

А. Е. БОБКОВ, И. С. ПУРТОВ, А. И. ШУРОВ, Д. Ю. ЩЕРБИНИН

## ВИРТУАЛЬНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИИ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ СОВЕТСКИХ / РОССИЙСКИХ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОРАБЛЕЙ \*

Обычно в истории космонавтики обращают внимание на космонавтов, нештатные ситуации, проводимые космические эксперименты. При этом баллистико-навигационное обеспечение оказывается «забытой характеристикой», хотя его параметры могут много рассказать историку науки и техники. «Всякое проектирование начинается с баллистики и ею же заканчивается», — как-то отметил С. П. Королев <sup>1</sup>. Это действительно так, потому что в руках баллистиков оказывается вся траектория космического корабля: они проводят расчеты участка выведения, орбитального полета и спуска с орбиты на Землю.

Пилотируемые космические полеты выполняются уже более пятидесяти лет. За этот период космические средства доставки людей и грузов претерпели существенные изменения, вызванные эволюцией ракетно-космической техники. По мере изменения задач, решаемых в околоземном космическом пространстве, изменялась их конструкция, изменялись и траектории движения пилотируемых космических аппаратов (КА). Сегодня можно говорить о целесообразности ретроспективного анализа данных о траекториях движения пилотируемых КА, который дает историку немало дополнительных сведений.

Орбиты кораблей серии «Восток» имели наклонение <sup>2</sup> около 65°, отличаясь лишь во втором знаке после запятой, и практически одинаковые высоты в апогее и перигее. Однако для первого пилотируемого полета (Ю. А. Гагарин) высота в апогее превышала расчетное значение в результате нештатной ситуации при выведении. Корабли «Восток-3» и «Восток-4» были выведены на орбиту столь точно, что космонавт Павел Попович визуально наблюдал корабль Андрияна Николаева на расстоянии 6,5 км. Но поскольку высоты и периоды обращения кораблей отличались, «Восток-3» и «Восток-4» в ходе совместного полета удалялись друг от друга. В следующем парном полете кораблей «Восток-5» и «Восток-6» космонавтам Валерию Быковскому и Валентине Терешковой не удалось визуально наблюдать друг друга. Высота орбиты «Востока-5» оказалась ниже расчетной, а через четыре дня после старта из-за усилившейся солнечной активности его орбита начала резко снижаться <sup>3</sup>.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 11-07-00781-а.

<sup>1</sup> См.: *Аппазов Р. Ф.* Следы в сердце и в памяти. Симферополь, 2001. С. 159.

<sup>2</sup> Угол между плоскостью орбиты и плоскостью экватора.

<sup>3</sup> См.: *Мировая пилотируемая космонавтика. История. Техника. Люди* // Ред. Ю. М. Батурин. М., 2005. С. 20–25.

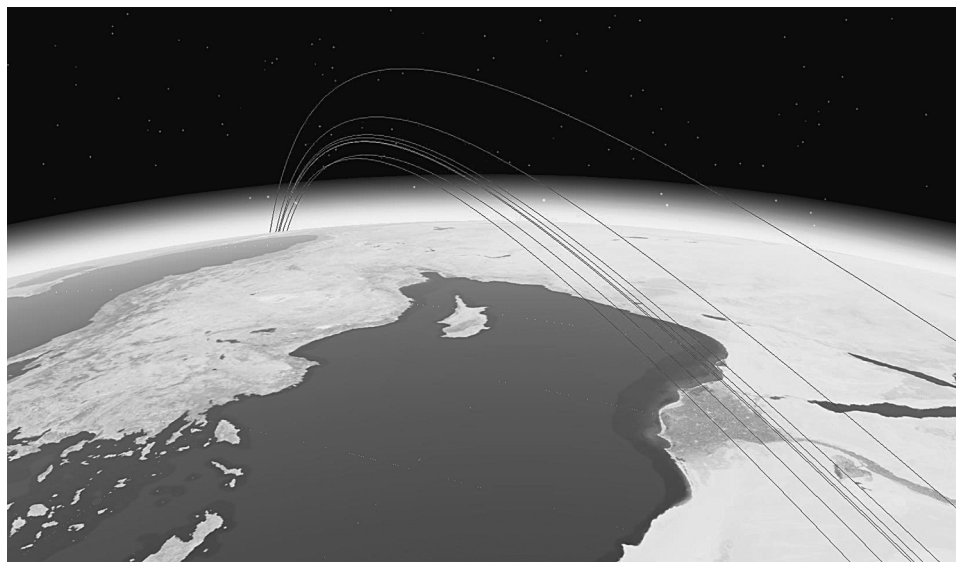
Для кораблей типа «Союз» была принята орбита с наклоном  $51,6^\circ$ , поскольку оно позволяет выводить на орбиту существенно большую полезную нагрузку, чем наклонение орбиты «Востоков». Но были и исключения: так, корабль «Союз-22» (Валерий Быковский и Владимир Аксенов) был запущен на орбиту с наклоном  $64,76^\circ$ , характерную для «Востоков», поскольку она проходила почти над всей территорией СССР (кроме самых северных районов), в том числе над Москвой и Ленинградом и была очень удобна для фотосъемок <sup>4</sup>.

Когда была поставлена задача стыковки двух космических аппаратов, необходимо было добиться того, чтобы второй корабль оказался в плоскости орбиты первого корабля (иначе говоря, орбиты двух кораблей должны быть компланарными). В противном случае потребуются значительные затраты топлива (для «Союза» – до 300 кг, чтобы изменить наклонение орбиты на  $1^\circ$ ) на совмещение плоскостей орбит. Когда плоскости орбит совмещены, максимально сближают их остальные параметры. При первой попытке стыковки космических кораблей – беспилотного «Союза-2» и пилотируемого Георгием Береговым «Союза-3» – совмещение плоскостей их орбитального движения было достигнуто, а точность выведения была достаточно высокой – всего 11 км друг от друга, но все же не такой, как у «Востока-3» и «Востока-4». Тем не менее, в результате ошибки космонавта стыковка не удалась.

Сложным было согласование баллистической схемы советско-американского экспериментального полета «Аполлон» – «Союз» (ЭПАС), поскольку стартовые комплексы находились на разных материках, отличались и характеристики ракет-носителей и самих кораблей. Американский космодром находился на мысе Канаверал на восточном, атлантическом побережье полуострова Флорида (США), и при запуске ракеты-носителя проблем с районами падения за исключением первых нескольких секунд нет. При запуске с Байконура накладываются серьезные ограничения, поскольку полет ракеты-носителя проходит над населенными районами. Поэтому наклонение орбит космических объектов, запускаемых с Байконура, т. е. направление их запуска, строго фиксировано. Для ЭПАС было выбрано значение  $51,8^\circ$ . Корабль был выведен на орбиту  $228 \times 192$  км (по расчетам должно было быть  $228 \times 188$ ). «Аполлон» выводился на орбиту  $167 \times 150$  км с тем же наклоном. Для формирования монтажной орбиты была выбрана круговая орбита высотой 225 км («круговая» орбита допускала изменение в пределах двух километров из-за влияния гравитационного поля сплюснутой Земли и до 11 км из-за отличия поверхности Земли от правильной сферы). Интересно, что понимание круговой орбиты у советских и американских специалистов отличались. Договорились, что минимальная высота такой орбиты – 225 км над экватором, а максимальная – 236 км (через четверть витка после пролета над экватором) <sup>5</sup>. Максимальное отклонение сформированной «Союзом» монтажной орбиты от согласованной с американскими баллистиками соста-

<sup>4</sup> Там же. С. 258.

<sup>5</sup> См.: Сытин О. Г. Баллистика ЭПАС // «Союз» и «Аполлон». Рассказывают советские ученые, инженеры и космонавты – участники совместных работ с американскими специалистами / Ред. К. Д. Бушуев. М., 1976. С. 77–99.



*«Трубка» орбит полетов космических кораблей серии «Союз»*

вило 250 м при допустимой величине 1500 м, а отклонение времени прихода «Союза-19» в заданную точку от расчетного момента – 7,5 сек при допустимом отклонении 90 сек.

Исторически значимым является предложение России совместить плоскости орбит «Мира» и МКС, тогда можно было бы с помощью межорбитальных перелетов перевезти часть научной аппаратуры с одной станции на другую. Для этого необходимо было всего лишь задержать запуск первого модуля МКС «Заря» на 6 час. Однако американцы на это не пошли <sup>6</sup>.

Таким образом, многие технические и политические решения в истории космических полетов, различия подходов советских и американских специалистов, нештатные ситуации выразились в том числе и в особенностях траекторий КА. Визуализация этих траекторий, их наглядный анализ позволяет историку техники лучше понять взаимосвязи различных процессов в истории освоения космоса, поставить новые задачи для исторического исследования.

## Описание проекта

При моделировании траекторий движения пилотируемых КА необходимо представить положение и траекторию движения КА в пространстве, реальную форму Земли, модель гравитационного поля Земли, возможное вспухание атмосферы, реакцию на работу двигателей, номинальные отклонения от расчетного хода полета, полет при появлении нештатных ситуаций. Без хорошо развитого пространственно-образного мышления возникает вероятность

<sup>6</sup> См.: Мировая пилотируемая космонавтика... С. 546.

ошибочного понимания закономерностей формирования орбиты. Поэтому важную роль в ретроспективном анализе данных траекторного движения играет визуализация орбит КА и самих КА.

Наибольшего эффекта здесь можно добиться с помощью технологии виртуальной реальности, которая дает возможность визуализировать процессы, которые невозможно наблюдать в обычной обстановке. Основным компонентом данной технологии является система виртуальной реальности – интерактивная (вынуждающая пользователя к взаимодействию) интеллектуальная система, взаимодействующая с человеком на уровне его органов восприятия и позволяющая пользователю получать информацию об объекте в симулированной компьютером среде по своему усмотрению. В настоящее время существует целый ряд «виртуальных планетариев», программных продуктов для визуализации объектов в космическом пространстве и виртуальных космических полетов<sup>7</sup>. К их несомненным достоинствам относятся обширные каталоги космических объектов и свободный доступ через интернет. Однако существующие программные продукты не поддерживает стереоскопическую визуализацию, что делает невозможным их использование для систем виртуальной реальности. Поэтому для исторически точной виртуальной реконструкции реальных космических полетов в стереорежиме в ИИЕТ РАН было принято решение о разработке собственного программного инструментария.

При разработке приложения решались следующие задачи: моделирование Земли, моделирование орбит, моделирование КА, стереоскопическая визуализация созданных 3D-моделей в виртуальном пространстве, создание пользовательского интерфейса.

*Моделирование Земли.* Для создания виртуального глобуса<sup>8</sup> использовалась программная среда *osgEarth*. Рельеф и текстура глобуса состоит из тайлов («кусочков» изображений), выстроенных вдоль меридианов и параллелей. При приближении к тайлу, он заменяется на четыре тайла большей детализации. Таким образом, все тайлы образуют так называемое «квадродерево».

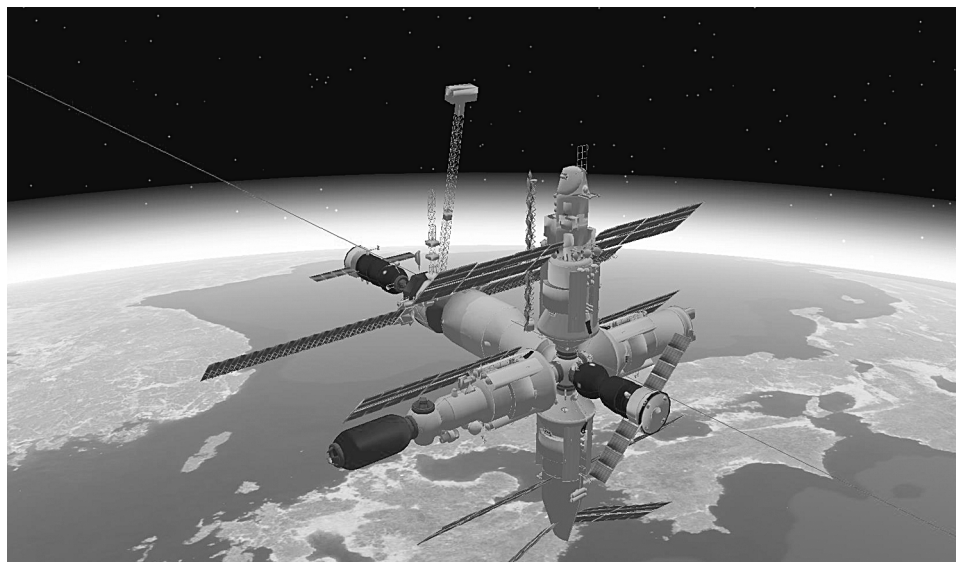
При построении глобуса использовались изображения *NASA Blue Marble Next Generation* с разрешением 500 м/пиксель и карта высот *NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. Для отдельных районов было поддержано более высокое разрешение спутникового покрытия (например, для Байконура – 0,5 м/пиксель). Для визуализации атмосферы использовалась модель О’Нила<sup>9</sup>, работающая в реальном времени для любых положений наблюдателя (как на поверхности Земли, так на произвольном удалении от нее).

---

<sup>7</sup> Пуртов И. С. Виртуальная реконструкция исторических космических полетов: обзор космических симуляторов // Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, 2013 (в печати).

<sup>8</sup> Бобков А. Е. Историческая реконструкция и научно-техническая визуализация на основе виртуального глобуса // Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН, 2012. М., 2012. Т. 2. С. 845–848.

<sup>9</sup> O’Neal, S. Accurate atmospheric scattering // GPU Gems. 2005. Vol. 2. P. 253–268.



3D-модель орбитального комплекса «Мир»

*Моделирование орбит.* Околоземную эллиптическую орбиту характеризует ряд параметров <sup>10</sup>:

- высота в апогее  $H$  (максимальное расстояние до поверхности Земли);
- высота в перигее  $h$  (минимальное расстояние до поверхности Земли);
- наклонение  $i$  (угол между плоскостью орбиты и плоскостью земного экватора);
- долгота восходящего узла  $\Omega$ , задающая, «в какую сторону» (вокруг какой линии в плоскости экватора) наклонена орбита;
- аргумент перигея  $\omega$ , указывающий, как повернута эллиптическая орбита в своей собственной плоскости.

Перечисленные параметры являются исходными для визуализации орбит в виртуальном пространстве <sup>11</sup>. На их основе вычисляются:

Расстояние между фокусами эллиптической орбиты  $c_T$ :

$$c_T = \frac{H - h}{2};$$

большая полуось  $a_T$ :

$$a_T = a_z + \frac{H + h}{2};$$

<sup>10</sup> Шуров А. И. Исторические переходы в траекториях космических аппаратов // Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН, 2012. М., 2012. Т. 2. С. 863–866.

<sup>11</sup> Шуров А. И., Щербинин Д. Ю. Моделирование траекторий движения пилотируемых космических аппаратов в виртуальном пространстве // Идеи К. Э. Циолковского: прошлое, настоящее, будущее: материалы XLVII Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2012. С. 186–187.

малая полуось  $b_t$ :

$$b_t = \sqrt{a_z^2 + a_z(H+h) + Hh},$$

где  $a_z$  – большая полуось эллипса Земли.

*Моделирование КА.* Для задач приложения созданы 3D-модели КА «Восход», «Союз», орбитального комплекса «Мир». Моделирование выполнено по данным Российского государственного архива научно-технической документации (РГАНТД).

Модели КА обеспечивают фотореалистичную визуализацию с высокой степенью детализации и оптимизированы для отображения в интерактивном стереорежиме.

*Программный инструментарий* написан полностью на программном обеспечении с открытым исходным кодом *OpenSceneGraph* и *osgEarth*. Его основные возможности:

- визуализация виртуального глобуса с атмосферой, с возможностью субметровой детализации поверхности;
- визуализация кеплеровских орбит. Параметры орбит можно загружать из внешнего файла или задавать вручную; набор данных об исторических полетах предустановлен в приложение;
- наблюдение движения КА по орбите вокруг Земли. Камера привязана к 3D-модели и движется вместе с ней. Реализовано освещение 3D-моделей солнечным светом с учетом тени от Земли;
- управление ходом течения времени, просмотр списка всех орбит с названиями космических аппаратов, редактирование параметров, добавление и удаление орбит через пользовательский интерфейс;
- управление камерой либо с использованием только клавиатуры и мыши (для массового пользования), либо с использованием дополнительно джойстика *3DConnexion* с шестью степенями свободы (для систем виртуальной реальности).

При разработке приложения был решен ряд технических сложностей, связанных с большим разбросом масштабов:

- проблема точности хранения координат (при использовании типа данных *float* абсолютная точность координат объектов у поверхности Земли – при центре координат в центре Земли – составляет около 1 м, что приводит к эффекту дрожания (*jittering*) при движении камеры; поддержка типа *double* на видеокартах ограничена). Решена за счет выполнения матричных операций на центральном процессоре с типом *double* и конвертации элементов матрицы в тип *float* при передаче на графический процессор;
- проблема разрешения буфера глубины (эффект *z-fighting* – мерцание удаленных полигонов из-за невозможности корректного сравнения их глубин). Решена за счет использования логарифмического буфера глубины;
- проблема настройки стереоскопического эффекта на разных масштабах (необходимость добиться эффекта объема в зависимости от масштаба объекта, находящегося перед камерой: например, модели КА на орбите или виртуального глобуса). Решена за счет динамической подстройки стереоэффекта

в зависимости от расстояния до поверхности Земли, а также специального режима для просмотра моделей КА;

– проблема тесселяции траектории орбиты (из-за моделирования реальной орбиты ломаной линией в виртуальной сцене изломы этой линии становятся заметны вблизи). Решена за счет динамического перестроения 3D-модели орбиты во время полета при рендеринге каждого кадра, а также за счет перехода к локальной системе координат КА при вычислениях для устранения эффекта дрожания.

## **Заключение**

В результате проекта разработано интерактивное 3D-приложение на основе виртуального глобуса с поддержкой стереовизуализации кеплеровых орбит КА, «трубок» орбит серий КА, 3D-моделей КА, точек старта и приземления, траекторий вывода и спуска КА. Выполнена виртуальная реконструкция наиболее значительных отечественных пилотируемых космических полетов, включая полеты КА типа «Восток», «Восход», «Союз», орбитальных комплексов «Мир» и МКС.

В практическом плане новизна проекта заключается в стереоскопической виртуальной реконструкции истории космических полетов по хроникально-документальным данным. Разработанное интерактивное 3D-приложение обеспечивает эмоциональное вовлечение зрителя (пользователя) в процесс полета, создает эффекты погружения и сопричастности происходящему – как за счет высокой визуальной реалистичности 3D-моделей космических аппаратов, так и за счет документальной точности реконструкции. Созданное 3D-приложение демонстрируется на постоянно действующей выставке достижений РАН.

В методическом плане новизна заключается в развитии методологии применения технологии виртуального окружения для визуализации различных КА и сценариев космических полетов, их эффективного изучения и анализа. Программный инструментарий позволяет наглядно анализировать исторические переходы в траекториях пилотируемых КА, планировать и сравнивать сценарии развития космических программ. Использование инструмента 3D-моделирования позволяет создавать реалистичные картины в широком диапазоне как линейных, так и временных масштабов.

Важным отличием разработанного 3D-приложения от аналогов является использование архивных и документальных материалов, доступных ИИИТ РАН, привлечение дополнительной информации, консультации летчиков-космонавтов СССР и Российской Федерации, что обеспечивает возможность детальной реконструкции исторических полетов с показом действительных сложностей полета и нестандартных ситуаций. Приложение призвано играть роль справочника нового поколения, в котором не только обозначены исторические орбиты, но и отображается связанная с ними информация об истории космонавтики.