

Использование графической библиотеки Cesium для создания web-ориентированных геоинформационных систем на примере ГИС околоземного космического пространства

П.Ю. Орлов¹, И.Г. Журкин²

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК),
Москва, 105064, Россия

¹ ORCID: 0000-0002-5323-4754, knightrider3eo@gmail.com

² ORCID: 0000-0002-2277-1557, zhurkin@miigaik.ru

Аннотация

В связи с запуском большого количества малых спутников, в том числе формата CubeSat, наблюдается довольно существенный рост загруженности околоземного пространства космическими объектами антропогенного происхождения. При этом компьютерное и геоинформационное моделирование лишь эпизодически применяется некоторыми организациями, как в России, так и в западных странах как метод анализа и исследования в данной научной проблеме. Тем не менее, очевидны перспективы повышения эффективности контроля засорённости околоземного космического пространства и поддержки принятия решений на основе использования геоинформационных технологий. Современные инструментальные средства позволяют разработать полнофункциональную геоинформационную систему, которая будет превосходить возможности настольных программных решений, созданных ранее. В работе авторами представлен анализ программной библиотеки Cesium и её встроенного языка CZML для описания динамических пространственных сцен. Проведены экспериментальные исследования по созданию прототипа геоинформационной системы околоземного космического пространства, предназначенной для моделирования, визуализации и аналитического мониторинга его состояния. Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (№5.6680.2017/8.9).

Ключевые слова: околоземное космическое пространство, космический мусор, космический объект, web-ГИС, Cesium, CZML, визуализация, динамические пространственные сцены, двухстрочный набор элементов (TLE), SGP4.

1. Введение

Развитие ГИС в последние десятилетия заключалось в совершенствовании программной и аппаратной их части, что позволило снизить себестоимость и увеличить производительность. Увеличение вычислительных мощностей персональных компьютеров сделало доступными настольные геоинформационные продукты для новой категории пользователей, которые ранее никогда не имели дело с геодезией, картографией и пространственными данными. По-

явление глобальной сети Интернет и клиент-серверной архитектуры сделало возможным работу с геоданными из любой точки земного шара. А развитие компьютерной графики, в свою очередь, позволило отображать картографическую основу не только в двумерном, но и в трёхмерном виде, что повысило наглядность данных и упростило процесс принятия управленческих решений. Тем не менее, нужно отметить тот факт, что называть современные 3D ГИС трёхмерными не совсем корректно, поскольку отображаемый в них объект,

будь то модель города, космического аппарата (КА), или всей Земли, и их главная характеристика – объём, проецируются на плоскость (в том числе экрана), без использования методов и средств стереоскопии, таких как анаглиф-очки. Поэтому в большинстве случаев правильное будет называть подобное отображение данных псевдотрёхмерным.

Основываясь на работе [5], можно предположить, что в ближайшем десятилетии наступит шестой технологический уклад, ядром которого, в частности, станут глобальные информационные сети, мультимедиа, виртуальная реальность. Такие технологии и достижения, как трёхмерное, анимационное и мультимедийное воспроизведение пространства, геоинформационные трёхмерные динамические сцены [4], геоинформационное моделирование и развитие оперативных средств сбора данных о местности станут технологической основой для дальнейшего развития геоинформатики и наук о Земле.

За последние полтора десятка лет геоинформационные системы смогли шагнуть за пределы компьютера пользователя. Теперь ГИС могут быть развернуты в локальной или глобальной сети, а для работы с ними требуется лишь web-браузер актуальной версии. С их помощью можно решать все те же задачи навигации и построения оптимального маршрута, пространственного анализа и редактирования данных об объекте интереса, и целый ряд других тематических задач. В настоящей работе речь пойдет об экспериментах по созданию ГИС околоземного космического пространства (ОКП). Под ГИС ОКП следует понимать геоинформационную систему, предметной областью которой является Земля, рассматриваемая как единое целое, и пространство от верхней границы атмосферы до орбиты Луны. В ближайшее окружение входят космические объекты естественного и искусственного происхождения, включая космический мусор (КМ), которые могут находиться в околоземном пространстве в течение длительного времени, либо

появляться в нём с некоторой периодичностью. Отсюда следует, что функциональным назначением геоинформационной системы околоземного космического пространства является обработка и визуализация динамических пространственных данных космических объектов (КО), а также их атрибутивных данных, которые менее подвержены изменениям с течением времени.

2. Cesium – инструментальное средство разработки ГИС

Проведённый анализ возможностей интерфейса программирования приложений Google Earth API и графической библиотеки Cesium [2, 6] показал, что библиотека Cesium имеет большую производительность и стабильность по сравнению с Google Earth API. Cesium – это JavaScript библиотека с открытым исходным кодом под лицензией Apache 2.0 для создания виртуальных глобусов и карт в web-браузере без использования плагинов, использующая технологию WebGL для аппаратного ускорения работы с графикой и возможностей визуализации динамических данных. Наличие документации разработчика, широкое применение в научных и коммерческих продуктах, а также ориентация на создание web-приложений – всё это способствовало выбору в пользу данной библиотеки как основы разрабатываемой системы. Для работы с библиотекой и раскрытия всех её возможностей, включая добавление модулей и пользовательских материалов, необходимо применить навыки программирования. Однако её можно рассматривать и как приложение для визуализации, поскольку она имеет базовый набор данных для пользователей.

К стандартным функциональным возможностям библиотеки Cesium относятся:

1. Три режима просмотра: 3D, 2D и 2.5D (имитация трёхмерной сцены за счёт ориентации камеры не в надиры плоскости).

2. Создание потоковых динамических сцен с заданными временными рамками с помощью языка CZML.

3. Визуализация рельефа Земли с высоким разрешением и добавление пользовательских данных о физических особенностях местности.

4. Растровая подложка из множества источников, таких как: WMS, TMS, WMTS, OpenStreetMap, Bing Maps, ArcGIS MapServer, Google Earth Enterprise, обычные растровые изображения и пользовательские тайловые схемы.

5. Альфа-смешивание слоёв, динамическое изменение яркости, контраста, гаммы, тона и насыщенности.

6. Визуализация данных файлов в форматах GeoJSON и TeroJSON, текстурированных и анимированных трёхмерных моделей в форматах COLLADA и glTF, отрисовка и настройка стилей отображения широкого спектра геометрических фигур: полилинии, плакаты, ярлыки.

7. Отрисовка и добавление объектов к рельефу, работа со следующими графическими примитивами (включая операцию выдавливания): полигоны, полигоны с отверстиями, прямоугольники, окружности и эллипсы, боксы, сферы, эллипсоиды и цилиндры, коридоры и стены.

8. Отрисовка атмосферы, тумана, Солнца, солнечного света, Луны, звёзд и воды.

9. Вращение, приближение и отдаление, полёт, режим свободной камеры и определение столкновения виртуальной камеры с рельефом.

10. Точное управление камерой при отдалении от наблюдаемого объекта на большие дистанции (исключение z-конфликта) и при больших значениях координат сцены (предотвращение дрожания).

11. Работа с системами координат и отсчёта, такими как: Всемирная геодезическая система координат (WGS84), Международная небесная система отсчёта (ICRF) и навигационная система координат (east-north-up или ENU).

12. Использование равнопромежуточной проекции и проекции Меркатора (в режиме 2D).

13. Высокоточные расчёты и математическая обработка для разных систем координат и отсчёта: переход от географических (широта, долгота, высота) к прямоугольным координатам; быстрая обработка прямоугольных, сферических, картографических координат, матриц и кватернионов; работа с юлианской датой, секундами координации, а также стандартами времени, такими как: Всемирное координированное время и Международное атомное время.

14. Дополнительные модули для расширения функциональности, такие как: отображение горизонталей; привычные элементы навигации; дополнительные графические примитивы для описания целевой аппаратуры космических аппаратов; интеграция библиотеки с web-браузерами, поддерживающими технологию виртуальной реальности; инструменты для добавления и редактирования графических примитивов и др.

К текущим недостаткам можно отнести отсутствие слоя для трёхмерных моделей зданий и низкую актуальность обучающих материалов из-за регулярных обновлений, несмотря на то, что на первый взгляд их объём и кажется исчерпывающим. И хотя написание программного кода на языках JavaScript и CZML требуют наличия самой библиотеки, что выглядит сложнее, чем использование готового виртуального глобуса, например Google Earth, это позволяет создавать гибкую систему непосредственно под заданные требования. В настоящее время библиотека Cesium применяется в различных научных сферах, таких как визуализация геофизических полей [1], исследования археологических памятников Западной Европы эпохи бронзового и железного веков [14] и др.



Рис. 1. Архитектура Cesium.

На текущий момент, архитектуру библиотеки Cesium можно представить в виде 5 слоёв (рис. 1). *Ядро* – это самый нижний слой, содержащий в себе низкоуровневый математический аппарат для обработки матриц, векторов и кватернионов, функции преобразования из одной системы координат в другую, картографические проекции, сплайны для интерполяции положения и ориентации объекта, а также алгоритмы триангуляции, последовательного деления поверхностей, оптимизации кэша вершин, вычисления контурных точек эллипсов и др. В уровень *рендеринга*, представляющего собой абстракцию над библиотекой WebGL, входят встроенные функции языка высокого уровня GLSL для программирования шейдеров, кубические текстуры, буферы и массивы вершин, а также кадровые буферы. На уровне *сцены* происходит организация и отправка команд от вышестоящих уровней нижестоящему уровню рендеринга

для непосредственного выполнения. Сцена служит для представления на экране всех имеющихся в библиотеке графических объектов и их состояний, включая:

- сам виртуальный глобус и карту;
- растровые подложки, передаваемые в потоковом режиме из нескольких источников;
- примитивы: полигоны, полилинии, окружности и др.;
- камеры, которые контролируют просмотр сцены и связаны с устройствами ввода;
- анимацию, которая отвечает за изменение свойств объектов в заданном временном интервале.

Уровень данных инкапсулирует типы данных, входящих в уровень сцены, а также содержит в себе загрузчики сценариев CZML и прочих данных, храня-

щихся в форматах KML и GeoJSON. В свою очередь уровень элементов интерфейса содержит главное средство просмотра библиотеки Cesium и все элементы интерфейса (виджеты) для работы с web-ГИС.

Охарактеризуем язык сценариев библиотеки Cesium, поскольку именно с его помощью можно описать движение космических аппаратов в рамках эксперимента по созданию ГИС околоземного космического пространства [3, 7]. Cesium Language или CZML – это встроенный программный язык библиотеки Cesium, основанный на JSON, и предназначенный для описания динамических пространственных сцен с заданными временными рамками, и, в первую очередь, их отображения в web-браузере, поддерживающем технологии, связанные с Cesium. С его помощью можно описывать графические примитивы, такие как: линии, точки, а также полноценные 3D-модели и определять их изменение с течением времени.

Во многом, взаимосвязь между библиотекой Cesium и языком CZML схожа с функциональной зависимостью интерфейса программирования приложений Google Earth и языком разметки KML [6]. Оба этих языка предназначены для описания содержимого сцены в одноимённом формате данных, структура файла которого может быть создана как автоматически, так и вручную. И оба этих формата являются достаточно независимыми от клиента, т.к. их содержимое может быть визуализировано и в не родных клиентах, совместимых с ними. CZML позволяет описывать свойства объекта, меняющие своё значение с течением времени. Также существует возможность интерполировать свойства объекта, имеющие временную зависимость. К примеру, если местоположение объекта задано в два момента времени, то с помощью алгоритма интерполяции, встроенного в CZML, можно достаточно точно рассчитать и отобразить изменение местоположения объекта между двумя временными отсчётами. В Cesium доступна интерполяция с помощью многочлена Лагранжа, Эрмита, а также

линейная интерполяция. При этом пользователь задаёт степень интерполяционного полинома и порядок входных данных (для многочлена Эрмита): 0 – исходные данные, 1 – производная первого порядка и т.д.

Формат CZML представляет собой разновидность формата JSON, а это означает, что корректный CZML-документ является также корректным документом в формате JSON. В частности, документ CZML содержит один массив JSON, каждый элемент которого является CZML-пакетом. Пакет CZML описывает графические свойства отдельного объекта сцены, например, воздушно-го судна или космического аппарата.

3. Аналитическая модель SGP4

Безусловно, «Упрощенная Общая Модель Возмущений» №4 (Simplified General Perturbations Model №4 или SGP4) является одной из наиболее известных аналитических моделей для прогнозирования движения КО [15]. Первоначально она была разработана для нужд Командования воздушно-космической обороны Северной Америки (NORAD) – организации, также отвечающей за непрерывный мониторинг космических объектов в околоземном пространстве. Кроме того, к обязанностям организации относится регулярное определение элементов орбиты всех каталогизированных объектов (как спутников, так и космического мусора), которые, с некоторыми ограничениями, доступны гражданским пользователям. В частности, радиооператоры и радиолюбители активно используют данные, предоставляемые командованием, для выполнения текущих прогнозов видимости интересующих их спутников. Орбитальные элементы NORAD публикуются в формате двухстрочного набора элементов, также известного как TLE (Two-Line Element set). Структура набора представлена на рис. 2. В него входят как классические элементы орбиты Кеплера, так и специфичные для модели SGP4. Вместо истинной аномалии в

наборе TLE используется средняя аномалия, т.к. её значение для момента времени в будущем проще получить. Кеплеровы элементы, присутствующие в двухстрочном наборе, вычисляются путём усреднения в рамках аналитиче-

ской модели прогнозирования (в данном случае SGP4), не являются орбитальными параметрами оскулирующей орбиты и не могут быть использованы для прогноза движения космических объектов в рамках другой модели [10].

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|--------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-------------|-------|--|-------|--|-------|
| | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 25444U | 98067A | 17037.96894006 | .00004795 | 00000-0 | 79100-4 | 0 | 9996 | | | | |
| 2 | 25544 | 051.6450 | 327.4639 | 0007469 | 161.7930 | 288.3402 | 15.54312699 | 41502 | | | | |
| 123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789 | | | | | | | | | | | | |

Рис. 2. Структура двухстрочного набора элементов (TLE)

При использовании двухстрочного набора TLE нужно иметь в виду, что содержащиеся в нём параметры представляют собой усреднённые орбитальные элементы. В отличие от оскулирующих элементов орбиты, которые отражают фактическое положение и скорость космического объекта в заданный момент времени, усреднённые элементы не зависят от характерных периодических возмущений. Таким образом, они описывают более однородное и сглаженное движение КО. С другой стороны, средние элементы орбиты не желательно применять для описания кеплеровой орбиты, а следует использовать только в рамках аналитической модели орбиты, которая была использована для их создания [13].

Модель SGP4 была создана в 1970 году и основана на аналитической орбитальной модели Лэйна и Крэнфорда [11]. Эта модель сочетает в себе моделирование гравитационных возмущений, описанных в работе Брауэра [9] с аналитической моделью для описания лобового сопротивления космического объекта.

В итоговой версии модели, описанной в работе [12], был упрощён расчёт некоторых параметров, хотя сама модель и сохранила свою исходную форму. Вековые и периодические возмущения учитываются посредством коэффициентов гравитационного поля J_2 , J_3 и J_4 – зо-

нальных гармоник. Отметим, что чётные зональные гармоники оказывают вековые возмущения на аргумент перигелия, долготу восходящего узла и среднюю аномалию. В свою очередь, нечётные коэффициенты гравитационного поля не влияют лишь на большую полуось. Строго говоря, моделирование периодических возмущений применяется только к почти круговым орбитам. В дополнение к модели SGP4 командование NORAD использует расширенную форму модели SGP4, которая называется SDP4 и применяется для высокоорбитальных спутников. Дело в том, что Командование воздушно-космической обороны Северной Америки распределяет все космические объекты по двум категориям: околоземные объекты (с периодом обращения менее 225 минут) и объекты дальнего космоса (с периодом обращения большим или равным 225 минутам), для прогнозирования движения которых и применяется данная модель. SDP4 учитывает дополнительные возмущения, вызванные притяжением Солнца и Луны, а также резонансные эффекты, которые значимы для орбит с периодами между 12 ч (GPS/ГЛОНАСС) и 24 ч (геостационарные спутники). Изменение точности аналитической модели SGP4 и двухстрочного набора орбитальных параметров для низкоорбитального спутника (высота 400 км), представлена на рис. 3.

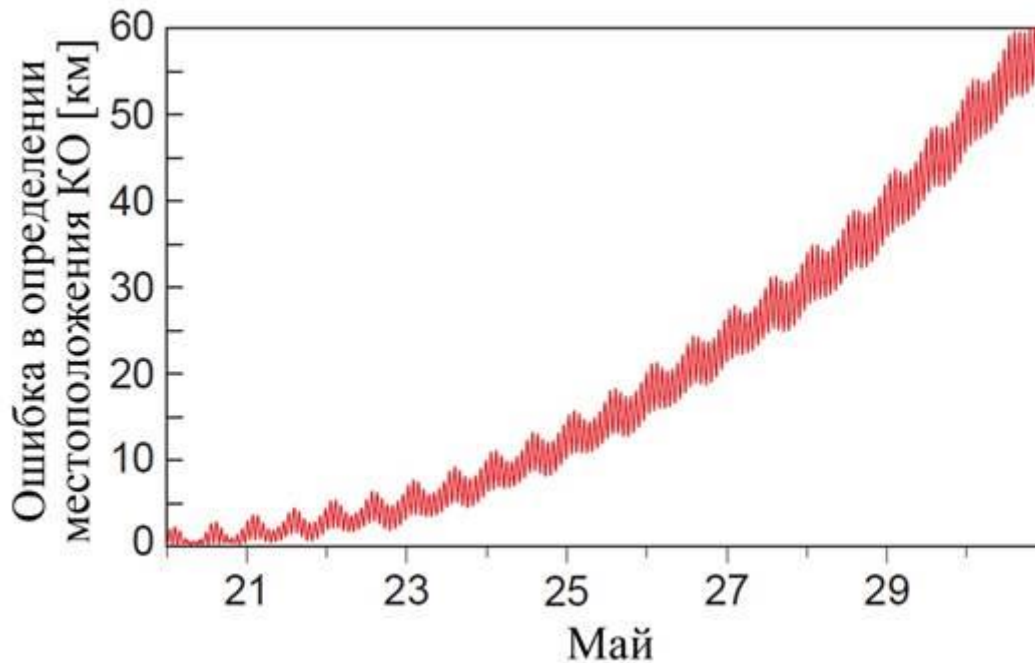


Рис. 3. Дegrадация точности предсказания местоположения спутника ШАМР с помощью двухстрочного набора элементов за 20 мая 2001 года

В непосредственной близости от начальной эпохи (в пределах суток), представленной в двухстрочном наборе, орбита космического объекта рассчитывается с точностью до 1-2 км. Это значение ошибки отражает величину ряда короткопериодических возмущений, которые не учитываются в модели SGP4. Отсюда вытекают естественные ограничения для орбитальных расчётов, производимых с помощью этой модели. Также можно заметить квадратичное увеличение ошибки с течением времени. Это особенно влияет на направление полёта и может быть связано с неправильным расчётом коэффициента торможения. Следовательно, основной недостаток модели – это не столько временные пределы, сколько плохая оценка плотности атмосферы. В приведённом на рис. 3 примере, при прогнозе по имеющемуся набору TLE дисперсия достигает 20 км, что соответствует разнице во времени полёта около 3 сек. Для более высоких орбит спутников (от 800 до 1300 км) ошибки, как правило, значительно меньше. В этом случае, двухстрочные наборы орбитальных параметров можно эффективно использо-

вать для предсказания положения космических объектов на несколько недель вперёд. Тем не менее, наборы TLE являются единственными доступными орбитальными параметрами для прогнозирования движения космических объектов, могут быть использованы лишь в рамках модели SGP4, относительно точны, и оптимальны для быстрого расчёта эфемерид спутников и наведения приёмных антенн для получения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

4. Прогнозирование и визуализация движения КО

Прогнозы, выполненные после компиляции открытого исходного кода модели SGP4, доступного в сети Интернет, на различных языках программирования, не соответствовали заявленной точности. Поэтому по распоряжению руководства организации, в которой выполнялась данная работа, в среде Delphi 7 на одноимённом языке автором была создана программа TLEPropagator, с помощью которой можно прогнозиро-

вать положение КО используя двухстрочные наборы орбитальных параметров. В качестве основы программного решения была взята библиотека PlanEph ([https:// sourceforge . net/ projects/planeph/](https://sourceforge.net/projects/planeph/)), содержащая в себе совмещённую модель SGP4/SDP4 на основе работы [15].

В качестве входных данных выступают:

- орбитальные параметры в формате TLE (хранятся в текстовом документе в формате .txt или .tle);
- расчётное время (берётся из начальной эпохи набора по умолчанию, но может быть изменено пользователем);
- система координат (WGS72, WGS72 с поправками и WGS84);

- количество вычисляемых положений космического объекта;
- интервал (в секундах) между рассчитываемыми положениями.

Полученные результаты сохраняются в текстовый документ формата .txt для последующего использования. TLEPropagator позволяет извлекать содержимое TLE и рассчитывать вектор состояния (положения и скорости) космического объекта, находящегося в околоземном пространстве, на заданный момент времени, либо на временной интервал с заданным шагом (рис. 4). В ближайшее время программа будет модернизирована для автоматического создания файла динамической сцены CZML, содержащего вектор состояния исследуемого КО.

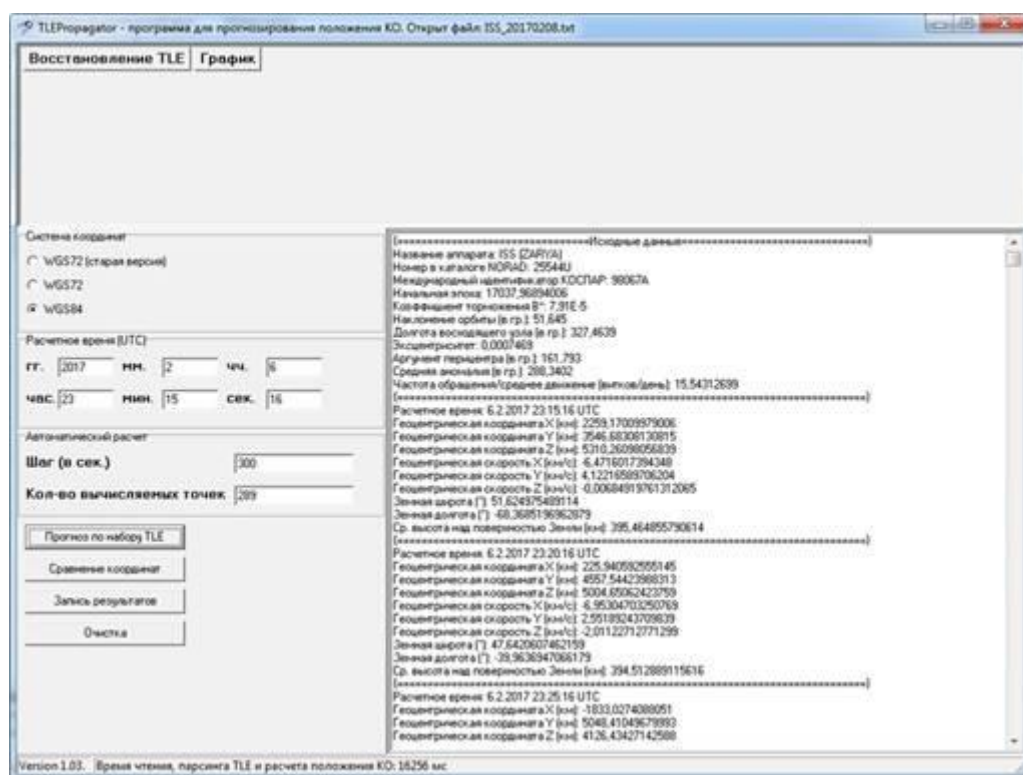


Рис. 4. Прогноз положения МКС, выполненный с помощью программы TLEPropagator

Были взяты три двухстрочных набора усреднённых элементов орбиты: Международной космической станции (МКС), КА ДЗЗ Канопус-В и КА ДЗЗ Landsat-8. Актуальные и архивные наборы TLE всегда доступны на сайте

доктора Томаса Шона Келсо (<http://www.celestrak.com/>).

После вычисления положения КА необходимо создать документ сценария CZML. Для этого полученные координаты вручную извлекаются из текстового

отчёта, генерируемого TLEPropagator. Затем необходимо создать пакет, описывающий сам документ и его содержимое:

```
{
  "id": "document",
  "name": "simple",
  "version": "1.0",
  "clock": {
    "interval": "2017-02-
06T23:15:16Z/2017-02-
07T00:55:16Z",
    "currentTime": "2017-02-
06T23:15:16Z",
    "multiplier": 1,
    "range": "LOOP_STOP",
    "step": "SYSTEM_CLOCK_MU
LTIPLIER"
  }
},
```

Интервал сценария начинается 6 февраля 2017 года в 23 часа 15 минут и 16 секунд (UTC) и заканчивается 7 февраля 2017 года в 00 часов 55 минут и 16 секунд (UTC), таким образом, его продолжительность составляет 100 минут. За это время каждый отобранный космический объект сделает один полный виток вокруг Земли. Шаг анимации по умолчанию составляет 1 секунду. По достижении конца сценария, он начинается сначала.

Далее необходимо добавить пакет для Канопус-В, содержащий его уникальный идентификатор, временные рамки его доступности, описание, иконку и параметры её отображения:

```
"id": "Satellite/KanopusV",
  "name": "Канопус-В",
  "availability": "2017-02-
06T23:15:16Z/2017-02-
07T00:55:16Z",
  "description": "<!--HTML--
> \r\n <p>Канопус-В – россий-
ский спутник дистанционного
зондирования Земли. </p>",
  "billboard": {
    "eyeOffset": {
      "cartesian": [
        0, 0, 0
      ]
    },
    "horizontalOrigin": "CENTER",
```

```
"image": "KanopusV.png",
  "scale": 0.6,
  "pixelOffset": {
    "cartesian2": [
      0, 0
    ]
  },
  "scale": 0.6,
  "show": true,
  "verticalOrigin": "CENTER"
},
```

После этого нужно добавить блок со свойствами для описания ярлыка, содержащего название КА и параметры отображаемого текста:

```
"label": {
  "fillColor": {
    "rgba": [
      255, 0, 0, 255
    ]
  },
  "font": "13pt Lucida
Console",
  "horizontalOrigin": "LEFT",
  "outlineColor": {
    "rgba": [
      0, 0, 0, 255
    ]
  },
  "outlineWidth": 2,
  "pixelOffset": {
    "cartesian2": [
      12, 0
    ]
  },
  "show": true,
  "style": "FILL_AND_OUTLI
NE",
  "text": "Канопус-В",
  "verticalOrigin": "CENTER"
},
```

В конце необходимо добавить блок со свойствами отображаемой орбиты КА, его координаты в рамках прямоугольной геоцентрической системы и алгоритм их интерполяции:

```
"path": { "width": 1.5,
  "material": {
```

```

        "solidColor":{ "color":{ "rgba":[ 255,0,0,255 ] }
    },
    "show" : true },

    "position":{
        "interpolationAlgorithm":"LAGRANGE",
        "interpolationDegree":6,
        "referenceFrame":"INERTIAL",
        "epoch":"2017-02-06T23:15:16Z",
        "cartesian":[
            0.0,4592291.4531381,-
            4076220.4801571,-
            3125526.0923838,
            <...>
            6000.0,4882707.6484835,-
            4776664.6181270,-886950.4385688
        ]
    }
}

```

В качестве алгоритма интерполяции был выбран интерполяционный многочлен Лагранжа 6 степени. По аналогии составляются пакеты и блоки свойств для описания Landsat-8 и МКС.

Затем необходимо создать html-страницу, которая будет содержать сам виртуальный глобус и карту. Нужно отметить, что для обеспечения доступности удалённым клиентам, страница должна быть размещена на некотором web-сервере. Для выполнения эксперимента мы создали локальный web-сервер с помощью набора дистрибутивов и программной оболочки пакета Denwer (<http://www.denwer.ru/>). Необходимо задать параметры страницы и подключить библиотеки, необходимые для работы:

```

<...>
<script
src="../../../Build/Cesium/Cesium.
js"></script>
<style>
@import
url('../../../Build/Cesium/Widgets/
widgets.css);
html, body, #cesiumCon-
tainer {

```

```

width: 100%;
height: 100%; margin: 0; padding: 0; overflow: hidden;
}
</style>
</head>

```

После этого следует создать элемент div в качестве контейнера для глобуса, активировать его с помощью переменной viewer – идентификатора элемента div, и настроить параметры глобуса при его инициализации [8]:

```

<body>
<div
id="cesiumContainer"></div>
<script>
var viewer = new Cesium.Viewer('cesiumContainer',
{
    animation : true, //
управление анимацией
    baseLayerPicker : true,
// управление растровой подложкой
    fullscreenButton : true,
// управление полноэкранным режимом
    geocoder : true, //
управление геокодированием
    homeButton : true, //
управление возвратом к исходной точке
    sceneModePicker : true,
// управление режимом отображения
    timeline : true, //
отображение временной шкалы
    infoBox : true, // отображение информационных окон
});

```

Затем объявляются переменные сцены и камеры, функция для отображения виртуального глобуса в рамках Международной небесной системы координат (ICRF) и сопутствующие переменные, а также включается глобальное освещение в зависимости от положения Земли относительно Солнца:

```

var scene = viewer.scene;
var camera = viewer.scene.camera;
function icrf(scene,
time) {

```

```

        if (scene.mode !==
Cesium.SceneMode.SCENE3D)
    { // может не потребоваться
        return;
    }
    var icrfToFixed = Cesium.Transforms.computeIcrfToFixedMatrix(time);
    if (Cesium.defined(icrfToFixed)) {
        var offset = Cesium.Cartesian3.clone(camera.position);
        var transform = Cesium.Matrix4.fromRotationTranslation(icrfToFixed);
        camera.lookAtTransform(transform, offset);
    }
};

scene.preRender.addEventListener(icrf); // вкл. вращение Земли

var icrfSwitch = true; // флаг для icrf event listener

```

```

        scene.globe.enableLighting = true;
    После этого необходимо лишь объявить переменную источника данных, загрузить файл со сценарием, добавить его к виртуальному глобусу и приблизить камеру к отобразившемуся содержанию:
    var czmlSource = new Cesium.CzmlDataSource();
    czmlSource.load('scene.czml');
    viewer.dataSources.add(czmlSource);
    viewer.zoomTo(czmlSource);

```

На рис. 5 представлены МКС, Канопус-В и Landsat-8 в рамках виртуального глобуса экспериментальной web-ГИС ОКП. Для каждого объекта доступно описание и исходные орбитальные элементы TLE. На рис. 6 представлена web-карта в равнопромежуточной проекции. Отображённые орбиты искажены у полюсов.

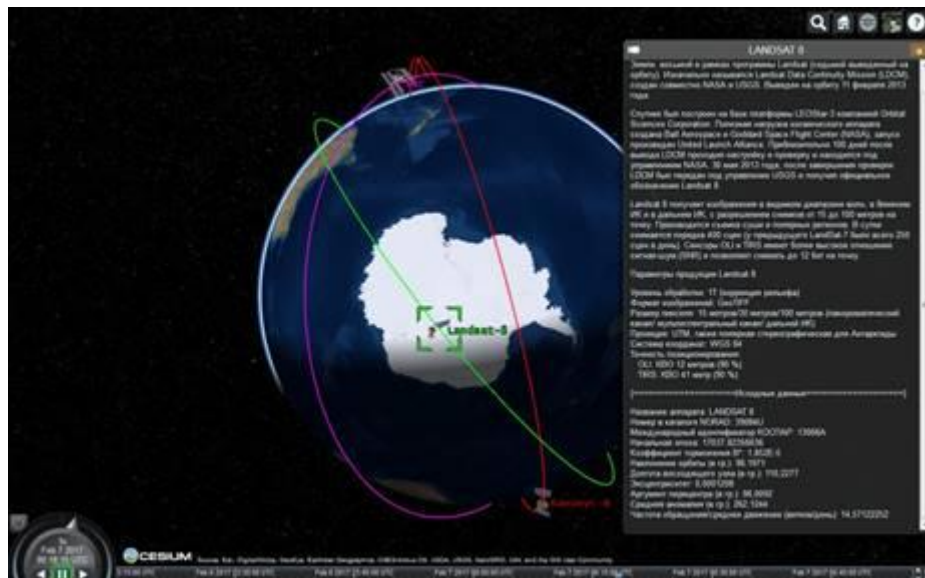


Рис. 5. Визуализация движения КА в рамках виртуального глобуса, созданного с помощью библиотеки Cesium

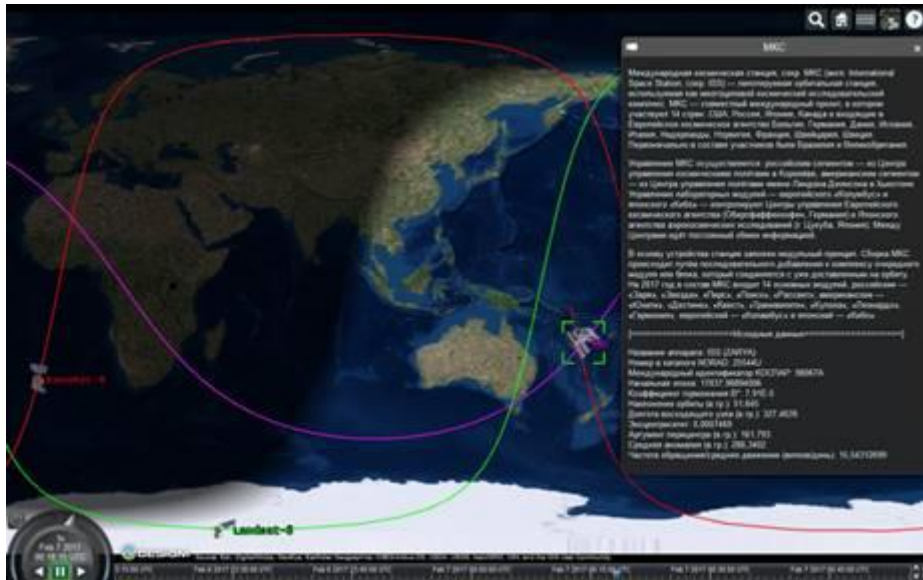


Рис. 6. Визуализация движения КА в рамках web-карты (равнопромежуточная проекция)

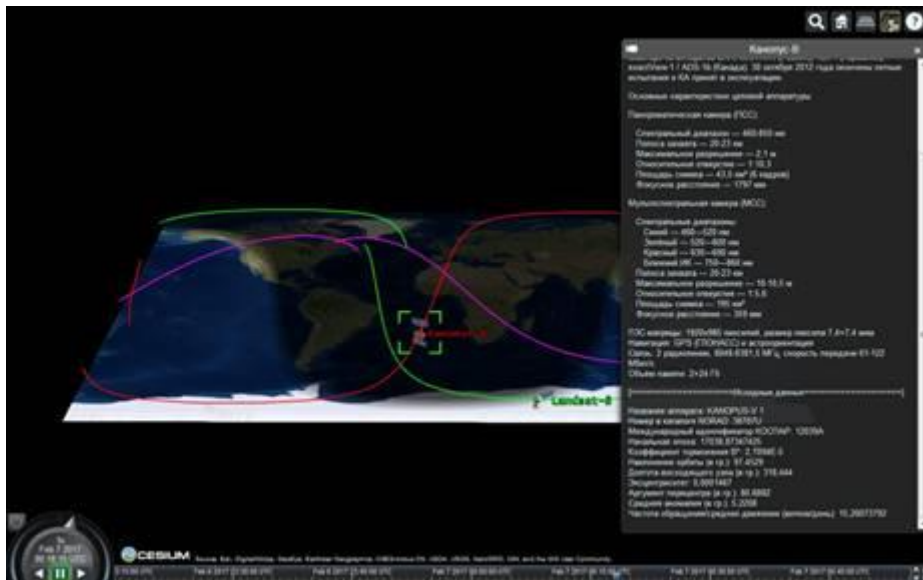


Рис. 7. Визуализация движения КА в рамках карты в режиме 2,5D

На рис. 7 представлена web-карта в режиме 2,5D. В отличие от обычного режима карты, с его помощью можно отобразить высоту орбит над поверхностью Земли.

Возможно использование и архивных данных, описывающих перемещение космических объектов в ОКП. Так на

рис. 8 представлены результаты эксперимента по визуализации сценария столкновения КА Космос-2251 и Iridium-33, произошедшего 10 февраля 2009 г. над полуостровом Таймыр, над точкой $72,5^{\circ}$ с. ш., $97,9^{\circ}$ в. д.

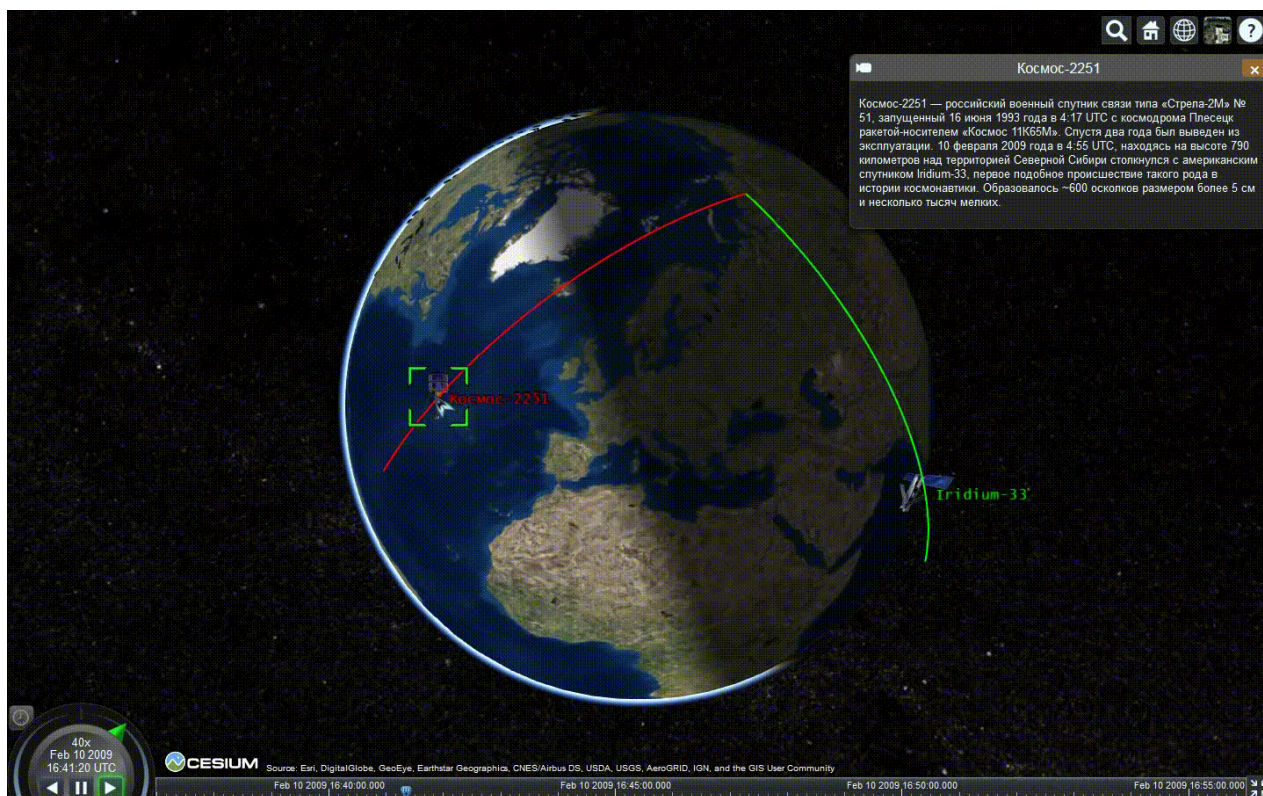


Рис. 8. Визуализация столкновения КА Космос-2251 и Iridium-33

5. Заключение

В результате проведённого эксперимента была доказана возможность применения библиотеки Cesium, аналитической модели SGP4, двухстрочных наборов элементов (TLE) и языка CZML для описания сценариев в рамках создаваемой ГИС околоземного космического пространства. Показано, что метод геоинформационного моделирования можно применять для визуализации и аналитического мониторинга состояния околоземного космического пространства. Однако нужно понимать, что прогноз местоположения спутников с помощью аналитической модели SGP4 имеет адекватную точность лишь в пределах двух суток, при использовании наиболее актуального набора орбитальных параметров. Кроме того, данная модель не позволяет учитывать ориентацию объекта в пространстве.

Встроенные графические примитивы и встраиваемые модули Cesium позволяют дополнять визуализируемую динамическую сцену такими объектами, как полоса захвата КА ДЗЗ (для этого необходимо описать геометрические

свойства целевой аппаратуры), зоны видимости станций слежения, сближения космических объектов и др. Также существует потенциальная возможность добавления дополнительного растрового слоя, содержащего текущую облачность над земной поверхностью, что может быть крайне полезным при принятии решения о проведении съёмки исследуемой территории в определённый момент времени. Использование архивных наборов TLE позволяет определить положение интересующего аппарата или станции в прошлом, а также части поверхности Земли, наблюдаемой в тот момент времени. Тем самым, в рамках перспективной ГИС ОКП возможно проведение хронологических исследований, в том числе для поиска архивных снимков заданной территории.

Список литературы

1. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Веб-ориентированная 2D/3D-визуализация параметров геомагнитного поля и его вариаций // Научная визуализация. 2017. Т. 9. № 2. С. 94–101.

2. Груздев С.С., Орлов П.Ю. Разработка программного средства с использованием графического процессора для обеспечения взаимодействия с четырёхмерной ГИС околоземного космического пространства // Экология, экономика, информатика. Сборник статей: в 3 т. Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. С. 128–143.
3. Груздев С.С., Журкин И.Г., Орлов П.Ю., Панкин А.В. Анализ состояния и перспектив по созданию электронного каталога объектов околоземного космического пространства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 51–59.
4. Журкин И.Г., Хлебникова Т.А. Цифровое моделирование измерительных трехмерных видеосцен. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 246 с.
5. Лисицкий Д.В. Перспективы развития картографии: от системы «Цифровая Земля» к системе виртуальной геореальности // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2013. № 2 (22). С. 8–16.
6. Орлов П.Ю., Панкин А.В. ГИС околоземного космического пространства: дальнейшие исследования и смена парадигмы // Экология, экономика, информатика. Сборник статей: в 3 т. Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. С. 180–189.
7. Орлов П.Ю., Панкин А.В. Космический мусор – как угроза для освоения околоземного космического пространства // Славянский форум. 2015. № 4 (10). С. 266–274.
8. Стародубцев А.В., Слепенков В.О. Фреймворк CesiumJS // Молодежный научно-технический вестник. 2016. № 12. С. 16–25.
9. Brouwer, D. Solution of the Problem of Artificial Satellite Theory without Drag // Astronomical Journal. 1959. Vol. 64. No. 1274. P. 378–397.
10. Kelso, T.S. Frequently Asked Questions: Two-Line Element Set Format // Satellite Times. 1998. Vol. 4. No. 3. P. 52–54.
11. Lane, M.H., Cranford, K.H. An Improved Analytical Drag Theory for the Artificial Satellite Problem // AIAA. 1969. Paper No. 69-925.
12. Lane, M.H., Hoots, F.R. Spacetrack Report No. 2: General Perturbations Theories Derived from the 1965 Lane Drag Theory. Aerospace Defense Command, Peterson AFB, CO. 1979.
13. Ley, W., Wittmann, K., Hallmann, W. Handbook of space technology. [Chichester, U.K.]: Wiley. 2009. 908 p.
14. Roo, B.D., Lonneville, B., Bourgeois, J., Maeyer, P.D. From Virtual Globes to ArcheoGIS: Determining the Technical and Practical Feasibilities // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2016. Vol. 82. No. 9. P. 677–685.
15. Vallado, D.A., Crawford, P., Hujdak, R., Kelso, T.S. 2006. Revisiting Spacetrack Report #3, paper AIAA 2006-6753. In: AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, 21–24 August. Keystone Colorado.