IRS-P5, SINAH 1, EROS B, RESURS-DK 1 (with sub-items RESURS-DK 1 and RESURS-DK 1_Sensor1), ARIRANG-2, LAPAN-TUBSAT, CARTOSAT-2, HAIYANG-1B, COSMO-SKYMED, TERRASAR-X, WORLDVIEW-1, YAOGAN 3, COSMO-SKYMED, RADARSAT-2, CARTOSAT-2A, HUANJING 1A, HUANJING 1B, GEOEYE 1, THEOS, COSMO-SKYMED, and YAOGAN 4. The main window is split into two panels: the left panel shows a 3D globe with a dense network of blue lines representing satellite orbits and positions, with labels like 'star_25428' and 'RESURS-DK 1_Sensor1'; the right panel shows a 3D model of a satellite (RESURS-DK 1) with its solar panels and sensor, labeled 'RESURS-DK 1_Sensor1', with coordinate axes 'X_551H', 'Y_551H', and 'Z_32000'. At the bottom, a timeline shows the 'Project Time' as 11.09.2022 20:11:47 UTC + 3 and 'System Time' as 11.09.2022 20:01:49 UTC + 3. A playback control bar includes a time slider set to 11.09.2022 17:11:47.376 and a 'Time Step' of 100 msec.

Группировка ДЗЗ (это все 180 аппаратов из файла resource с сайта celestrak)



MIDE GUI
File Edit View

Projects Browser

- SKYS...
- WOR...
- GAO...
- YAO...
- YAO...
- ASN...
- HOD...
- QSA...
- YAO...
- YAO...
- CBE...
- RES...
- YAO...
- SMAP
- KOM...
- SEN...
- GAO...
- CAR...
- YAO...
- GAO...
- LAPA...
- YAO...
- YAO...
- KEN...
- TELE...
- GAO...
- JASO...
- SEN...
- ZIYU...
- NUS...
- NUS...
- CAR

3D View Earth View: X Pinned

3D View GPS B: GPS BIIR-2 (PRN) View: X Pinned

12:00 13:00 14:00 15:00 16:00 17:00 18:00
11.09.2022
Project Time: 11.09.2022 21:45:21 UTC + 3
System Time: 11.09.2022 20:35:23 UTC + 3
11.09.2022 18:45:21.554
Time Step: 100 msec

Группировка ДЗЗ + группировка навигации (добавили все 156 аппаратов из файла gnss с сайта celestrak)



Модернизация

Моделирование КА:

- Активные участки траектории + двигатель малой тяги
- Моделирование «связок» объектов (КА + разгонный блок, выведение полезной нагрузки, орбитальная станция)
- Генерация измерений приборов в соответствии с моделью ошибок
- Вращательное движение:
 - Динамические уравнения Эйлера с учетом возмущающих моментов
- Моделирование среды:
 - Тайловая структура виртуального глобуса, включая тайлы рельефа
 - Векторные данные на глобусе, включая дороги, каналы связи и т.д.

2023-2025 гг.

Мультиагентные технологии

- Планировщик расписаний для оптической аппаратуры группировки ДЗЗ:
 - На входе – набор КА с приборами, набор объектов (наземных, космических) съемки, набор наземных станций + ограничения по памяти, энергетике, кинематике, динамике;
 - На выходе – суб-оптимальное расписание работы камер КА, наземных станций для обеспечения съемки и сброса.
 - Планировщик расписаний для радарной съемки.
-
- Оптимизационные расчеты: окна запуска, расчет цепочек коррекций
 - Моделирование миссий в дальний космос (по данным Спектр РГ, ЭкзоМарс)
 - Моделирование космического мусора техногенного и естественного происхождения

Масштабирование

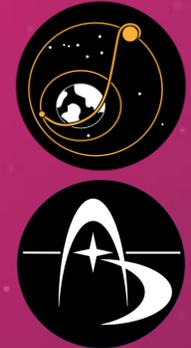
Формирование системы сервисов

Система плагинов для настройки функциональности под конкретного заказчика

Веб-сервис для отображения ситуации в ОКП в браузере

Демо-версия доступна на нашем сайте :

<https://astro-dynamics.ru/astroportal>



Браузер проектов

- ▼ L1-mission
- ▶ Планеты
- ▼ Космические а...
- ☑ Satellite1
- ▶ Наземные пун...
- ▶ Стартовые площа...
- ▶ Звёзды

Начальное время трай: 02.09.2023 02:18:18.848 Конечное время трай: 21.09.2023 14:18:18.848 Шаг, секунды

X, km: 4646,59983047 Vx, km/s: -5,67427347 Луна Юпитер Солнечное давление

Y, km: 7236,65046935 Vy, km/s: 3,64340910

Z, km: 0,00000000 Vz, km/s: 0,93652510

Coordinate system: Earth/J2000 CS is chosen

Сгенерировать вектор состояния с помощью орбитальных элементов Кеплера

Большая полуось, км: 8600,52740180 Долгота восходящего узла, рад: 1,00000000

Эксцентриситет: 0,00006132 Аргумент перигея, рад: 0,00000000

Наклонение, рад: 0,13800000 Истинная аномалия, рад: 0,00000845

Добавить манёвр

Projection, vx: 0,00000000 Добавить манёвр

Projection, vy: 0,00000000

Projection, vz: 0,00000000

Тип: Прогноз ОДУ

Начальное время трай: 02.09.2023 02:18:18.848

X, km: 4646,59983047 Vx: 4646,59983047

Y, km: 7236,65046935 Vy: 7236,65046935

Z, km: 0,00000000 Vz: 0,00000000

Coordinate system: Earth/J2000 CS is chosen

Сгенерировать вектор состояния с помощью

Большая полуось, км: 8600,52740180 Долгота восходящего узла, рад: 1,00000000 Сгенерировать вектор с

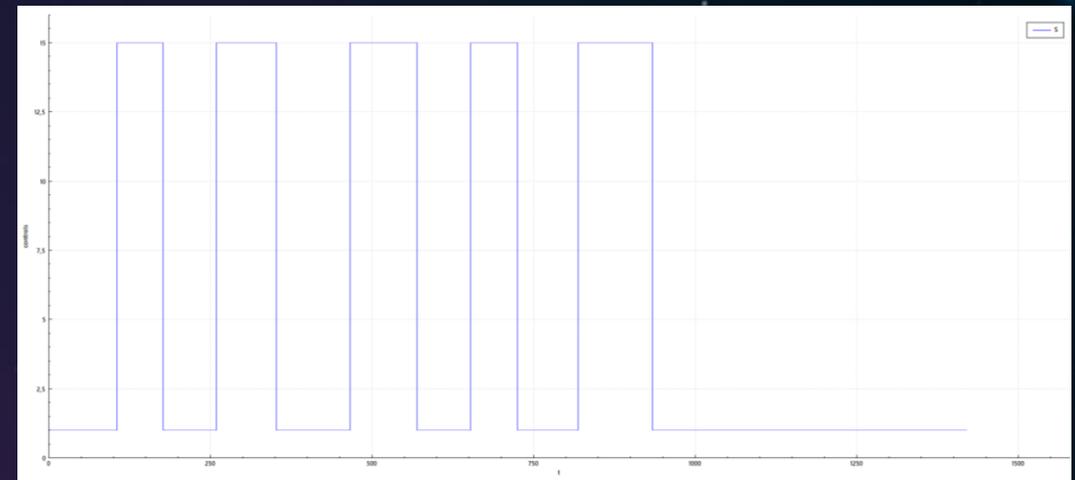
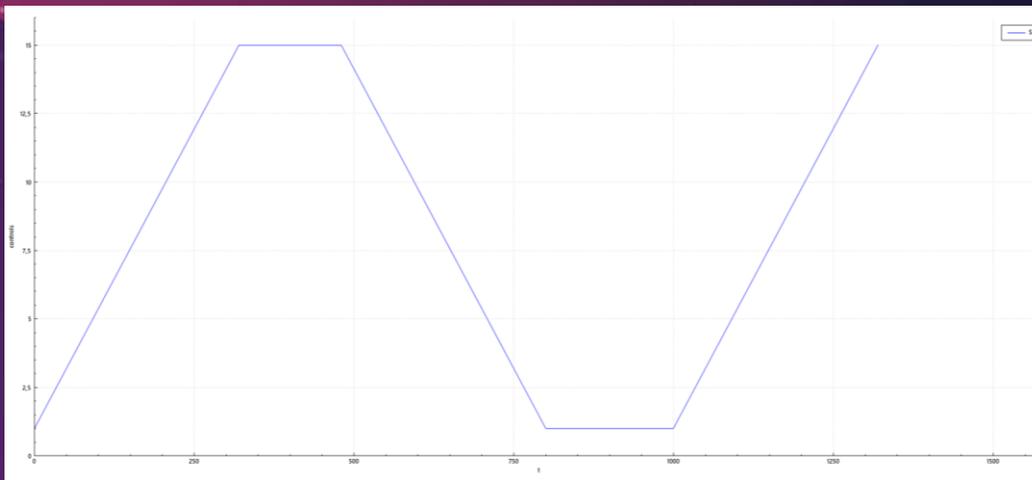
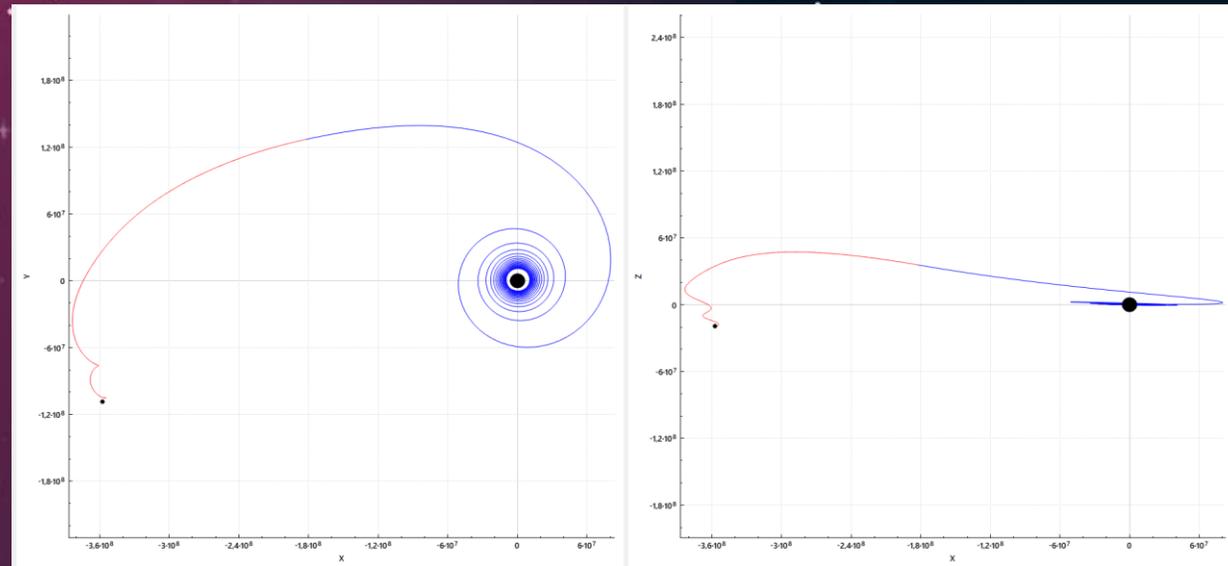
Эксцентриситет: 0,00006132 Аргумент перигея, рад: 0,00000000 =>

Наклонение, рад: 0,13800000 Истинная аномалия, рад: 0,00000845

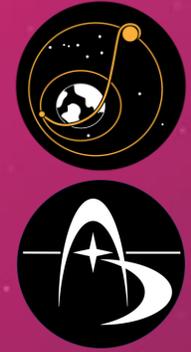
Добавить манёвр

Projection, vx: 0,00000000 Добавить манёвр Time Duration

Время проекта: 03.09.2023 06:02:14 UTC + 3
Системное время: 06.09.2023 11:29:20 UTC + 3



MIDE - планирование съёмки многолучевым прибором



Пользователь: astra-admin

Вкладки

3D окно

ISS

ISS/MLM

Камера: ISS/MLM

Прикрепить

2D окно

Равноугольная

ISS_MLM

- ISS_MLM_Ray1
- ISS_MLM_Ray2
- ISS_MLM_Ray3
- ISS_MLM_Ray4
- ISS_MLM_Ray5
- ISS_MLM_Ray6
- ISS_MLM_Ray11
- ISS_MLM_Ray12
- ISS_MLM_Ray13
- ISS_MLM_Ray14
- ISS_MLM_Ray15
- ISS_MLM_Ray16
- ISS_MLM_Ray17
- ISS_MLM_Ray18
- ISS_MLM_Ray19
- ISS_MLM_Ray20
- ISS_MLM_Ray21
- ISS_MLM_Ray22
- ISS_MLM_Ray23
- ISS_MLM_Ray24
- ISS_MLM_Ray25
- ISS_MLM_Ray26
- ISS_MLM_Ray7
- ISS_MLM_Ray8
- ISS_MLM_Ray9

Каховская ГЭС

Черное море

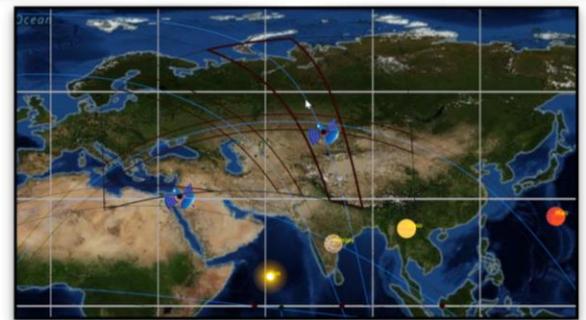
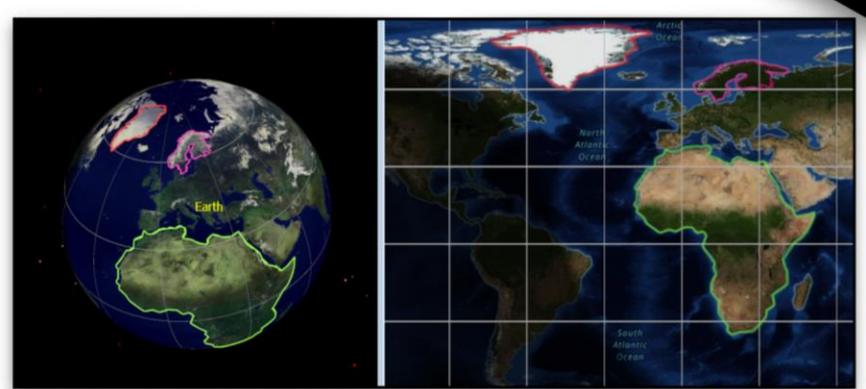
Earth

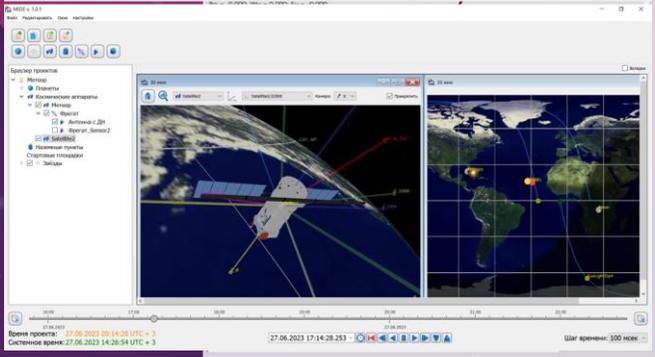
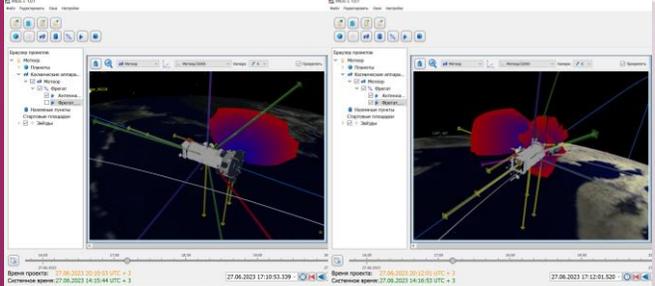
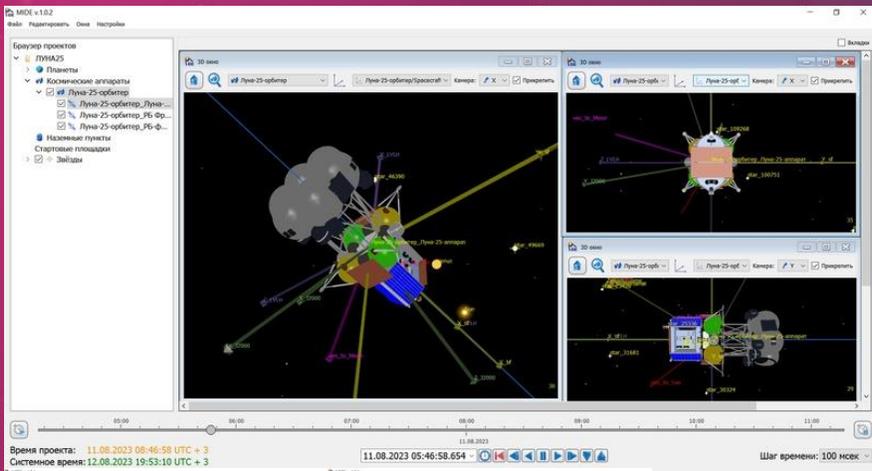
09:00 10:00 11:00 12:00

время проекта: 18.08.2023 12:57:40 UTC + 3

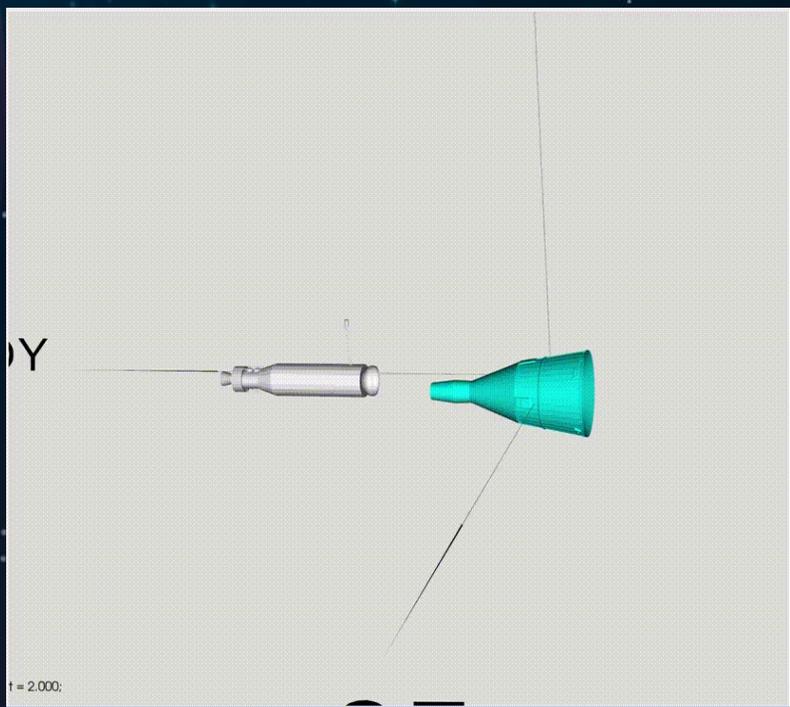
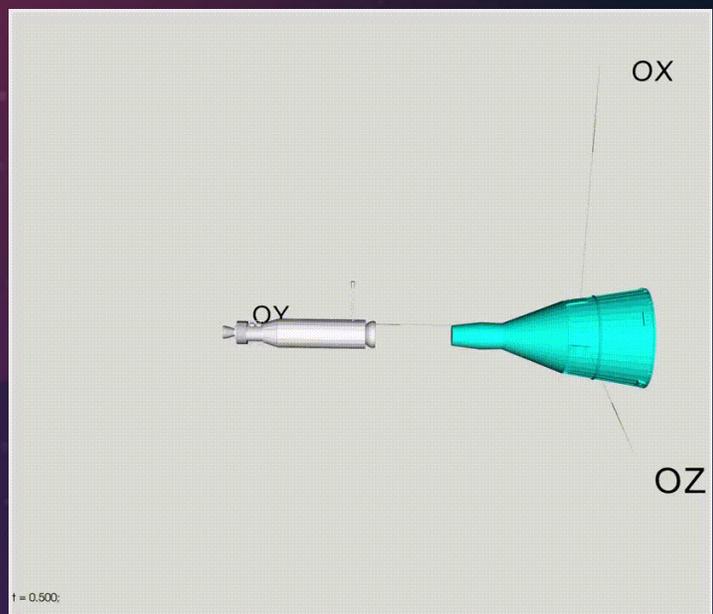
системное время: 31.08.2023 12:29:00 UTC + 3

18.08.2023 09:57:40.000



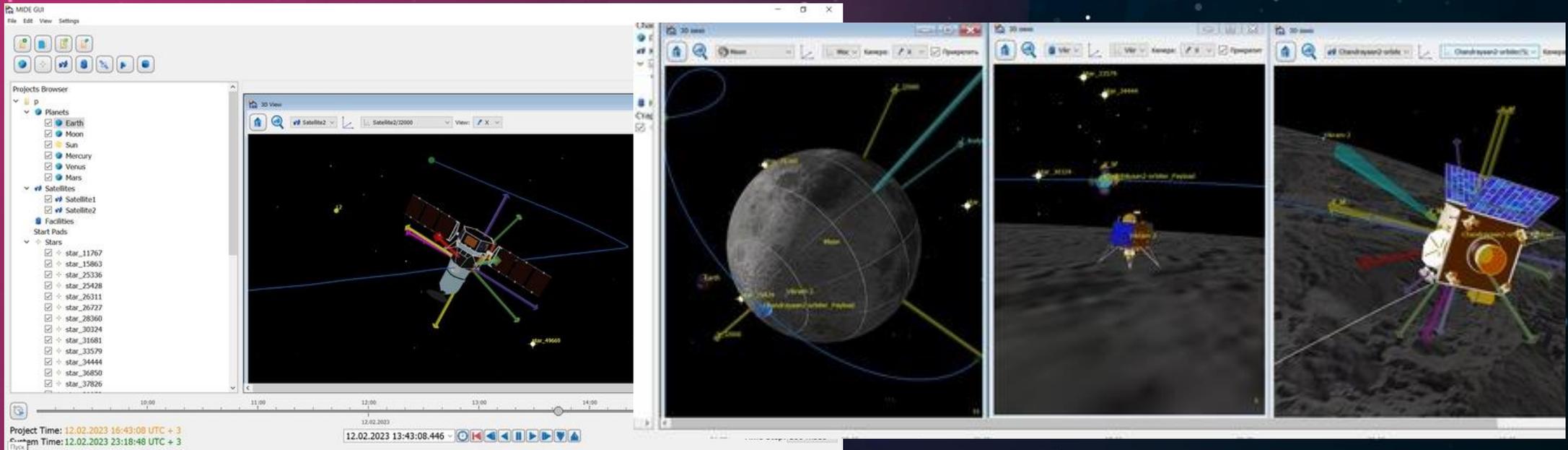
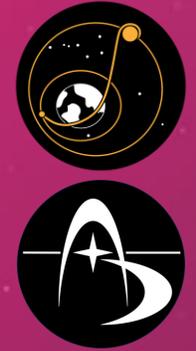


• Работа космических комплексов (КА + разгонный блок)



• Динамика вращения (связка из корневых библиотек и ПО на Python)

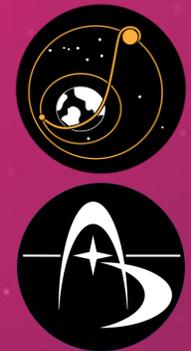
Дальний космос



Пример: моделирование полёта «Спектр-РГ»

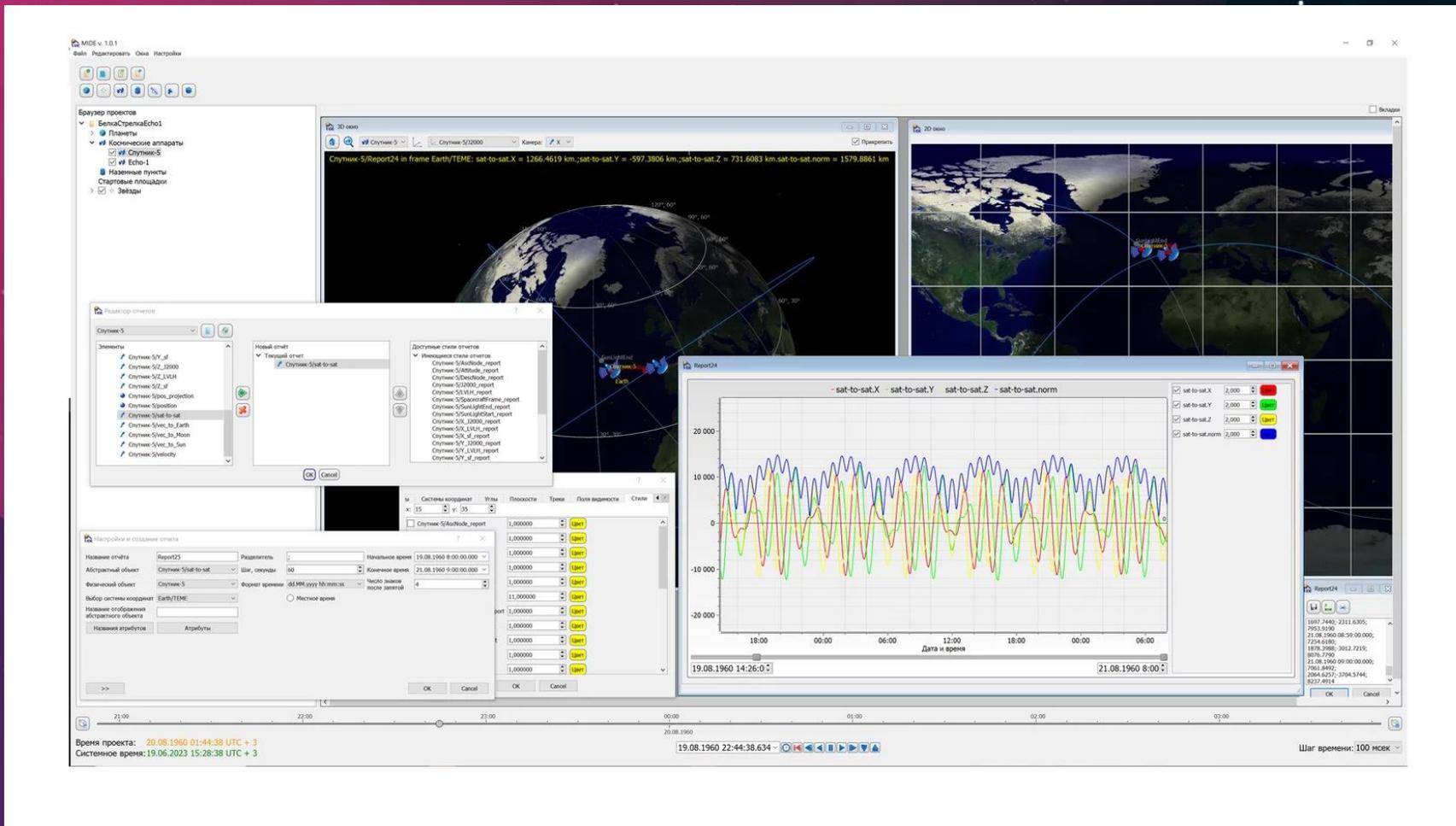
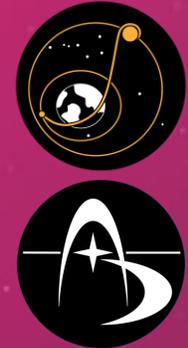
Пример: наблюдение окололунного КА за объектом На поверхности («по мотивам» Chandrayaan 2/3)



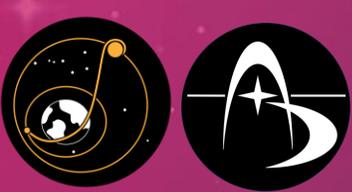


Прототип рамки гироскопа

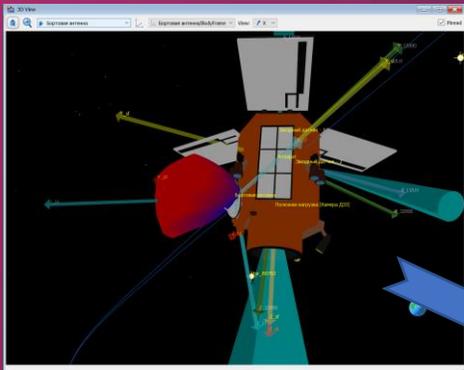
Защиты школьных проектов
(цепочки маневров, портал ситуации в ОКП)



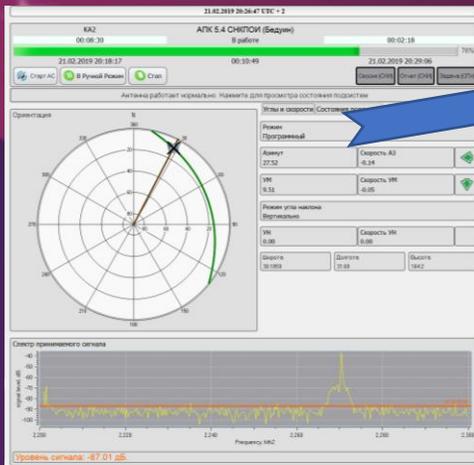
Поиск минимума расстояния на историческом примере (Спутник 5 vs. Echo 1)



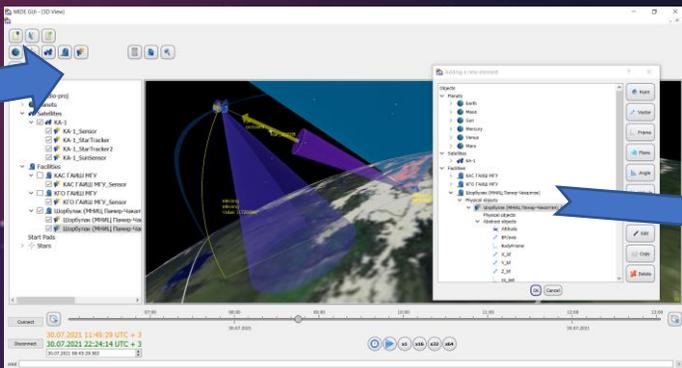
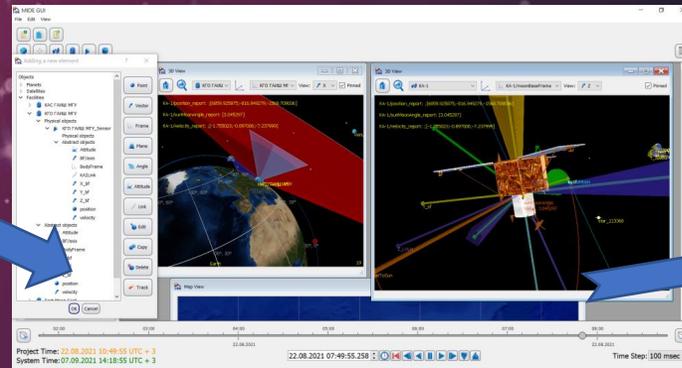
Телетметрия
Измерения
Заявки на эксперименты
...



Бортовые приборы: оптика,
радио, механика...

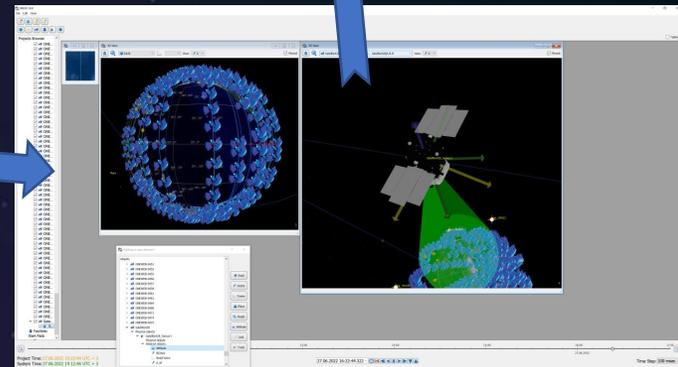


Управление наземными
антеннами S-,X-диапазона



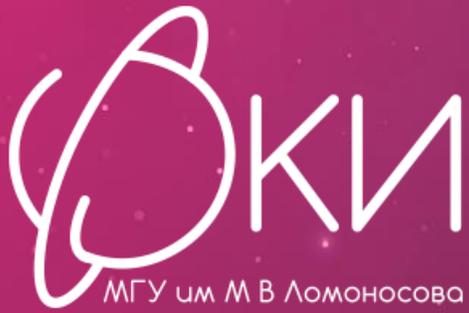
Моделирование
окружающей обстановки

Центр.управления



Комплексная модель спутниковой
группировки

Целевая информация
Результаты интеллектуализированной
обработки



Спасибо за внимание!

Обновления, контакты, демонстрационные материалы
доступны на нашем сайте <https://astro-dynamics.ru/>

