

УДК 521.1; 351.861; 523.6; 004.6

# ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

**А.Ф. Каперко**

*Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова  
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Россия, 123458, Москва, Таллинская ул., 34  
E-mail: [akaperko@hse.ru](mailto:akaperko@hse.ru)*

**Ключевые слова:** геоинформационный комплекс, аналитическая система, прогнозирование, чрезвычайная ситуация

**Аннотация:** Комплекс представляет методы и алгоритмы автоматизированного сбора координатной и некоординатной информации по опасным небесным телам, движущимся по направлению к Земле. Разработан программный комплекс для исследования эволюции опасных небесных тел, визуализации изменения орбит и оценки вероятности опасных сближений и падений опасных небесных тел на Землю. Аналитическая система содержит базы данных последствий от падения небесного тела на определенную территорию и позволяет реально оценить угрозы и возможные меры защиты населения и территорий при чрезвычайных ситуациях космического происхождения.

## 1. Введение

Данная работа выполнена объединенным коллективом сотрудников Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Кулагин В.П., Каперко А.Ф., Кузнецов Ю.М., Оболяева Н.М., Бобер С.А., Плеханов П.Г.), Института астрономии РАН (Шустов Б.М., Нароенков С.А., Емельяненко В.В.), Института динамики геосфер РАН (Шувалов В.В., Попова О.П., Глазачев Д.О.), Всероссийского НИИ по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Савельев М.И., Краминцев А.П., Смелов П.Т.).

В настоящее время возрастает роль научно обоснованных методов контроля и технологий предупреждения и управления чрезвычайными ситуациями космического происхождения, опирающихся на активное использование информационных технологий, специально спроектированных систем информационно-аналитического обеспечения и методов принятия решений. Создание инструмента в виде геоинформационного аналитического комплекса мониторинга опасных небесных тел позволяет обрабатывать большой поток информации об опасных небесных телах, движущихся к Земле. Проводить сбор и систематизацию информации, поступающую с пунктов наблюдения, выполнять определение и уточнение орбитальных параметров опасных небесных тел.

## 2. Методы и алгоритмы геоинформационного аналитического комплекса

Такие комплексы ориентированы на обеспечение комплексного моделирования и анализа статистических и мониторинговых данных, характеризующих различные стороны и факторы рисков от опасных околоземных объектов. Это позволяет сформировать комплексную оценку реализации основных направлений защиты и противодействия опасным космическим объектам с учетом сложившейся территориальной инфраструктуры и в контексте социально-экономического развития регионов. Подобные вопросы, связанные с разработкой интеллектуальных средств раннего выявления и предотвращения системных аварий, а также оценки аналитической сложности и погрешности решения задач управления организационно-техническими системами рассмотрены в работах [1, 2].

Основным методом решения задачи оценки последствий столкновения небесных тел с Землей служит математическое моделирование на базе достаточно подробных физико-математических моделей и создание информационной и аналитической системы, которая позволит проводить исследования, позволяющие изучить динамику взаимодействия относительно крупных космических тел с атмосферой Земли. Процесс наблюдения входа крупных небесных объектов невозможно из-за редкости этих событий, а воспроизвести их в лаборатории практически невозможно. Создание геоинформационного аналитического комплекса позволяет представить демонстрационные модели предварительной оценки поражающих факторов при катастрофах, связанных с астероидной и кометной опасностью, а также падением тел космического мусора. Для количественной оценки этих последствий необходимо проведение численного моделирования различных процессов, сопровождающих удары космических тел по суше и водной поверхности, а также процессов, происходящих при разрушении опасного небесного тела в атмосфере.

В настоящее время для расчета траекторий движения опасных небесных тел и моделирования ситуаций, связанных с исследованиями астероидов используются пакеты программ, позволяющие производить расчеты движения в полной модели сил. Примером такого моделирования является предсказание места падения потенциально опасного астероида и стандартных отклонений, либо вероятностей падения опасного небесного тела в определенной области. При таком подходе часто используется метод Монте-Карло, причем может быть задано произвольное распределение вероятностей для начальных условий, определяемое точностью астрономических наблюдений опасного небесного тела. Возможно также решение и обратной задачи – выработка требований к точности астрономических наблюдений на основании требований к точности предсказания места падения.

Для оценки опасности околоземных объектов, была разработан программный комплекс, позволяющий производить расчет траекторий движения к Земле опасного небесного тела на 60 суток вперед.

Интегрирование движения околоземных объектов с учетом движения всех планет Солнечной системы и Луны производится с помощью свободно распространяемого пакета GMAT (General Mission Analysis Tool) версии 2013a. Метод интегрирования – Рунге-Кутта 8-9 порядков с переменным шагом интегрирования.

Моделирование орбитального движения основано на решении дифференциальных уравнений, которые не интегрируются аналитически. Между тем численные методы позволяют получить приближенное решение с приемлемой точностью практически всегда. Поэтому именно численные методы интегрирования дифференциальных урав-

нений составляют основной инструментарий для моделирования движения астероидов, сближающихся с планетами, в частности, с Землей.

Для моделирования движения можно использовать различные неклассические и усложненные дифференциальные уравнения: регуляризованные, стабилизированные, в орбитальных элементах, типа Энке и т.д., которые применительно к слабозмущенному движению позволяют заметно повысить эффективность численного моделирования. Для моделирования астероидного движения были выбраны обычные классические дифференциальные уравнения в прямоугольных координатах.

На рис. 1 приведен пример визуализации в пакете GMAT траекторий околоземных объектов в случае расположения виртуального наблюдателя на оси, ортогональной плоскости эклиптики.

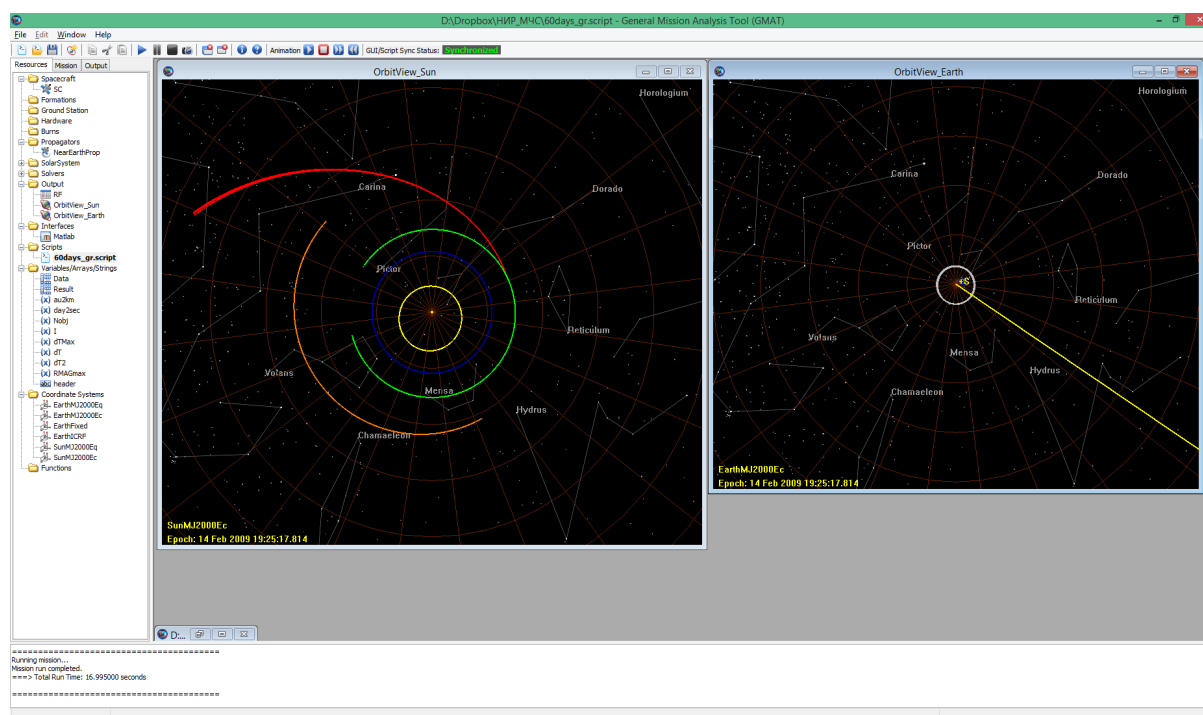


Рис. 1. Окна визуализации траекторий околоземных объектов на общем плане.

В левом окне экрана в центре расположено Солнце, орбита Меркурия обозначена желтым цветом, орбита Венеры – синим, орбита Земли – зеленым, орбита Марса – оранжевым. Траектории околоземных объектов на интервале 60 суток обозначены красным цветом. Система координат – гелиоцентрическая (MJ2000Ec с центром в Солнце). В каждом окне визуализации возможно изменение точки расположения виртуального наблюдателя при помощи манипулятора типа «мышь». Нажатие на левую кнопку манипулятора и одновременное его движение позволяет изменять ориентацию вида. Нажатие на правую кнопку и одновременное движение в вертикальной плоскости отвечает за изменение расстояния до центральной точки системы наблюдаемых объектов. Численное оценивание вероятности столкновения астероида с планетой основано на стохастическом и динамическом моделировании [3].

Применяя методы регрессионного анализа, из наблюдений определяют орбитальные параметры астероида, составляют ковариационную матрицу параметрических ошибок, и стохастическими методами (типа Монте-Карло) формируют облако виртуальных динамических состояний астероида в фазовом пространстве орбитальных параметров. Затем, используя орбитальную модель астероида, облако отображают в физическое пространство на заданный интервал времени, когда ожидается тесное сближе-

ние опасного небесного тела, и регистрируют попадания виртуальных астероидов в тело планеты. Число попавших виртуальных опасных тел за одно сближение к общему числу дает оценку вероятности столкновения опасных небесных тел с планетой.

Разработанный программный комплекс позволяет смоделировать движение как одного, так и множества опасных небесных тел, получить данные о тесных сближениях с Землей на заданном интервале времени – расстояние от объекта до центра Земли, время такого сближения, скорость сближения космического тела с планетой [4]. В результате оценки количества виртуальных небесных тел, которые прошли очень близко от Земли или столкнулись с Землей, мы получаем вероятность столкновения определенного опасного небесного тела с планетой.

### 3. Прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций космического происхождения

Создание подобного комплекса было заказано для МЧС РФ в целях снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций космического происхождения и защиты населения и территорий Российской Федерации от космических объектов техногенного происхождения.

Опасные физические последствия падений космических тел включают как основные поражающие факторы, так и долговременные последствия, влияющие на состояние природной среды и приносящие ущерб. Анализировались следующие опасные физические последствия столкновения опасных небесных тел с Землей: ударная волна на поверхности Земли, тепловое излучение, выброс пыли в атмосферу, выброс воды в атмосферу, выброс климатически активных и токсичных веществ, цунами, электромагнитные возмущения, образование кратера, сейсмический эффект. Проведена оценка последствий аварий при разрушении опасным небесным телом гидротехнического сооружения, радиационно-опасных объектов, химически опасных объектов. Как показывает практика, успешность реализации комплексных мер по предупреждению и ликвидации последствий различных по характеру и масштабам ЧС лежит в плоскости повышения эффективности управленческих решений, главным образом, в системе МЧС России.

### Список литературы

1. Воропай Н.И., Томин Н.В., Сидоров Д.Н., Курбачкий В.Г., Панасецкий Д.А., Жуков А.В., Ефимов Д.Н., Осак А.Б. Комплекс интеллектуальных средств раннего выявления и предотвращения возникновения системных аварий в энергообъединениях // Автоматика и телемеханика. 2018. № 10. С. 6-25.
2. Новиков Д.А. Аналитическая сложность и погрешность решения задач управления организационно-техническими системами // Автоматика и телемеханика. 2018. № 5. С. 107-118.
3. Avdyushev V.A. Nonlinear Methods of Statistic Simulation of Virtual Parameter Values for Investigating Uncertainties in Orbits Determined from Observations // Celest. Mech. 2011. Vol. 110, No. 4. P. 369-388.
4. Кузнецов Ю. М., Кулагин В. П., Оболяева Н. М., Каперко А. Ф., Шустов Б.М., Нароенков С.А., Бобер С. А. Методы и средства информационно-аналитической оценки астероидно-кометной опасности // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. № 4 (30). С. 9-15.