

Кулагин В.П. Информационно-аналитическая система мониторинга опасных небесных тел. // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. статей XVIII Междунар. научно-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2018. – С. 146-155.

УДК 523.6

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

В.П. Кулагин

INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM FOR MONITORING HAZARDOUS CELESTIAL BODIES

V.P. Kulagin

Аннотация. Рассмотрены методы и программные средства для создания информационно-аналитической системы мониторинга опасных космических объектов. Представлены структура системы и описание ее функциональных компонентов, позволяющих обеспечить оперативную оценку астероидно-кометной опасности и прогноз последствий столкновения опасных небесных тел с Землей. Приведены результаты работы системы в части моделирования движения космических объектов.

Ключевые слова: мониторинг; опасное небесное тело; космическое пространство; информационно-аналитическая система; астероидно-кометная опасность; космический мусор.

Abstract. The article contains a description of the methods and software tools for the creation of information-analytical system of monitoring of hazardous space objects. The article presents the structure of the system and a description of the functional components to enable rapid assessment of the NEO hazard and forecast the effects of dangerous collision of celestial bodies with the Earth. There are also the results of the system in terms of modeling the motion of cosmic objects.

Keywords: monitoring; hazardous celestial body; space; information-and analytical system; asteroid-comet hazard; space debris.

Введение

При решении комплекса вопросов по защите населения и территорий от последствий столкновений опасных космических объектов с Землей определяющую роль играют информационно-аналитические методы и технологии предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС), вызванных астероидно-кометной опасностью (АКО) и негативным воздействием космического мусора [1,4].

Мониторинг опасных небесных тел и своевременное получение интегральной аналитической информации о возможных ЧС космического характера позволяет заранее планировать меры противодействия, прежде всего астероидно-кометным угрозам.

Такие методы опираются на использование данных, получаемых со спутников и станций космического мониторинга, и ориентированы на обеспечение сопряженного моделирования и комплексного анализа статистической и мониторинговой информации, характеризующей различные стороны и факторы АКО. Их развитие позволяет создать специальный инструментарий для оперативной оценки возможных угроз и прогноза последствий столкновения опасных космических объектов с Землей, что, в

свою очередь, является основой информационно-аналитического обеспечения в системе принятия решений.

Ядром комплекса средств предупреждения глобальных чрезвычайных ситуаций, вызванных АКО, является Информационно-аналитическая система (ИАС) мониторинга опасных небесных тел и предупреждения последствий АКО. Она представляет собой систему, объединяющую ключевой функционал по проблеме АКО и интегрированную с другими компонентами информационно-организационного обеспечения по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в первую очередь с Единой государственной системой предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС). Реализация ИАС АКО позволяет сформировать превентивную оценку основных направлений защиты и противодействия астероидно-кометной опасности с учетом сложившейся территориальной инфраструктуры регионов, входящих в зону риска.

Разработка и внедрение ИАС АКО в практику работы соответствующих организаций и служб отвечает национальным интересам безопасности страны и является насущной проблемой для Российской Федерации, имеющей огромную территорию, где падение опасного небесного тела наиболее вероятно.

1. Особенности астероидно-кометной опасности

При разработке и развитии ИАС АКО необходимо учитывать особенности астероидно-кометной опасности, к наиболее критичным относятся размер опасного небесного тела и параметры его орбиты. Кроме того, ключевыми параметрами космического тела, которые во всех случаях влияют на опасные последствия соударения, являются его скорость и угол входа в атмосферу Земли, масса и тип космического тела. На опасные последствия влияют также физико-химические характеристики поверхности Земли в месте удара. Например, удар в водный бассейн может вызвать цунами, удар по твердой поверхности – землетрясение и т.д. Следует учитывать, что столкновение даже с небольшим (по космическим меркам) астероидом или частью кометы может нанести огромный урон.

Проведенные исследования в рамках программы США по поиску астероидов (Near-Earth Object Program) показали, что только в отношении 4000 из потенциально-опасных тел с размерами от 50 до 140 метров астрономы обладают достаточно подробной информацией. Открытия таких тел идут непрерывно, но известны орбиты лишь нескольких процентов таких небесных тел. Особенность астероидно-кометной опасности заключается в том, что с уменьшением средних размеров вновь открываемых потенциально опасных тел (астероидов и комет) частота обнаружения непосредственных угроз будет возрастать.

По имеющимся данным [6], астероид размером около 10 метров в перечнике, вошедший в плотные слои атмосферы на скорости 20 км в секунду, может вызвать высвобождение энергии порядка 50000 тонн в тро-

тиловом эквиваленте. Поэтому все более учащающиеся случаи пересечения орбиты Земли с траекториями крупных астероидов становятся реальной угрозой.

Из-за того, что астероиды и кометы являются самыми хаотичными объектам Солнечной системы, одной из самых сложных проблем АКО представляется вычисление их орбит [3], оценка вероятности столкновения с Землей и, как следствие, оценка потенциальной опасности. Проблема усугубляется недостаточностью информации о характеристиках движения околоземных небесных объектов, имеющих сложные многопараметрические показатели их динамического состояния и местоположения в заданной области космического пространства.

Основная трудность в том, что для космических тел, как правило, имеет место постоянное изменение их орбит из-за гравитационного влияния на них Солнца и планет Солнечной системы. В общем случае динамика перемещений подобных объектов описывается случайными функциями времени, тем не менее, существует определенный детерминизм при описании траекторий их движения, что позволяет разработать модели их поведения и сформировать прогнозные показатели для анализа возможных рисков и оценки последствий сближения опасных объектов с Землей.

2. Направления исследований АКО

Оценка публикационной и патентной активности в области мониторинга опасных небесных тел и противодействия астероидно-кометной опасности показывает, что в настоящее время наибольшее внимание уделяется исследованиям, связанным с разработкой новых методов и специализированного программного обеспечения. В частности, это, прежде всего, касается программ: расчета траекторий опасных объектов в космосе; расчета движения космических объектов и их поведения в атмосфере; расчета последствий удара тела о поверхность Земли, а также программ с использованием геоинформационных систем (ГИС) и др. [5,8].

Анализ существующих технических решений указывает на следующие тенденции в данной области:

- повышение точности расчетов и визуализаций;
- минимизация периода идентификации опасных космических объектов;
- интеграция в многофункциональные системы;
- возможность работы с большим объемом данных;
- каталогизация опасных космических объектов.

Эти задачи, в свою очередь, определяют следующие особенности проводимых исследований по проблеме АКО.

1. В отношении методов предупреждения АКО характерна нацеленность на как можно более раннее (относительно вероятного столкновения) определение опасного космического объекта.

2. Уточнение орбит движения объектов связано с использованием численных методов, позволяющих учитывать физические законы, оценивать опасность столкновения на заданных интервалах времени, а также проводить расчеты с учетом возмущений различных небесных тел. Разработка программного обеспечения в данном классе касается следующих направлений:

- выявление минимальных сближений между контролируемыми космическими аппаратами и космическим мусором с целью оценки опасности столкновения;

- модели движения искусственных спутников, позволяющие построить траектории движения и проводить вычисления по данным траекториям;

- исследование орбитальной эволюции реальных и виртуальных астероидов;

- расчет траектории и условий пересечения орбит объектов с Землей и формирование изображений по рассчитанным данным.

3. Расчет движения небесного тела в атмосфере основан на использовании динамических моделей и связан с учетом большого числа параметров при расчете реальной траектории и баллистических характеристик столкновения астероида (кометы) с Землей. Важно, что все модели ИАС АКО являются динамическими и допускают на любой стадии анализа и выработки решения интерактивное влияние пользователей на параметры и поведение модели.

4. В тенденциях по использованию ГИС можно отметить обеспечение графического интерфейса для более сложных систем, возможность управления тематическими слоями для исследования динамических систем, в том числе систем небесной механики. Аналогично для систем визуализации характерно усложнение моделей, для которых визуализация осуществляется, а также увеличение параметров, доступных пользователю для корректировки.

В связи с этим в рамках создания ИАС АКО первоочередной задачей является создание инструментальных средств, позволяющих обеспечить сбор координатной и некоординатной информации об околоземных астероидах и провести каталогизацию опасных небесных тел, особенно таких, которые находятся на траекториях столкновения с Землей на интервале времени в несколько десятилетий [3].

Далее для оценки эволюции и уточнения орбитальных параметров движения опасных небесных тел с требуемой степенью надежности, а также для определения зоны поражения на земной поверхности необходимы высокоточные методы определения орбит и средства расчета траекторий движения опасных небесных тел.

Основным методом решения задач оценки последствий АКО служит численное математическое моделирование процессов, сопровождающих удары космических тел по суше и водной поверхности, а также процессов,

происходящих при падении тела в атмосфере. Моделирование является эффективным и практически единственным инструментом исследований, позволяющим изучить динамику взаимодействия относительно крупных космических тел с атмосферой Земли.

3. Моделирование процессов, связанных с АКО

Наблюдать вход крупных объектов невозможно из-за редкости событий, а воспроизвести их в лаборатории не позволяют масштабы явления. Оценку взаимодействия космических тел с атмосферой или поверхностью Земли обычно проводят путем моделирования ударных процессов на основе расчетов всех основных стадий удара космического тела по поверхности планеты: стадии контакта с образованием ударных волн, распространения ударной волны в мишени и кратерообразующего течения, формирования ударных выбросов и их распространения в атмосфере.

Например, характерная последовательность событий, взаимодействия с атмосферой астероида диаметром 100 м, падающего на Землю со скоростью 50 км/с, следующая.

На высоте около 30 км метеороид начинает деформироваться, на его поверхности возникают волнообразные возмущения, центральная часть следа заполняется парами. Увеличение аэродинамических нагрузок вызывает расплющивание метеороида, на высоте 20 км он превращается в уплощенную структуру, а на высотах ниже 17 км – в струю, состоящую из паров нагретого в головной ударной волне воздуха и фрагментов падающего тела. Таким образом, разрушение и фрагментация падающего тела происходят раньше, чем оно начинает заметно тормозиться. Фрагментация приводит к увеличению испаряемой поверхности и, следовательно, к увеличению скорости абляции.

На высоте около 10 км фрагменты метеороида полностью испаряются, струя превращается в чисто газовую. Нагретый в ударной волне воздух имеет высокое давление, поэтому струя расширяется. В момент торможения (на высоте около 2 км), когда плотность газа в струе заметно ниже, чем плотность окружающего атмосферного воздуха, возникает явление, похожее на типичный для атмосферных взрывов огненный шар.

В момент полного торможения метеора основная масса вещества метеороида (в виде паров, перемешанных с горячим воздухом) сосредоточена на высотах 3–10 км. В дальнейшем все это вещество попадает в атмосферный плум и выбрасывается в верхнюю атмосферу, на высоты 100–1000 км [5,7].

Прогноз последствий входа космического объекта в атмосферу Земли зависит: от скорости входа космического объекта (V); от размера (D); от материала (плотности ρ , прочности); от угла наклона траектории (α). Трудоемкость вычислений определяется тем, что расчет одного варианта взаимодействия при заданных параметрах (V , D , ρ , α и др.) может занимать достаточно много времени в зависимости от принятого масштаба и

требуемой точности. На основе полученной базы данных по всем поражающим факторам для всех возможных сценариев ударов небесных тел может быть построена интерполяционная модель, позволяющая оперативно (в течение нескольких минут) оценить все последствия удара с заданными параметрами.

Использование существующих простых интерполяционных моделей (в том числе размещенных в Интернете) приводит к неточным результатам. Например, для Челябинского метеорита (ЧМ) предсказанное максимальное избыточное давление не должно было превышать 0.2 кПа, что заметно меньше наблюдавшихся значений (4.3 кПа), кроме того, не был предсказан сейсмический эффект (в действительности магнитуда сейсмического события при падении ЧМ достигала 4).

Для расчета характеристик объекта удобно использовать ретродвижение, если точка встречи небесного тела с Землей известна. Это позволяет восстановить траекторию тела в межпланетном пространстве при известных параметрах встречи тела с Землей (скорости, наклоне траектории полета, высоте, широте, долготе точки).

4. Структура ИАС АКО

Практическая реализация информационно-аналитической системы мониторинга опасных небесных тел возможна на базе новейших математических способов обработки информации с использованием высокопроизводительных технологий обработки данных, что предусматривает решение следующих задач:

- разработка методик и моделей движения небесного тела для оценки возможного взаимодействия астероида с атмосферой Земли и её поверхностью;

- обеспечение автоматизированного сбора координатной и некоординатной информации по опасным небесным телам;

- разработка программно-инструментальных средств для расчета траектории движения небесного тела, оценки вероятности опасных сближений и падений астероидов на Землю, определения точки падения и его поведения после попадания в атмосферу;

- создание банка данных последствий от падения небесного тела на определенную территорию;

- обеспечение визуализации расчетной и модельной информации на базе геоинформационных систем, что также предусматривает создание интерактивных электронных геоинформационных справочных атласов для задач предупреждения, локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций;

- создание комплексной базы данных моделей по всем поражающим факторам подобного столкновения с исследуемым небесным телом.

Комплексное решение перечисленных задач определяет архитектуру информационно-аналитической системы АКО, содержащей следующие компоненты:

1. Прогнозно-аналитическая подсистема, которая состоит из следующих функциональных модулей (программно-алгоритмических блоков):

- модуль исследования эволюции орбиты опасного тела, позволяющий выявлять опасные траектории небесных тел на больших интервалах времени;

- модуль определения орбит небесных тел, позволяющий обрабатывать входные данные, определять орбиты опасных тел из наблюдений;

- модуль определения траектории падения тела, позволяющий определить место падения или точку воздушного взрыва;

- модуль оценки вероятности опасных сближений и соударений опасных тел с Землей;

- модуль оценки последствий столкновения, позволяющий оценить степень воздействия опасного объекта на местность и объекты инфраструктуры.

2. Подсистема автоматизированного сбора информации по околоземным астероидам, включающая модули сбора координатной и некоординатной информации, а также обработки входных данных.

3. Подсистема визуализации информации, включающая: модуль визуализации изменения орбит опасных тел; модуль отчетных форм; модуль подготовки электронных цифровых карт с территориями, соответствующими классификатору территорий России; программный модуль визуализации результатов расчетов и публикации данных в сети Интернет.

4. Хранилище данных, включающее: базы данных о потенциально опасных небесных телах; банк данных последствий возможного падения небесных тел на определенную территорию; банк данных последствий взаимодействия небесных тел с атмосферой или поверхностью Земли; отраслевые хранилища данных МЧС, отражающих инфраструктуру организации защиты территорий, в т.ч. от АКО, и виды угроз.

5. Подсистема администрирования, обеспечивающая выполнение операций ведения баз данных, управления учетными записями пользователей и разграничения прав доступа к ресурсам системы, управления сетевой инфраструктурой и процессом передачи данных.

В процессе функционирования ИАС АКО выполняет непрерывный, регламентированный сбор и загрузку данных из различных источников как в ручном, так и в автоматическом режиме, используя при этом международные источники наблюдений за опасными небесными объектами. В автоматическом режиме на основании полученных данных выполняются операции выявления опасных сближений околоземных астероидов с Землей, определяются вероятность столкновения опасного тела с Землей и место возможного падения. Для комплексной оценки данные об опасном небесном объекте представляются в табличном, графическом, анимиро-

ванном и картографическом виде. В процессе интеллектуальной поддержки принятия решений средствами ИАС АКО производится оценка последствий падения космического тела и формируются возможные варианты минимизации последствий данного падения.

Разработанные методы и программные средства также актуальны в отношении насыщения околоземного пространства космическим мусором [2], представляющим собой все более существенную угрозу.

Заключение

В настоящее время реализован действующий прототип системы ИАС АКО, размещенный в структуре МЧС России. Данная ИАС АКО не является альтернативой имеющимся техническим решениям, а представляет собой комплексное дополнение к существующему информационному обеспечению и системам предупреждения о приближении опасных небесных тел.

Библиографический список

1. Бармин И.В., Кулагин В.П., Савиных В.П., Цветков В.Я. Околоземное космическое пространство как объект глобального мониторинга // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 4 (20). С. 4-9.
2. Бармин И.В., Савиных В.П., Данхэм Д.У., Цветков В.Я. Кольца мусора в околоземном пространстве // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 5 (21). С. 4-10.
3. Данхэм Д.У., Назиров Р.Р., Фаркуар Р.У., Чумаченко Е.Н. Космические миссии и планетарная защита. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 276 с.
4. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. и др. Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты // Астрономический вестник. 2013. Т. 47, № 4. С. 327-340.
5. Kulagin V., Kuznetsov Y. M., Kaperko A., Bober S. A., Obolyaeva N., Shustov B., Naroenkov S., Shuvalov V., Svetsov V., Popova O., Glazachev D. Methods and Means of Information-Analytical Assessment of Asteroid and Comet Hazard // Solar System Research. 2016. Vol. 50. No. 7. P. 464-470. doi
6. Popova O.P., Jenniskens P. et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // Science. 2013. 342 (6162). P. 1069-1073.
7. Shuvalov V.V., Artemieva N.A. Numerical modeling of Tunguska-like impacts // Planetary and Space Science. 2002. V. 50/2. P. 181-192.
8. Kulagin V., Kuznetsov Y. M., Kaperko A., Bober S. A. Data systems to support early warning of space-borne emergency situations // Room: The Space Journal. 2016. No. 6. P. 28-31.

Кулагин Владимир Петрович
МИРЭА – Российский
технологический университет,
г. Москва, Россия

Kulagin V.P.
MIREA – Russian
Technological University,
Moscow, Russia