

О применении научной визуализации в исследованиях движения небесных тел ($P < 100$ лет) на больших интервалах времени

Н.В. Куликова¹, В.И. Тищенко²

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

¹ ORCID: 0000-0003-2859-6275, nelvaku@yandex.ru

² ORCID: 0000-0002-7064-3103, tvitvi@bk.ru

Аннотация

В работе рассматривается применение научной визуализации как прогностического метода интерпретации результатов вычислительного эксперимента, осуществляемого по разработанной авторами компьютерной технологии, и позволяющего моделировать процесс длительного временного существования небесных объектов малой массы. В качестве исследуемого объекта выбрана короткопериодическая комета 1P/Галлея, имеющая зафиксированный интервал существования с 1404 г. до н.э. по 1986 г. н.э. и период обращения 76 лет. Алгоритм вычислительного процесса основывается на применении прямого метода Монте-Карло, который при малом объёме входных данных характеризуется весьма значительным выходным потоком информации. Визуализация этой информации (графики и пространственные изображения) позволяет цифровое представление полученного результата перевести в наиболее удобную для дальнейшего анализа зрительную форму. Проведенный анализ визуальных образов позволил сделать конкретные выводы о структуре кометного ядра, скоростях процесса его распада на отдельные фрагменты, а также о возможности пополнения образовавшейся метеороидной массой двух наблюдаемых на Земле потоков (Ориониды и п-Аквариды), что может увеличить их активность и через два оборота представить значительную угрозу для жизнедеятельности на Земле. Определены возможные временные интервалы этой активности. Научные выводы, полученные авторами благодаря применению метода визуализации полученных результатов, демонстрируют успешность его применения в задачах небесной механики и определяют его прогностический характер. Кроме того, ускорение освоения космического пространства и увеличение количества запускаемых с Земли аппаратов различного назначения усиливают интерес именно к визуальным результатам, позволяющим оценить ситуационную обстановку в космическом пространстве на момент предполагаемого запуска и дальнейшего безопасного полёта.

Ключевые слова: компьютерная технология, моделирование, прямой метод Монте-Карло, дезинтеграция, выброс, фрагменты, орбита, эволюция, новообразование, выборка, визуализация, графики, 3D-изображения, прогностический анализ.

1. Введение

Тема данной работы в настоящее время представляется весьма актуальной, поскольку усложняется и расширяется спектр проблем геокосмического характера и всё большее значение при-

обретают проблемы освоения дальнего и ближнего космического пространства. Это, прежде всего, проблемы вторжения в околоземное пространство небесных тел различных размеров естественного происхождения, включая все последствия катастрофического характера,

возникающие в результате движения этих тел через атмосферу Земли и выпадения самих тел или фрагментов их распада на поверхность Земли. Поэтому для обеспечения безопасности жизни на Земле необходимо тщательное изучение экстремальных явлений в атмосфере Земли, возникающих в процессе движения космического объекта в атмосфере, а также катастрофических последствий выпадения остатков фрагментов на поверхность Земли. Всё увеличивающаяся заселенность земной поверхности приводит к увеличению вероятности таких катастрофических последствий. Метеороидный рой, пронизывая атмосферу Земли, образует явление - метеорный поток, фрагменты которого из-за разности масс и скоростей движения в разных слоях атмосферы вызывают различные процессы - горение, дробление, ионизацию и, в конечном итоге, определенные разрушения на поверхности Земли. Далее, всё расширяющаяся сфера освоения космического пространства с практическими целями предполагает обеспечение безопасности протяженных космических миссий, т.е. знания тонкой структуры метеороидных образований и областей сгущения фрагментов в них, т.к. движущиеся в космическом пространстве с различной массой и различными скоростями метеороиды представляют реальную угрозу безопасности и для космических аппаратов. Тем более, что в космосе нередко наблюдаются события, пока трудно объяснимые с позиций современных знаний.

2. Постановка задачи

Одним из таких неожиданных событий оказалась ярчайшая вспышка блеска кометы 1P/Галлея при её прохождении в 1986 году. Комета, удаляясь после прохождения перигелия и находясь на расстоянии более 14,3 а.е. от Солнца, неожиданно для наблюдателей ярко вспыхнула. Яркость блеска кометы по оценкам наблюдателей превысила ожидаемую примерно в 300 раз, в то время как по законам небесной механики с удалением от Солнца блеск кометы

должен соответственно уменьшаться. И, хотя пока ещё не имеется однозначных ответов о составе и о структуре ядра кометы, о процессах, происходящих как в самом ядре, так и о причинах, обуславливающих данные процессы, появились научные работы, в которых предпринимаются попытки объяснить данное явление и прогнозировать его последствия для 21 века [1-3]. Для исследования ситуации, вызвавшей внезапную вспышку блеска кометы 1P/Галлея при её удалении после прохождения перигелия, авторы воспользовались разработанной ими ранее компьютерной технологией [4-8].

3. О технологии

При любом механизме дезинтеграции выброс вещества при распаде малых небесных тел приводит к появлению большого числа фрагментов, образующих метеороидные комплексы сложной структуры. Стохастические методы моделирования таких задач порождают большие информационные массивы, которые сложно анализировать без дополнительных преобразований. Возможным решением в этом случае является разработка компьютерных технологий, включающих в себя программы моделирования процессов, обработку результатов моделирования, представление полученных данных в виде графиков и трехмерных изображений, автоматическую каталогизацию входных данных моделей, выходных данных моделирования и графических объектов. Визуальные образы результатов моделирования могут использоваться при концептуальном изучении поведения небесного объекта на больших временных рядах. Современные средства вычислительной техники и программного обеспечения позволяют создать технологию с удобным визуальным интерфейсом для последующего использования в прикладных исследованиях. Практическая реализация этой задачи приводит к разработке компьютерной технологии исследования метеороидных комплексов на базе вычисли-

тельного эксперимента по дезинтеграции малых небесных тел с использованием прямого метода Монте-Карло и визуализации результатов моделирования. Работа выполнялась следующими этапами:

разработка и обоснование технологии обработки данных вероятностно-статистической модели дезинтеграции малых небесных тел;

разработка форм представления результатов вычислительного эксперимента в двухмерной и трехмерной графике для анализа динамической эволюции траекторий фрагментов дезинтеграции небесных объектов;

разработка комплекса программ, реализующего данную технологию, с использованием средств визуального программирования;

компьютерное моделирование процесса эруптивного выброса с поверхности кометы и визуализация структуры нового образования, сформированного фрагментами дезинтеграции;

анализ результатов визуализации орбит метеороидных комплексов, образовавшихся при вероятностно - статистическом моделировании дезинтеграции конкретных комет.

На отдельные этапы работы были получены свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ [9]. Технология совершенствуется, в нее постоянно включаются новые модули: во-первых, это модули, осуществляющие новые функции по обработке получаемой информации и её графическому изображению; во-вторых, это расширение математических модулей, описывающих алгоритмы процессов, прибли-

жающих используемую базовую модель [10] образования метеороидного роя к реальности наблюдений; в-третьих, это математические модули процессов, оказывающих влияние на орбитальное движение выбрасываемых фрагментов и комету после процесса дезинтеграции. К ним относятся факторы гравитационного воздействия Солнечной системы на движение объекта, учёт гравитационного эффекта влияния больших планет при прохождении объекта мимо них и гравитационное влияние отдельной планеты (в частности Земли) на изменение орбиты объекта при его сближении с данной планетой [11-12]. Технология [6,8] построена по принципу «клиент-сервер». Она является открытой, позволяет легко заменять отдельные модули и развивать систему, наращивая новые модули без изменения структуры. Каждый модуль является приложением в среде Windows. В состав технологии входят программный сервер и приложения, реализующие определённые задачи: моделирование и эволюция метеороидного комплекса; обработка результатов моделирования; выборка, анализ и построение графиков; трехмерная визуализация; автоматическое сохранение и просмотр входных и выходных данных, графических и 3D-изображений; построение и визуализация сечений модельного роя плоскостью эклиптики; расчёт предельных значений критериев, устанавливающих принадлежность фрагментов выброса конкретному метеороидному рою.

Наиболее полное представление о структуре технологии дает вариант, приведенный схематично на рис. 1.

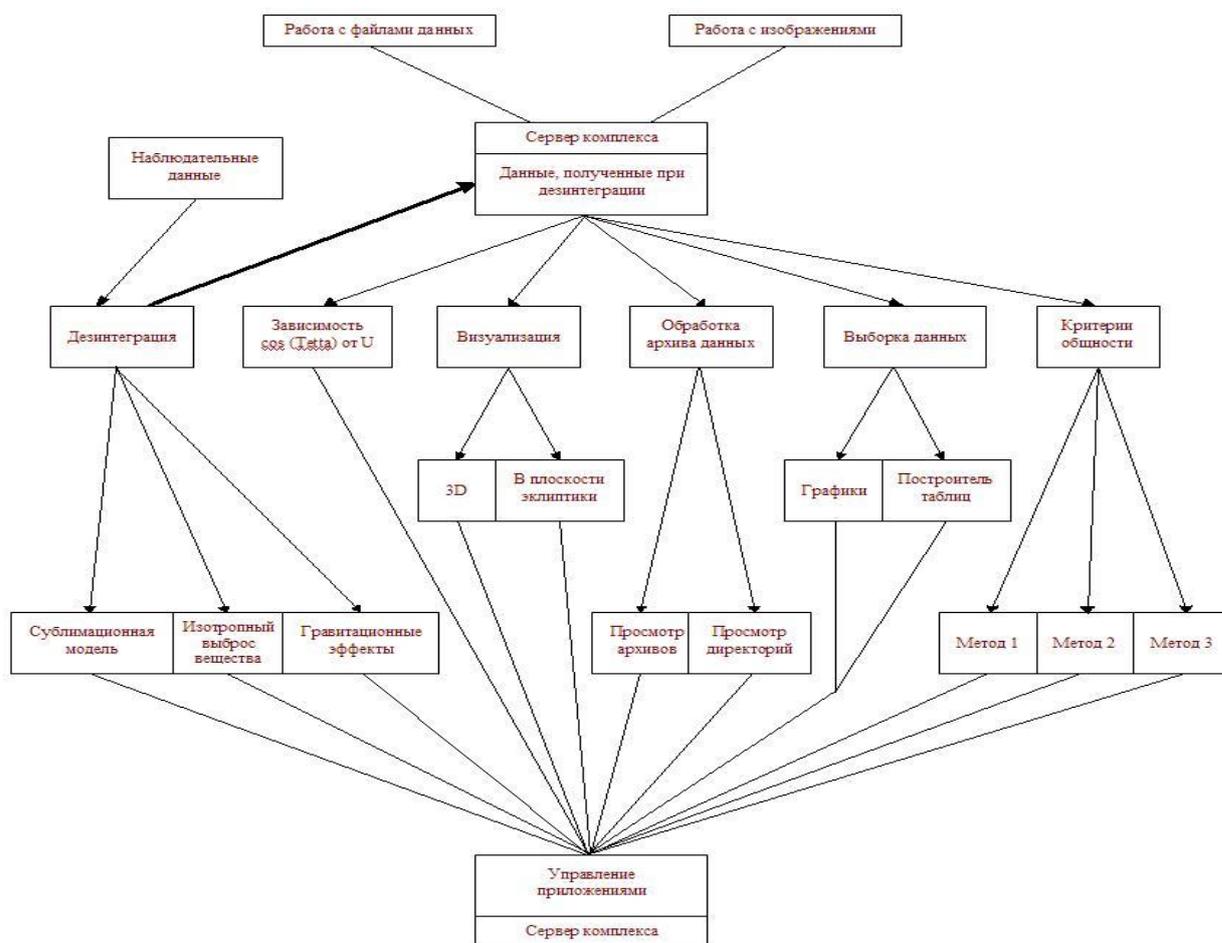


Рис. 1. Модульная структура компьютерной технологии

Основным блоком, поставляющим исследователю материал для размышления, является блок «Дезинтеграция». В нем реализован математический алгоритм главного процесса дезинтеграции кометного ядра и формирования нового метеороидного образования [10]. Поскольку априори неизвестны начальные условия дезинтеграционного процесса и выброса твердой составляющей из ядра кометы, то процессы, возникающие в ядре, представляются стохастическими. А так как случайность есть неотъемлемая часть большинства природных явлений, то стохастический подход в данном случае вполне приемлем. Однако стохастические модели порождают большие информационные массивы выходных данных, которые достаточно неудобно анализировать обычными методами. Возникает необходимость получения результатов исследования в виде графиков и 3D-изображений.

Кроме того, желательно иметь автоматическую каталогизацию входных данных рассчитываемых объектов, выходных данных моделирования и графических объектов. Получение результатов моделирования в форме визуальных образов также облегчает анализ и интерпретацию результатов исследования при концептуальном подходе. При разработке компьютерной технологии ставилась вполне конкретная задача: принимая основным процессом дезинтеграции кометного ядра равновероятный выброс вещества из ядра кометы в заданных точках кометной орбиты, определить возможности мощного выброса вещества для возникновения новообразования в форме метеороидного комплекса. Не конкретизируя реальный процесс эрупции вещества из-за его неизвестности, направление и величина скорости выброса моделируется прямым методом Монте-Карло в заданных границах, определенных по наблюдениям за реальными объектами. Затем, сле-

дую законам небесной механики, для каждого значения скорости выброса вещества вычисляются отклонения элементов орбит выброшенных фрагментов от орбиты кометы - родоначальницы. В дальнейшем с использованием этих отклонений определяются орбиты фрагментов, создание каталогов файлов исходных данных, результатов моделирования, графиков и изображений дезинтеграционного процесса предоставляет информацию для дальнейшей обработки с учетом её реальных модификаций от воздействия, прежде всего, эффектов гравитационного и негравитационного характера. К настоящему моменту возможности технологии расширены включением учёта процесса сублимации в блоке «Дезинтеграция» в качестве альтернативы или в совместном действии с основной моделью. Процесс возникает при приближении кометы к Солнцу, нарастает до максимума в перигелии орбиты и затухает на некотором участке орбиты после его прохождения. Точки истинной аномалии, когда возникает и затухает этот процесс, определяются математическим алгоритмом физического описания данного процесса. Принято считать, что ядро кометы нагревается и возникает газовый поток, выносящий с поверхности ядра кометы твердую составляющую, образующую в дальнейшем метеороидные рои. Этот процесс должен иметь место на том участке орбиты, где влияние Солнца существенно. Однако, в последнее время наблюдается значительное число комет, проявляющих активность на весьма удаленных от Солнца гелиоцентрических расстояниях свыше 2,5 а. е., что вряд ли можно отождествить с сублимационным процессом от солнечного нагрева. Подключение модели сублимационного нагрева к основному процессу выброса вещества осуществляется при формировании заявляемой конкретной схемы расчётов. При этом указывается определенная точка орбиты объекта, после прохождения которой автоматически подключается данный алгоритм, или во входных данных расчётной модели задаются параметры

возможного возникновения сублимационного процесса, и по достижении указанных значений этих параметров осуществляется такое подключение. Далее технология работает по заказанной схеме. Рабочая схема расчётного варианта формируется для конкретного исследуемого объекта и заявляется во входном потоке перечнем требуемых расчётных модулей.

4. Инструментарий технологии

Визуализация в технологии основана на применении открытой графической технологии OpenGL и библиотеки компьютерного зрения OpenCV на СИ++ в среде Windows.

Построение изображения выполняется в гелиоцентрической системе координат. Ось x направляется в точку весеннего равноденствия γ , плоскость xSy совмещается с плоскостью эклиптики. Выбранная система отсчета и входные данные, позволяют переориентировать плоскую эллиптическую орбиту в пространстве таким образом, чтобы начало координат (Солнце) всегда находилось в фокусе эллипса. В OpenGL трехмерное пространство создается посредством матриц. Используется ортографическая проекция, в которой отображаются реальные углы и размеры объектов, что важно при анализе получаемых рисунков. Все орбиты рисуются эллипсами. В OpenGL есть стандартная функция прорисовки окружности, эллипс из нее получается сжатием по малой полуоси на

величину $k = \sqrt{1-e^2}$, где e – эксцентриситет эллипса. С помощью параметра Color устанавливается цвет отображаемых орбит, который помогает анализировать изображение и правильно ориентироваться при его поворотах. Все орбиты фрагментов, образованных при выбросе в одной и той же точке родительской орбиты, окрашены в одинаковый цвет. В пучке одного цвета собраны орбиты с разными скоростями выброса. Они отличаются интенсивностью, которая увеличивается пропорционально

скорости выброса. Белый или черный цвет используется как фоновый. Для формирования на экране нужной пользователю трехмерной сцены используется оконный интерфейс ОС Windows.

В закладке «Модель» указываются диапазоны изменения истинной аномалии и скорости выброса вещества. После установки требуемых параметров создается окно «Вселенная». В нем возможно управление элементами изображения и его построение. При исследовании динамической эволюции одного объекта проводится многократное компьютерное моделирование для многих его появлений с разными значениями параметров. В процессе работы используется

много входных данных. Объем выходной информации как цифровой, так графической, нарастает лавинообразно. Без автоматической каталогизации информации, размещенной в разных файлах, сложно ориентироваться. Поэтому была создана отдельная компонента технологии, которая решает следующие задачи: автоматическое формирование имен файлов и создание каталогов файлов исходных данных, результатов моделирования, графиков и изображений, а также проверка каталогов на каждом этапе технологии. Отдельные элементы оконного интерфейса технологии приведены на рис. 2.

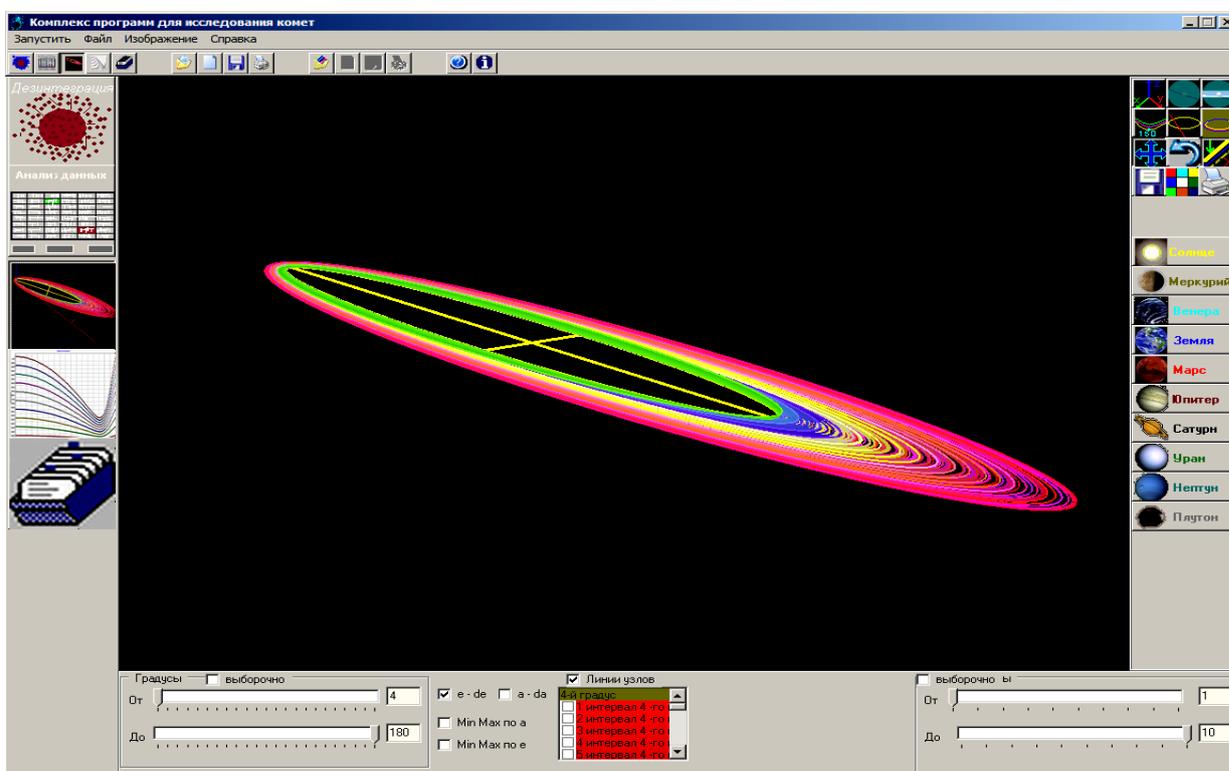


Рис. 2. Окно для трехмерной визуализации

Приложение «Анализ данных» позволяет осуществить нужную выборку данных программным путем. Необходимо выбрать нужный параметр для данного файла, и программа автоматически внесет требуемые данные в новую таблицу, которая затем конвертируется в MS Excel, где будут строиться графики по этой таблице. Управление работой программы осуществляется в меню, представленном на рис.3.

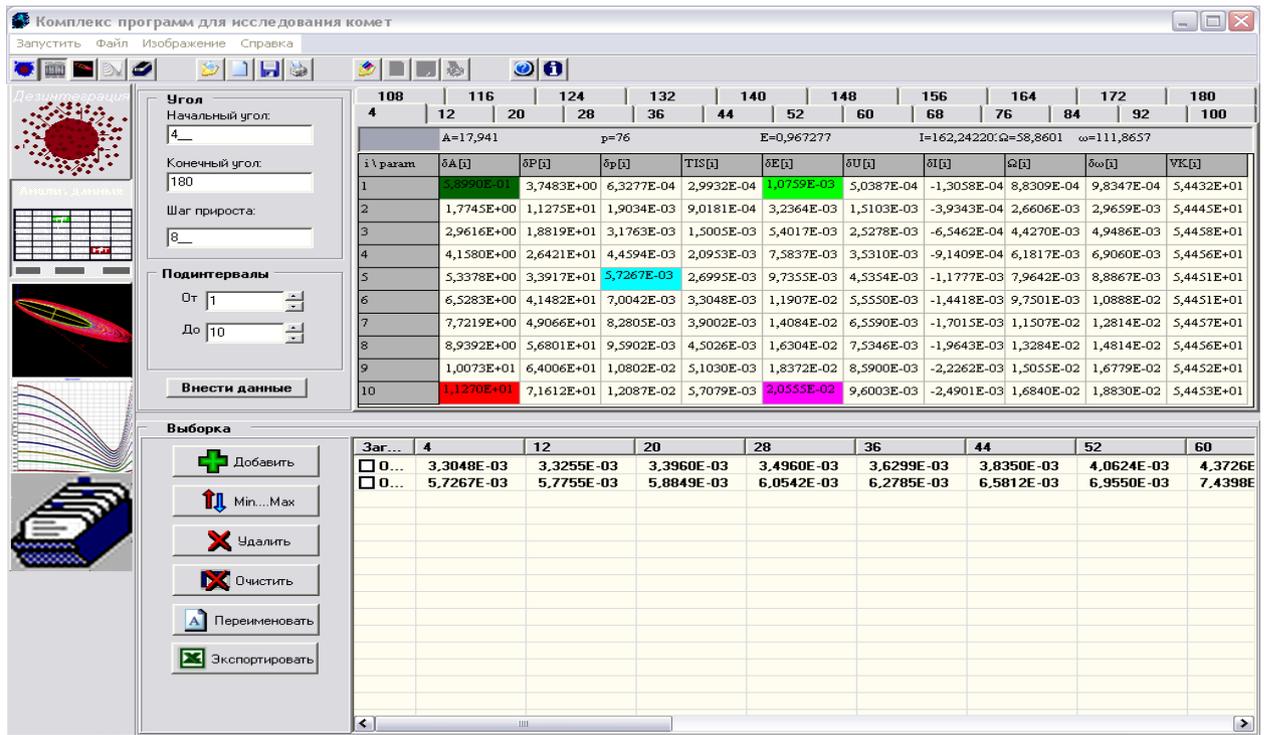


Рис. 3. Окно приложения «Выборка данных»

Задачи, решаемые в программном приложении «Графики»: наглядное отображение таблицы результатов дезинтеграции; перегруппировка данных; экспорт данных в MS Excel; построение графиков по выбранным на экране данным; совмещение графиков (на стандартном листе размещается один или два графика с наложением или без, с одной или несколькими масштабными сетками) с возможностью сжатия по осям; оформление графиков для научных отчетов.

Некоторые нестандартные возможности приложения «Графики» иллюстрирует рис. 4. Это образец выходного документа для конкретного небесного тела в заданный момент времени. На рисунке для анализа располагается следующая визуальная информация: изменения значений величины одного из элементов кометной орбиты в зависимости от учёта в расчётах влияния различного количества планет Солнечной Системы (все планеты, только «земная группа», отдельно Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) с одновременным представлением картинок состояния Солнечной Системы в моменты прохождения кометой афелия и перигелия своей орбиты.

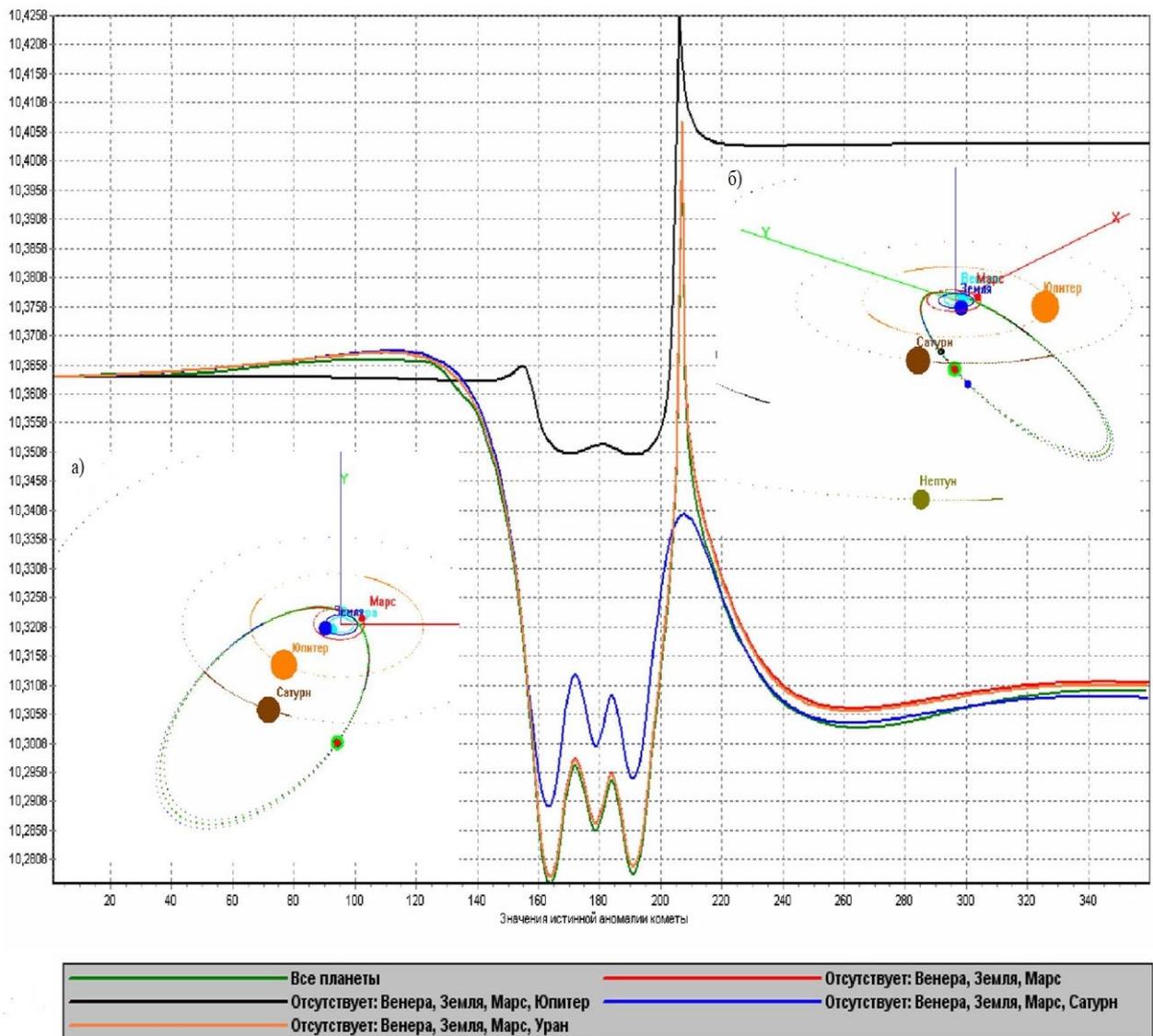


Рис. 4. Образец выходного документа

Кривые приведены для фиксированного значения скорости выброса фрагментов (100 м/с), но для выбросов в различных точках кометной орбиты (0° – 360° с интервалом 20°). Одновременно накладывается трехмерное изображение состояния Солнечной Системы для момента прохождения исследуемого объекта: а) после прохождения около Юпитера до перигелия, б) после прохождения перигелия в районе афелия. Информационное поле для анализа компактно, зрелищно и многофакторно одновременно. Ещё одна форма выходного документа представлена на рис. 5. Такой вид представления взаиморасположения небесных объектов Солнечной Системы в исследуемый момент времени очень существенен для задач небесной механики, так как дает возможность рассматривать ситуацию в её эволюционном развитии.

Анализ выходных документов в форме, представленной на рис. 5 подсказал идею о создании перспективно более информационно-зрелищного формата, демонстрирующего динамичность состояния Солнечной Системы на больших временных интервалах (рис. 6). Картинка 3D-изображений на рис. 6 была выполнена вручную из файла выходных документов, приведенных на рис. 5. Этот вид выходного документа показал более зрелищное восприятие результатов моделирования для анализа процесса существования исследуемого небесного образования в течение всего его жизненного цикла.

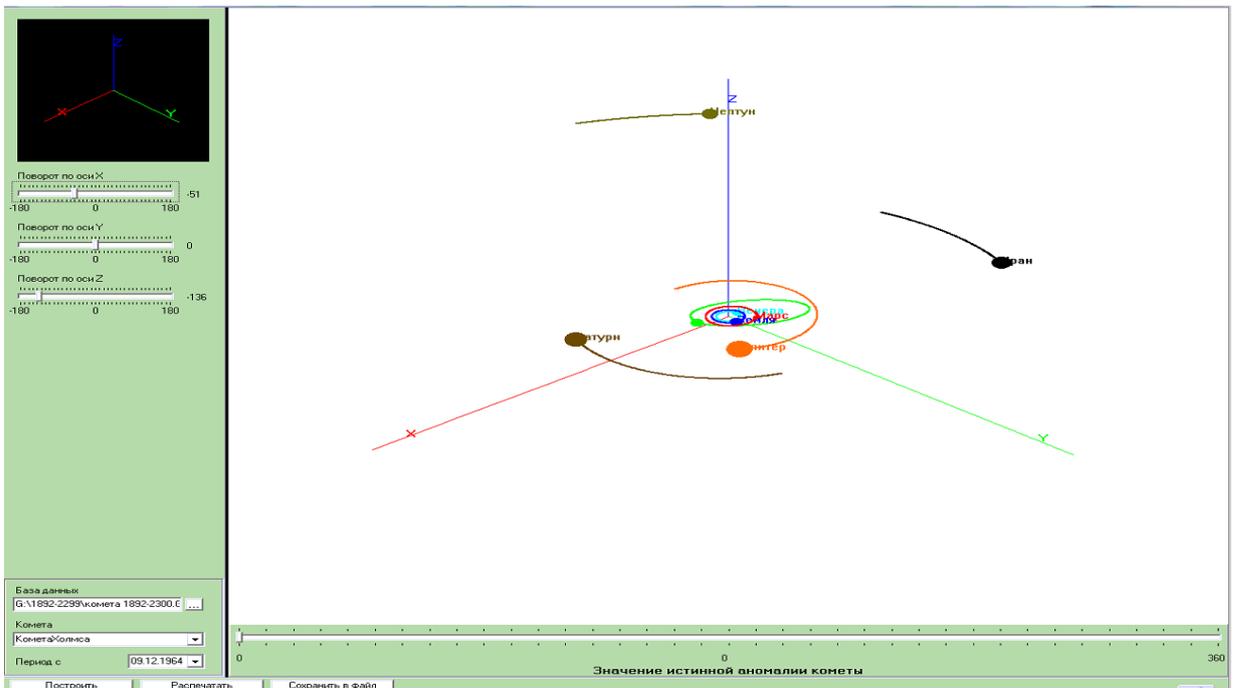
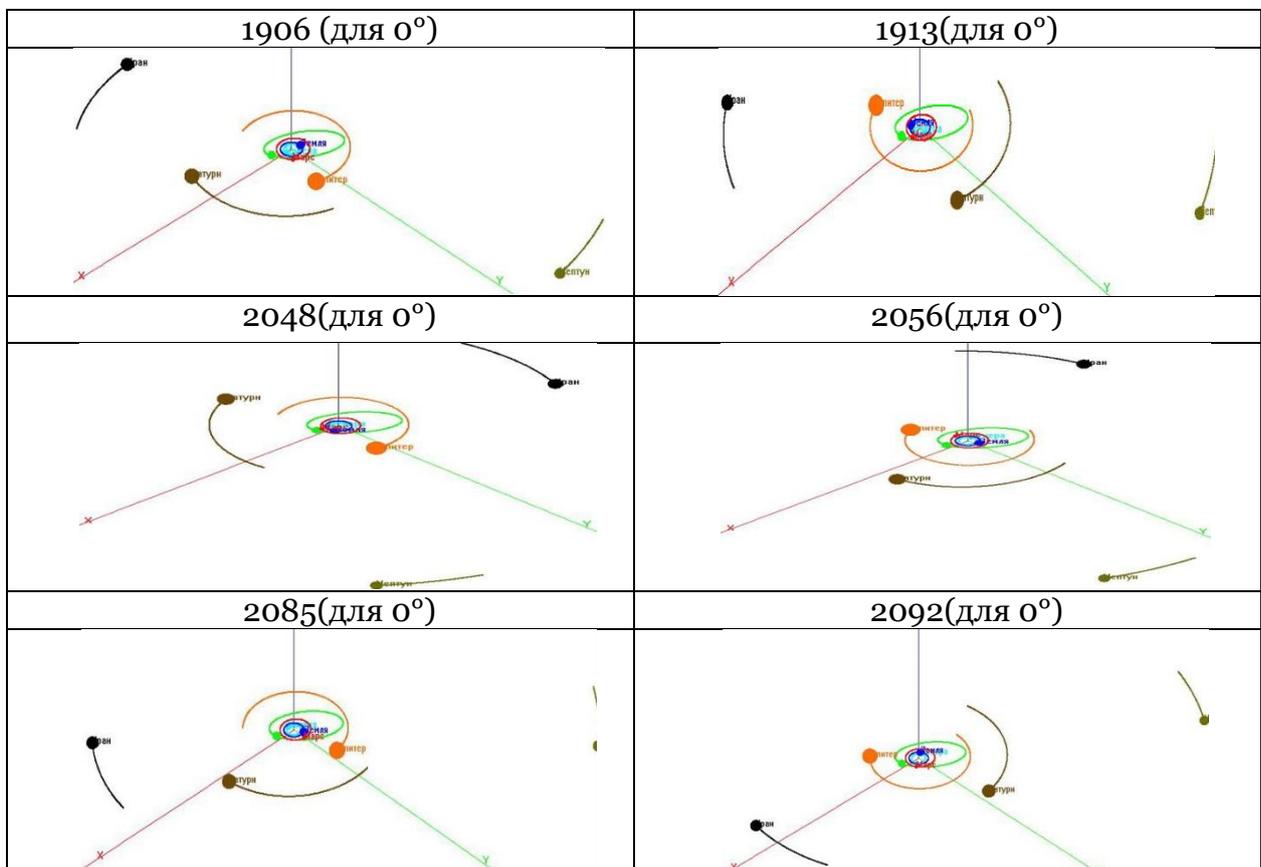


Рис. 5. Состояние Солнечной Системы на заданный момент времени при прохождении исследуемым объектом определенного участка своей орбиты

Поэтому в настоящий момент разработан модуль, который позволяет проводить автоматическую выборку из файлов с 3D-изображениями по заказанному шаблону. Такая форма визуализации уже позволяет перейти к определенным прогностическим выводам как для самого исследуемого объекта, так и для последствий его дезинтеграции и, в конечном итоге, к учету возникновения возможных неблагоприятных ситуаций на Земле.



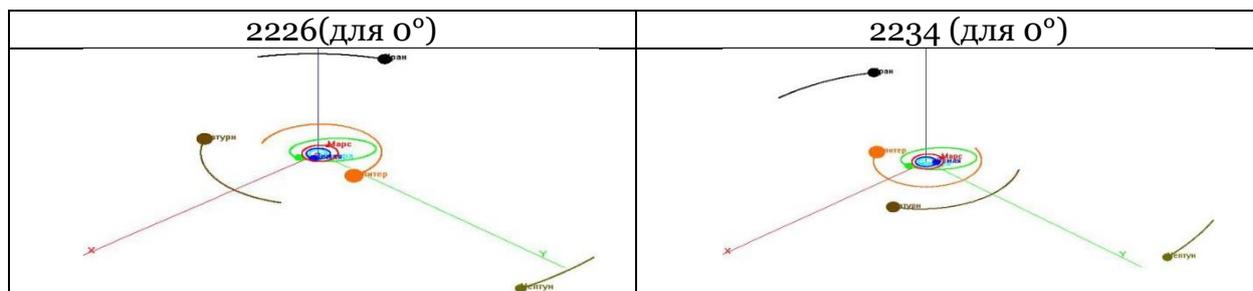


Рис. 6. Пространственное расположение объектов Солнечной Системы в различные временные моменты (исследуемый объект в районе перигелия).

5. Объект исследования

Возможности проведения научных исследований на получаемой по технологии информационной базе авторы решили продемонстрировать на наиболее интересном для прошлого столетия объекте - комете 1P/Галлея. Комета 1P/Галлея – это первая комета, для которой определили эллиптическую орбиту и установили периодичность возвращений. В общем списке появлений насчитывается 20 оборотов до нашей эры (1404 – 12 гг.) и 26 появлений нашей эры (66 - 1986 гг.). Достаточно определенным принимается временной промежуток от появления 989 -1986 гг. н.э. На этом интервале для различных начальных ситуаций и осуществили моделирование авторы представленной работы. Появление кометы в 1986 году оказалось крайне неблагоприятным для наблюдений с Земли. Однако, уровень развития космонавтики позволил получить новые сведения и подтвердить имеющиеся гипотезы о структуре и составе кометного ядра и процессах формирования комы и кометных хвостов [14]. К комете Галлея были направлены две советские межпланетные станции «Вега - 1» и «Вега - 2», космический зонд Европейского космического агентства (ESO) «Джотто», два японских аппарата Суйсэй и Сакигакэ, всего пять космических аппаратов под общим названием «Армада Галлея». Наблюдения за кометой проводились орбитальным ультрафиолетовым телескопом «Астрон», аппаратом «International Cometary Explorer». Последний раз она наблюдалась 6 - 8 марта 2003 г. в Чили (Серно-Параналь) телескопами ESO.

Комета к этому моменту прошла 4/5 орбитального расстояния до афелия, который она достигнет в декабре 2023 г. Полученные данные показали:

подтверждение гипотезы Ф.Уиппла - старшего, что ядро кометы представляет собой конгломерат смерзшихся льдов различных летучих газов с вкраплениями тугоплавкой составляющей;

при верности модели в целом для кометы Галлея к моменту прохождения 1986 года ядро кометы имеет неправильную форму с размерами 15,8 x 8 км. Такой формой обусловлена сложность вращения ядра. Пылевые частицы, в основном, имеют малые размеры, что вполне соответствует сублимационным процессам (10^{-6} – 10^{-16} г) с выносом пылевой материи газовым потоком [15], хотя скорости встречи кометных частиц с аппаратом «Вега-1» достигали 78 кмс^{-1} , что более соответствует процессам эрупции вещества;

хвосты III типа – пылевые хвосты, которые кроме сублимации могут быть также результатом эрупции твердого вещества или из определенной области на поверхности ядра, или при вращающемся ядре с поверхности большей части ядра (выбросовый эффект). Предполагается, что такой хвост наблюдался у кометы 1P/Галлея в 1835 году, а так как при каждом прохождении комета теряет свою массу (около 10%), то вполне закономерно заключение, что большая часть поверхности оставшегося ядра покрыта слоем темной пыли из нелетучих материалов [14].

Полученные данные наблюдений кометы 1P/Галлея подтвердили правильность использованной в технологии модели ядра и процессов эрупции веще-

ства с дальнейшим возникновением новообразования в форме метеороидного комплекса, эволюционирующего совместно с кометой на всем протяжении её жизненного цикла (рис. 7 - 8). На рис. 7 видно, что уже на ранних этапах разработки технологии для исследования движения кометы только с учетом гра-

витационных возмущений в задаче N - тел выявляется тонкая структура метеороидного комплекса, образующегося выбросовыми процессами на значительном участке орбитального движения и пополняющегося за счет возникающей сублимации вследствие нагрева при приближении к Солнцу.

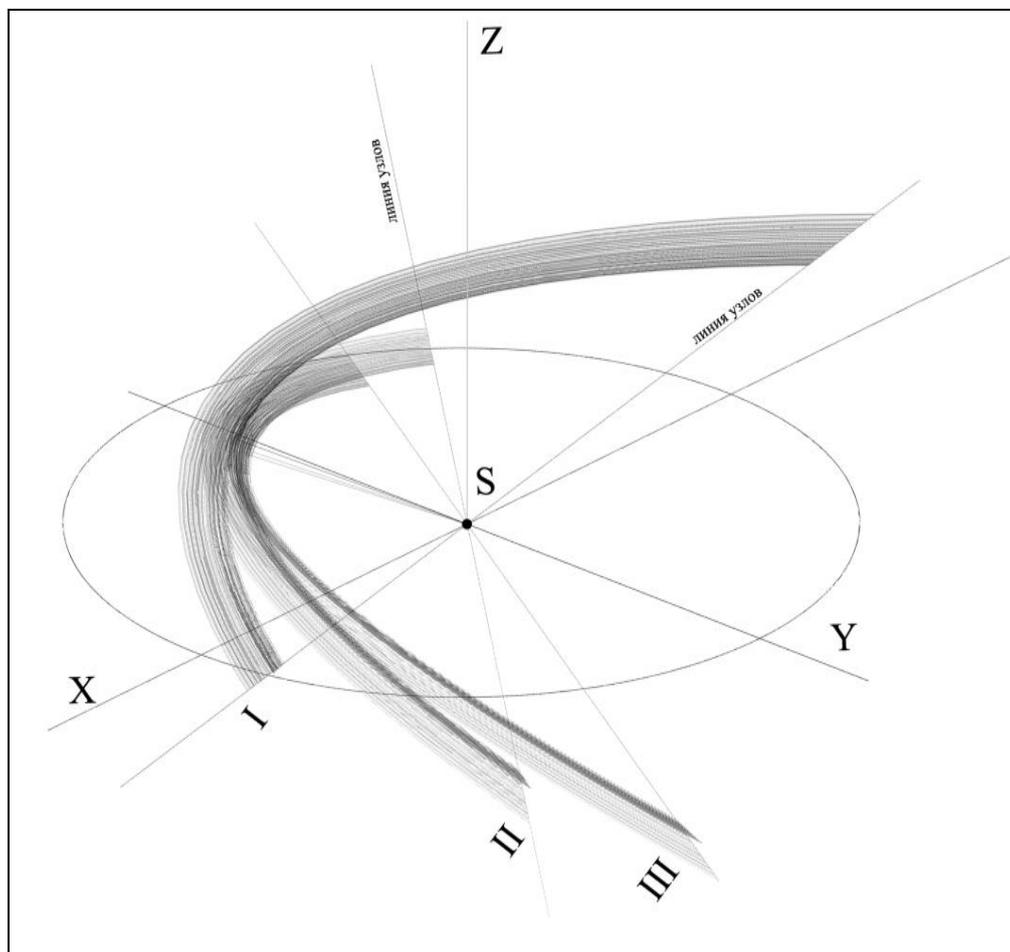


Рис. 7. Возможные метеороидные комплексы, порождённые кометой Галлея на разных оборотах: 1404 г. до н.э. (I), 1666 (II) и 1986 гг. н.э. (III)

На рис. 8 приводится часть метеороидного комплекса с детализацией положения точек выброса на кометной орбите и диапазона скоростей выброса вещества, позволяющих уточнить структуру получаемого комплекса.

Дальнейшее развитие технологии направлено на сближение расчетной модели с реальностью за счет включения новых блоков, отражающих изменения параметров орбиты вследствие действия эффектов гравитационного и негравитационного характера. Гравитационные возмущения, влияющие на изменение параметров орбиты движущегося тела, к настоящему моменту включают три основных составляющих: гравитационные возмущения в задаче N - тел, возмущения от гравитационного потенциала большой планеты при сближении с ней малых тел, возмущения от гравитационного потенциала Земли при приближении к ней малого тела. Из негравитационных эффектов прежде всего учитываются эффекты поглощения и последующего переизлучения солнечной энергии движущимся объектом, а также так называемый «эффект динамического выброса вещества», отражением которого является как бы «сдвиг» родительского тела с основной орбиты.

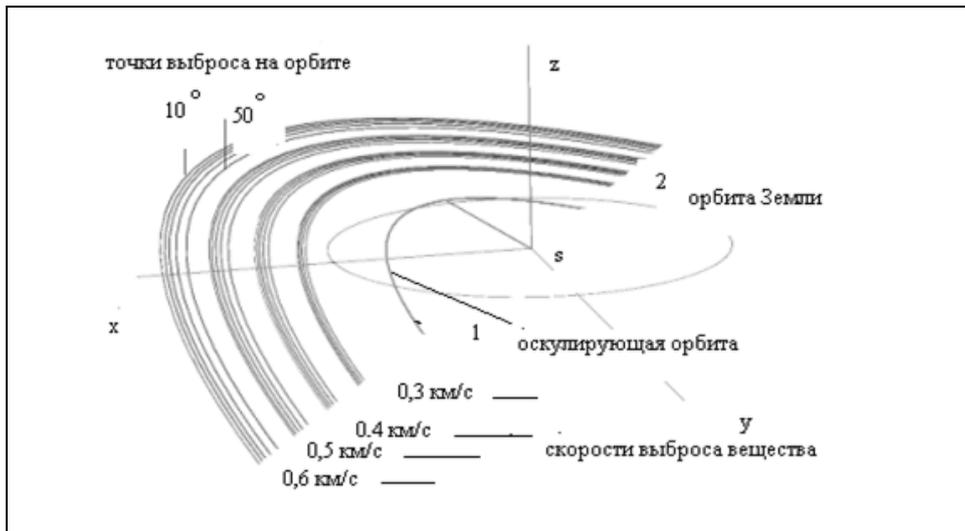


Рис. 8. Часть модельного метеороидного комплекса кометы Галлея над эклиптикой, иллюстрирующая его слоистую структуру для разного расположения точек выброса вещества вблизи перигелия и разных скоростей выброса

6. Способ исследования и некоторые результаты

На рис. 9 приведен один из вариантов пространственного расположения орбиты кометы 1P/ Галлея в появлении 1986 года.

Никаких явных особенностей в движении кометы не наблюдается. Тем более неожиданно возникает её яркая вспышка после прохождения перигелия на значительном расстоянии от Солнца. Для расширения информационного поля исследования авторы провели моделирование эволюционного движения кометы на интервале от 66 г. н. э. до 1986 г. н. э. с учётом возможностей технологии и всех факторов, описанных выше.

Анализ полученных данных и сравнение с наблюдениями, имеющимися в литературных источниках, позволили авторам прийти к вполне обоснованным предположениям с прогнозом на последствия, возможные в недалёкой временной перспективе.

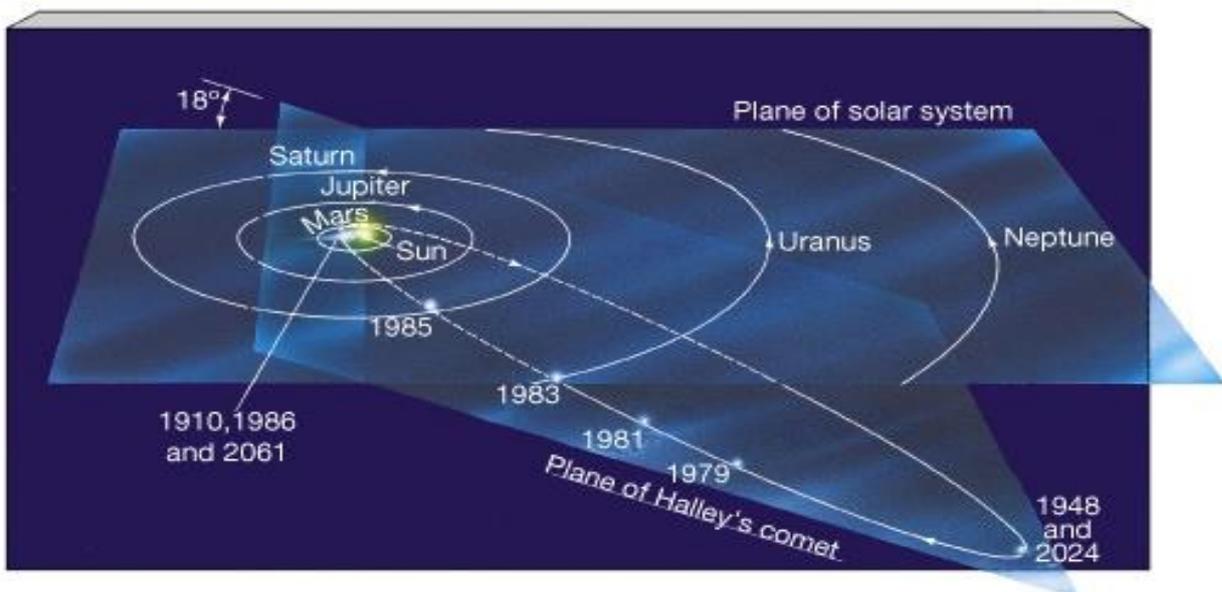


Рис. 9. Орбита кометы Галлея в появлении 1986 г.

На рис. 10 приведены графики для большой полуоси, наклона плоскости орбиты кометы к плоскости эклиптики и величины аргумента перигелия на расчётном интервале от 989 г. за 15 появлений до 2061 г. Отчётливо виден нерегулярный характер происходящих с орбитой изменений. Попробуем проанализировать качественную сторону этих изменений. Прежде всего, определим вариации большой полуоси орбиты, т.е. флуктуации линейных размеров орбиты. После прохождения перигелия в 989 г. большая полуось при возвращении в 1066 г. увеличилась на 0,286 а.е. или на 42,9 млн. км. Наклон орбиты уменьшился на $0,3^\circ$, а аргумент перигелия и долгота восходящего узла увеличились, т.е. эллипс орбиты растянулся и сместился перигелий, изменился угол наклона орбиты кометы над плоскостью эклиптики.

Далее к 1145 г. небольшие изменения: большая полуось увеличилась почти до уровня предыдущего значения, значение наклона небольшими скачками каждый раз уменьшается, а аргумент перигелия аналогичным образом увеличивается. Начиная с 1301 г. до 1607 г. почти плавно большая полуось уменьшается с 18,43 до 17,95 а.е., изменения других параметров менее значительны по величине и постоянны по характеру (i - уменьшается, ω - увеличивается).

Прохождение 1607 г. меняет ход событий. Возрастает большая полуось с 17,95 а.е. до 18,12 а.е. В 1835 году снова небольшие уменьшения и к 1910 году снова взлет до 17,95 а.е. Значения i определяют довольно резкие перепады вниз, потом вверх и снова вниз. Изменения ω имеют плавный характер и нарастают по величине от 101° до 112° .

Основной вывод, который можно сделать из этого небольшого обзора: в процессе эволюционного движения кометы в течение её жизненного цикла орбита кометы непостоянна, изменения её орбитальных элементов скачкообразны: эллипс орбиты то вытягивается вдоль большой полуоси, то сокращается, при этом точка перигелия смещается и изменяется момент его прохождения. Расположение орбиты в пространстве при каждом возвращении кометы к Солнцу обязательно отличается от предыдущего. Количественные значения изменений орбитальных параметров при моделировании естественно уточняются в расчётах при учёте тех или иных факторов влияния, но форма кривых самих изменений неизменна. На исследуемом временном интервале можно выделить даты, в которые происходят наиболее резкие изменения орбиты: 1066 г., 1301 г., 1759 г., 1835 г., 1910 г., 1986 г.



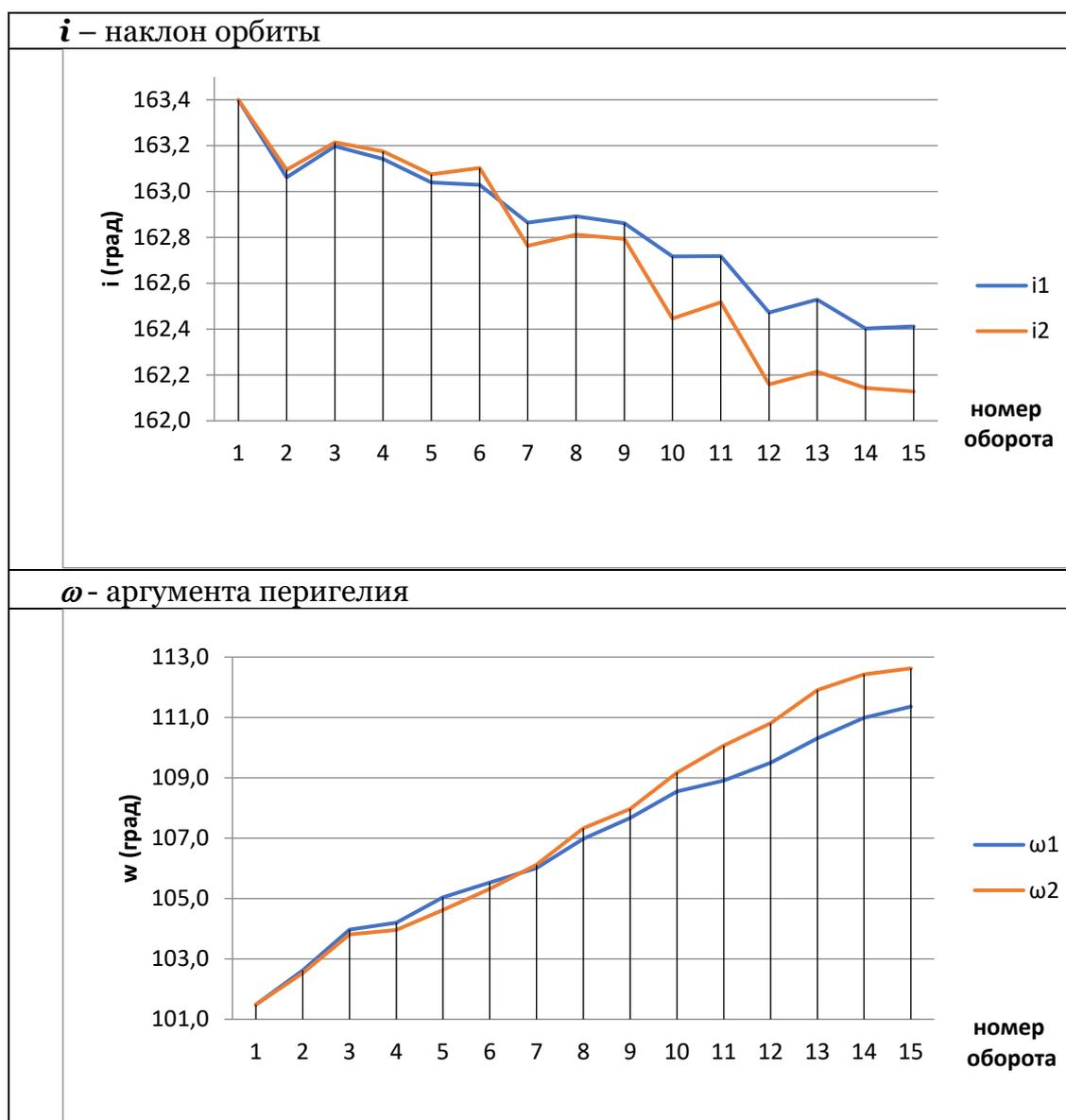


Рис. 10. Вариации орбитальных элементов кометы 1P/Галлея за период с 20.08.989 г. по 09.05.2061 г. (— с учетом и — без учета влияния Земли)

Также на этом временном интервале можно выделить даты, когда характер происходящих изменений орбиты кометы идентичен, а именно, 1759 и 989, 1835 и 1066, 1910 и 1145, 1986 и 1222 гг. Нетрудно заметить, что интервал между этими датами находится в пределах 764 - 770 лет, т.е. соответствует десяти оборотам кометы. Можно предположить, что эволюционное движение кометы имеет циклический характер с интервалом в десять обращений кометы. Если это принять во внимание, то после 1986 года при следующих появлениях в соответствие с графиками рис. 4 начнется новое постепенное уменьшение большей полуоси орбиты, с последователь-

ным уменьшением наклона орбиты кометы к плоскости эклиптики и одновременным увеличением аргумента перигелия. Это означает, что в следующий приход кометы (если не произойдет непредвиденных ситуаций) орбитальные элементы можно определить следующим образом: большая полуось в пределах 18,47 - 18,44 а.е., наклон орбиты 162,48 - 162,15°, аргумент перигелия 111,4 - 112,6°, долгота восходящего узла 58,0 - 59,5°, эксцентриситет 0,96902 - 0,96927. Первая цифра указанных интервалов относится к расчетам с учётом геопотенциала Земли, вторая - без такого учёта.

7. Формирование новообразования

Причин, отмечаемых флуктуаций орбитального движения кометы, на таком значительном наблюдаемом временном интервале конечно же немало. На наш взгляд, прежде всего, следует обратить внимание на связь трех тел - Юпитера, Сатурна и кометы. Менее значительные перепады значений орбитальных изменений, по-видимому, можно охарактеризовать совместным влиянием двух больших планет - Юпитера и Сатурна. При этом величина скачка вероятнее всего зависит от взаимного расположения этих трех тел в пространстве. В случае, когда обе планеты находятся с одной стороны от кометы их взаимное влияние на неё должно приводить к большим изменениям движения, нежели в годы тех появлений, когда эти планеты располагаются по разные стороны от кометы при её движении по орбите. Более существенные изменения значений орбитальных элементов, скорее всего, есть результат возникающих выбросов вещества из ядра кометы, усиливающих при её приближении к перигелию и продолжающихся после его прохождения (появление 1986 г.). Известно, что химический состав кометного ядра весьма многозначен и нагрев при приближении к Солнцу может содействовать возбуждению различных химических реакций, приводящих к резким выбросам вещества, усиливающимся после прохождения перигелия и приводящим к взрывным процессам, аналогичным явлению 1991 года. Сублимационный процесс на таких гелиоцентрических расстояниях вряд ли может иметь существенное значение и объяснять возникающие вспышки блеска комет. Взрывной процесс создает «сдвиг» кометы с орбиты (динамический эффект), а серия таких выбросов довольно устойчиво может сохранять возникающие изменения орбитальных элементов [15]. К настоящему моменту зарегистрирован целый ряд наблюдений за различными кометами, вспышки блеска которых фиксируются на гелиоцентрических

расстояниях свыше 2 а.е. Процесс, ответственный за это явление пока неясен. Независимо от механизма дезинтеграции кометного ядра частицы твердого вещества (метеороиды) не отходят далеко от кометы-родоначальницы, образуя вокруг неё соответствующий комплекс – метеороидный рой. Этот рой эволюционирует совместно с кометой. Разброс орбит выбрасываемых фрагментов зависит, прежде всего, от скорости выброса и положения точки выброса на орбите. На рис. 11. представлен диапазон разброса большой полуоси орбит фрагментов, выброшенных в различные годы из ядра кометы 1P/Галлея в перигелии её орбиты ($u = 0^\circ$) при скорости выброса 50 мс^{-1} .

Видно, что образующийся метеороидный комплекс не является правильным тором, т.к. диапазон разброса орбит фрагментов в разные годы различен по величине значений орбитальных элементов. Это означает, что каждый раз при конкретном выбросе вещества в конкретном месте орбиты в конкретную дату метеороиды будут занимать вполне конкретную часть космического пространства, но не обязательно равную предыдущей. Результатом будет тор сложной конфигурации с уменьшающимися или расширяющимися границами по всей орбите кометы, усложняя уже имеющуюся слоистую структуру существующего метеороидного комплекса.

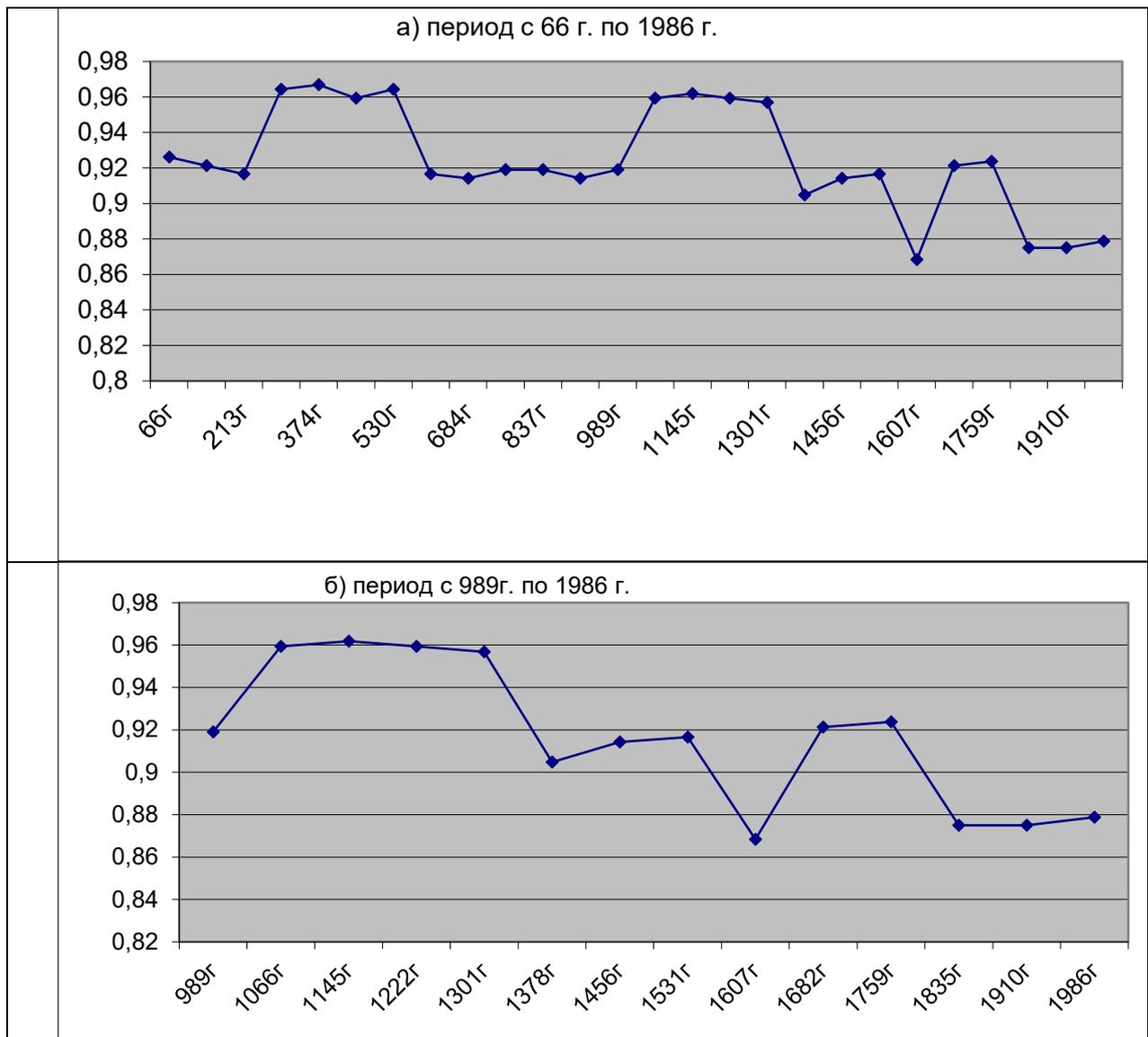


Рис. 11. Вариации приращений большой полуоси орбит фрагментов, выброшенных из ядра кометы 1P/Галлея в перигелии со скоростью выброса 50 м/с

Таким образом, будет постоянно варьироваться слоистая структура уже существующего метеороидного комплекса.

8. Комета и метеорные потоки

Земля дважды в год встречается с метеороидным комплексом кометы 1P/Галлея, проходя внутри него определенный путь по своей орбите (часть дуги окружности). В результате этих встреч на Земле наблюдаются два метеорных потока η-Аквариды (майские Аквариды) в восходящем узле и осенние Ориониды в нисходящем узле. Длительность наблюдения метеоров этих потоков и их

количественные значения в разные годы неодинаковы. Однако, эти потоки ежегодные и максимум их активности достаточно устойчив.

Из наблюдений видно, что метеорные тела в этих потоках неодинаковы. Майские Аквариды – это скорее поток Южного полушария, в Северном полушарии его наблюдение затруднено, т.к. источник метеоров расположен за горизонтом и метеоры можно наблюдать преимущественно в предрассветные часы. η-Аквариды впервые описаны в 1848 году. В хрониках можно найти описания потока вплоть до 401 года до н.э. Метеорные тела этого потока входят в атмосферу Земли на большой скорости, цвет метеоров белый, при движении в

атмосфере часто оставляют следы. Основным потоком кометы Галлея считаются осенние Ориониды. Впервые предположил общность кометы 1P/Галлея и сходство орбит потока Орионид с майскими Акваридами Чарльз Оливер в 1911 году. Ориониды - хорошо наблюдаемый в Северном полушарии метеорный поток. Они состоят из крупных быстрых метеоров, которые горят при входе в земную атмосферу, оставляя яркие следы не только белого цвета, но и красные, оранжевые, жёлтые и даже сине-зеленые (рис. 12 [16]).

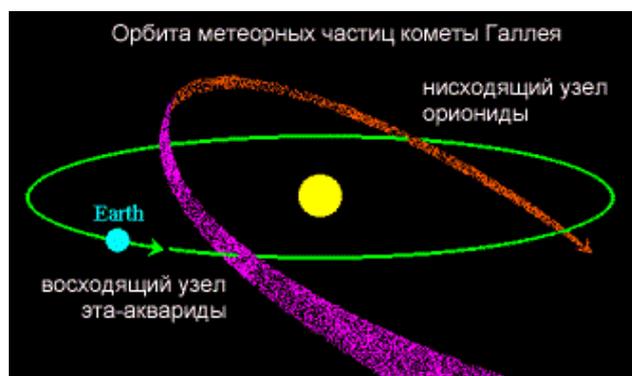


Рис. 12. Пространственное расположение метеороидного комплекса кометы 1P/Галлея

Активность потока меняется год от года. Обычно начинается с 16 октября и достигает максимума к 21 октября и постепенно спадает к 7 ноября. Среднестатистическая активность потока 20 - 30 метеоров в час. Однако, по данным Международной метеорной организации в 2006 - 2009 годах активность потока заметно увеличилась, достигая 70 метеоров в час, затем снова снизилась. Имеются сообщения наблюдателей об очень длительном и ровном пике активности («эффект плато») или об устойчивом в течение ряда лет двойном максимуме. Все отмеченные особенности наблюдений потока Орионид подтверждают, что метеороидный комплекс кометы 1P/Галлея образовался давно и не является стабильным, поскольку активная деятельность кометы продолжается (взрыв блеска в 1991 г.) и формирование комплекса не прекращается.

Сопоставим данные наблюдений метеорных потоков кометы 1P/Галлея с ре-

зультатами моделирования процесса образования метеороидного комплекса, полученными по нашей компьютерной технологии. Путь Земли в рое Орионид варьируется от $28 \cdot 10^6$ км до $90 \cdot 10^6$ км в разные годы, для η -Акварид от $82 \cdot 10^6$ км до $10^3 \cdot 10^6$ км, при этом зона максимума составляет для Орионид (21 октября) – $2,58 \cdot 10^6$ км, для η -Акварид (5-6 мая) около $5 \cdot 10^6$ км. Это согласуется с предположением об искривленности границ тора метеороидного комплекса с орбитой кометы в центре. Далее, сопоставление данных наблюдений и результатов моделирования орбит выбросовых фрагментов позволяют сделать следующее заключение: η -Аквариды – это метеорный поток, создаваемый той частью метеороидного роя, который образуется при приближении кометы к перигелию, в основном, за счет возникновения при нагреве сублимационного процесса с соответствующим выносом пылевой материи газовым потоком. Светящиеся белым цветом метеоры, по-видимому, это не крупные плотные пылинки, полностью сгорающие в атмосфере в течение своего пролета. В образовании потока Орионид скорее всего участвуют два процесса – сублимационный и выбросовый. Не конкретизируя механизм самого выброса, образование потока Орионид можно предположить следующим образом. Сублимационный процесс, поставляя небольшие скорости истечения (предположительно до 100 м/с) дает небольшие отклонения элементов для орбит фрагментов выброса, т.е. метеороидный рой компактен около орбиты кометы. Выбросовый эффект осуществляет разброс фрагментов с большим диапазоном отклонений орбитальных элементов за счёт значительных скоростей выброса (до 1,0 км/с). Совместное действие этих процессов расширяет границы тора, одновременно увеличивая общую массу фрагментов и, по-видимому, состав самих фрагментов. Этим может быть объяснено и разноцветие метеоров потока Орионид.

9. Анализ последствий вспышки

Анализ результатов моделирования дезинтеграции кометы 1P/Галлея в 1986 году показал, что форма орбит, по которым будут двигаться фрагменты выброшенной кометной массы, будет эллиптической. Для того, чтобы фрагменты приобрели гиперболическую орбиту, изменения эксцентриситета их орбит должны превысить 0,033. По результатам моделирования переход на такую орбиту при выбросах в перигелии наиболее вероятен при скоростях выброса более 700 мс^{-1} . По данным наблюдений скорость выброса по разным источникам находится в пределах от 280 мс^{-1} до 640 мс^{-1} [1, 2 и др.]. Фрагменты, выброшенные с указанными скоростями, могут пополнить метеороидные рои Орионид и η - Акварид. Фрагменты, выброшенные с большими скоростями до $700 - 800 \text{ мс}^{-1}$ пополняют либо спорадический фон, либо возникнут новые образования, а далее все фрагменты будут иметь только гиперболические орбиты. При зарегистрированной неожиданной вспышке блеска 14 февраля 1991 (5 лет после прохождения перигелия) расстояние до Земли по расчетам модели составило 13,45 а.е. По данным наблюдений в Чили, где была зарегистрирована эта вспышка, гелиоцентрическое расстояние определяется как 13,379 а.е. Такое расхождение вполне приемлемо для качественной оценки событий. В данной технологии интересные исследователя расчётные точки дезинтеграции задаются в массиве входных данных. В конкретном случае был выбран интервал в 10° между точками выброса. Вычисления проводились в перигелии (начальная точка) и далее по орбите через 10° в семи последовательных точках. Во всех расчетных точках наиболее интересными являются орбиты фрагментов, полученные при выбросе со скоростями 500 мс^{-1} . Именно эти скорости выброса в точке вспышки (4-я расчетная точка), до нее и сразу после нее дали наблюдателям увеличение активности потока Орионид в 2005 - 2009 годах.

Более высокие значения скорости выброса вещества (если такие возможны на этих расстояниях) изменят активность потока Орионид преимущественно через два оборота кометы после прохождения в 1986 году, т. е. через 152 года. Результаты вспышки блеска кометы в 1991 году возможно скажутся на активности этого потока в течение всего третьего оборота, т.е. в 2133 - 2209 гг., что будет соответствовать изменившейся тороидальной форме метеороидного комплекса. Проанализировав полученные расчётные данные и имеющиеся в литературных источниках результаты наблюдений кометы 1P/Галлея в 1986 году, можно сделать следующее предположение о кометной эволюции в процессе её жизненного цикла и о некоторых особенностях её появления в будущем. Если исключить неизвестные нам механизмы холодных вспышек блеска комет на больших гелиоцентрических расстояниях, то можно представить эволюционное развитие кометной деятельности для прохождения перигелия в 1986 году как действие двух процессов - сублимационного и выбросового. До перигелия превалирует сублимация, нарастающая за счет увеличивающегося нагрева при приближении к Солнцу. Затем вблизи перигелия активизируются взрывные процессы, постепенно достигая высоких скоростей (в нашем случае около 500 мс^{-1}). После прохождения перигелия ещё некоторое время ситуация изменяется незначительно, но ядро кометы уменьшается за счет выбрасываемых фрагментов до критического значения. Наконец, в области истинной аномалии около 160° - 162° - 164° ядро разрывается на части и возникает вспышка блеска за счет увеличения светящейся поверхности. Выбросовый процесс начинает затухать, а сублимация постепенно прекращается, т. к. снижается нагрев. Поскольку это гипотетическое предположение не лишено смысла, то к следующему возвращению в 2061 году комета появится либо с ядром в виде самогравитирующей системы нескольких не слишком больших тел, либо в

форме метеороидного комплекса без явно выраженного ядра.

10. Заключение

Анализируя результаты моделирования по выходным документам, представленным не только в цифровой форме, но и в пространственно – временном изображении (3D – изображения на рис. 4 - 6), можно сформулировать следующие выводы:

для наблюдений на Земле повтор ситуации 2005 - 2009 гг. может осуществиться в 2130 - 2134 гг.;

в 2138 году через перигелий пройдет более плотный метеороидный комплекс за счёт фрагментов, выброшенных в 1991 году в точке кометной орбиты с истинной аномалией $150-160^\circ$ со скоростью 500 м/с;

кроме того, результаты явления 1991 года могут также сказаться на активности потока Орионид в 2143 - 2148, 2153, 2162 и 2192 годах.

Таким образом научная визуализация в исследованиях, когда лабораторный или натурный эксперимент не может быть осуществлен, оказывается весьма полезным инструментом для долговременного прогнозирования с целью выявления возможных нежелательных ситуаций на Земле.

Список литературы

1. Levi B.C. A surprise from th predictable comet Halley. //Phys. Today. – 1991. – 44, #4. P. 20
2. Rabinowitz D.I. A source map for dust jets observed in the coma of P/Halley. //Astron. Astrophys.- 1988. 200.- p. 225 – 247.
3. Aswin Sekhar. Jupiter helps Halley's Comet give us move spectacular meteor displays.//Royal Astronomical Society (RAS). National Astronomy Meeting in Manchester. – 2012. – March 27 www.sciencedaily.com
4. Куликова Н.В., Тищенко В.И. Возможности компьютерного моделирования орбитальной эволюции космических объектов малой массы

//Вестник РосНou. 2012. №4. С. 34-41 www.vestnik-rosnou.ru

5. Куликова Н.В., Тищенко В.И. Применение научной визуализации при анализе эволюции кометы 17P/Холмса. //Электронный журнал «Научная визуализация», - 2016. – т. 8. - № 1. С. 108 – 119 www.svjournal.org
6. Тищенко В.И. Компьютерная технология исследования метеороидных комплексов в ближнем космосе // Диссертация на соискание ученой степени к. ф.-м. н., Обнинск, 2005, 162 с.
7. Tishchenko V.I. Information technology for visualization of a dynamical evolution of meteoroid complexes. //Astronomical and Astrophysical Transaction. – 2004. – v. 23. - #5. – p.475 - 480.
8. Куликова Н.В., Тищенко В.И. Кометы и метеороидные комплексы – компьютерная технология. //Околоземная астрономия – 2005: сборник трудов конференции – Казань, КГУ. – 2006. С. 21 – 28.
9. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ: №№ 2004612520, 2004612521, 2004512522 (15.11.2004); №№ 2011614751, 2011616272 (05.02.2011), № 2012617163 (09.08.2012).
10. Куликова Н.В. Образование, эволюция и природа метеороидных роев в космическом пространстве. //Докт. дисс. ГАИШ МГУ. - 1989. - 327 с.
11. Куликова Н.В., Петровская Е.Н., Чепурова В.М. Короткопериодические кометы и Земля: гравитационное возмущение. //Космонавтика и ракетостроение. – 2015. -№ 1 (80). – с. 129 -137.
12. Valentina Chepurova, Nelli Kulikova and Elena Petrovskaja. Contribution of the Earth's gravitational potential in orbital motion of short –period comets. //RAA (Research in Astronomy and Astrophysics.– 2016. – v. 16. - #4.– p.53–58.

13. Элементы орбиты кометы Галлея от 989 г. до 1986 г.
<http://galspace.spb.ru/index381.html>
14. L.M. Zelenyi, L.V. Ksanfomaliti From the “Vega” mission near comet Halley to the “Rosetta” mission near comet 67P/Churyumov – Gerasimenko
http://www.iki.rssi.p/VEGA.rssi.ru/ssp/VEGA/Vestnik_npo/_3_2015
15. Баканас. Е.В. Статистические и динамические закономерности распределения малых тел в Солнечной системе. Канд. дисс. Москва. -2005. - 91 с.
16. Метеорный поток Ориониды в ночном небе 20 октября
<http://www.nat-geo.ru/>