

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ РАН

На правах рукописи

Бондаренко Юрий Сергеевич

**ДВИЖЕНИЕ КОМЕТ С НЕРЕГУЛЯРНО МЕНЯЮЩИМИСЯ
НЕГРАВИТАЦИОННЫМИ ЭФФЕКТАМИ**

Специальность 01.03.01

Астрометрия и небесная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте прикладной астрономии РАН.

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук

Ю. Д. Медведев

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН
Доктор физико-математических наук, профессор

В. К. Абалакин
Г. А. Красинский

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)

Защита состоится 28 июня 2010 г. в ____ час. на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 при Учреждении Российской академии наук Институте прикладной астрономии РАН по адресу: 191187, г. Санкт-Петербург, наб. Кутузова, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Ю. Д. Медведев

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Возросший в последнее время интерес к проблеме астероидно-кометной опасности для Земли делает актуальными задачи более точного прогнозирования движения естественных небесных тел. Несмотря на относительно небольшое, по сравнению с астероидами, число комет, их столкновение с Землей представляет большую угрозу. Так, по оценкам М. Бейли, примерно 10 % земных и лунных кратеров образовались в результате столкновения Земли и Луны с кометами. Характерным примером является падение Тунгусского метеорита, возможную генетическую связь которого с кометой Энке установил Л. Кресак в 1978 г.

Развитие представлений о природе физических процессов, происходящих в комете, одновременно с повышением точности наблюдений позволяет совершенствовать методики учета негравитационных эффектов, что является необходимым условием увеличения долгосрочности и точности численных теорий движения комет.

Таким образом, задача разработки методики построения единых численных теорий движения комет является актуальной для исследования изменения негравитационных эффектов со временем, уточнения модели их действия и, как следствие, более точного прогнозирования движения комет.

Цели и задачи диссертационной работы

Основной целью диссертации является разработка единого подхода к построению численных теорий движения всех короткопериодических комет на основе модели негравитационного ускорения Марсдена и ее модификаций, а также проверка этого подхода на ряде комет, имеющих большое число появлений, плохо представляющихся единой орбитой.

Для реализации цели настоящей работы решались следующие задачи:

- разработка методики построения численных теорий движения комет, охватывающих большие интервалы времени;
- построение долгосрочных численных теорий движения комет Копфа и Темпея 1 и исследование эволюции параметров их орбит;
- построение численных теорий движения короткопериодических комет с учетом смещения моментов максимумов газопродуктивности;
- создание электронного каталога кометных орбит.

Научная новизна работы

В работе предложена новая методика построения численных теорий движения комет с быстро и сильно изменяющимися со временем негравитационными ускорениями, позволяющая объединять большое число появлений единой орбитой. Эффективность данной методики была доказана при построении численных теорий движения ряда комет.

Построена единая численная теория движения кометы Копфа, объединяющая 16 появлений кометы, и произведен анализ эволюции негравитационных эффектов со временем. Сделан прогноз движения кометы Копфа на появление в 2009 г., получены значения параметров ориентации ядра кометы Копфа, а также их изменение со временем.

Построена единая численная теория движения кометы Темпель 1. Произведена оценка возмущения, оказанного на комету Темпель 1 в результате ее столкновения с ударником космической миссии Deep Impact, и показано, что в результате этого столкновения произошло изменение негравитационных ускорений в движении кометы Темпель 1.

Получены величины смещения максимумов газопродуктивности для 20 короткопериодических комет фотометрическим и динамическим способом. Показано, что далеко не для всех комет кривая блеска отражает изменение их газопродуктивностей.

Практическая значимость работы

Создан электронный каталог элементов орбит комет, включающий в себя информацию обо всех известных на сегодняшний день кометах (всего 5519 записей о 224 нумерованных кометах и 2905 ненумерованных кометах) и обладающий широким спектром вычислительных возможностей.

Результаты, выносимые на защиту

1. Новая методика построения долгосрочных численных теорий движения комет, учитывающая изменение негравитационных эффектов со временем.
2. Численная теория движения кометы Копфа на интервале с 1906 по 2002 гг., объединяющая наблюдения 15 появлений кометы со средней ошибкой веса $\sigma_0 = 1''.42$, прогноз ее движения на следующее появление и параметры ориентации ядра.
3. Численная теория движения кометы Темпель 1 на интервале с 1967 по 2011 гг. Оценки величины изменения негравитационного ускорения, произошедшего в результате столкновения кометы с ударником космической миссии Deep Impact в 2005 г.
4. Величины смещения максимумов газопродуктивности для 20 короткопериодических комет, полученные фотометрическим и динамическим способами.
5. Электронный каталог элементов орбит комет, позволяющий исследовать эволюцию орбит комет.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 8 работах, четыре из которых написаны в соавторстве. В совместных работах диссертантом были решены поставленные задачи и проведен анализ полученных результатов. Перечень работ приведен в конце автореферата.

Апробация работы

Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на:

- научных семинарах ИПА РАН (г. Санкт-Петербург) в 2006–2010 гг.;
- Международной конференции «Околоземная астрономия 2007» (п. Терскол) 3–7 сентября 2007 г.;
- Международной конференции «100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее» (г. Москва) 26–28 июня 2008 г.;
- «II Пулковской молодежной астрономической конференции 2009» (г. Санкт-Петербург) 2–4 июня 2009 г.;
- Международной конференции «Околоземная астрономия 2009» (г. Казань) 22–27 августа 2007 г.;
- Международной конференции «Asteroid-Comet Hazard - 2009» (г. Санкт-Петербург) 21–25 сентября 2009 г.;
- на семинарах кафедры небесной механики СПбГУ и семинаре Главной астрономической обсерватории РАН (г. Санкт-Петербург) 2010 г.

Результаты работы по созданию электронного каталога были отмечены третьей премией ученого совета ИПА РАН в 2009 г.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из шести глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 153 страницах (145 страниц основного текста, 8 страниц списка литературы), включает 31 таблицу и 25 рисунков. Библиографический список содержит 89 источников и 11 электронных ресурсов.

Содержание диссертации

Первая глава является вводной. В ней проводится анализ состояния исследований по вопросу учета негравитационных эффектов в движении комет; обосновывается актуальность темы диссертации; формулируются цели, указываются научная новизна, практическая значимость результатов работы, перечисляются положения, выносимые на защиту; приводятся сведения по публикациям и апробации работы, а также краткое содержание диссертации.

Во *второй главе* рассматриваются уравнения движения кометы, методика учета эффекта смещения фотоцентра кометы. Описывается модифицированный метод Энке, примененный в работе для повышения точности интегрирования уравнений движения, и дифференциальный метод уточнения параметров орбиты.

Отмечается, что учет негравитационных ускорений производился по модели Марседена с использованием общепринятой функции $g(r)$, где r – гелиоцентрическое расстояние. Считалось, что величина негравитационного ускорения $\bar{A} \cdot g(r)$ может изменяться в любой момент времени. Вектор негравитационных параметров \bar{A} находился из улучшения вместе с элементами орбиты. Изменение негравитационных ускорений осуществлялось добавлением вектора $\bar{A}' \cdot g(r)$ к его текущему значению. Полагая N -моментов, в ко-

торые величина негравитационного ускорения изменяется, получаем $\bar{A}' \cdot g(r), \bar{A}'' \cdot g(r), \dots, \bar{A}^N \cdot g(r)$ поправок к негравитационному ускорению $\bar{A}g \cdot (r)$. При этом текущая величина негравитационного ускорения определяется суммой поправок, действующих с соответствующего момента времени.

В случае, когда газопроизводительность кометы несимметрична относительно момента прохождения перигелия, в модели негравитационных ускорений использовалась функция $g(r')$, где $r' = r(t') = r(t - \Delta t)$, t – текущий момент времени, а Δt – интервал времени, на котором происходит смещение максимума негравитационного ускорения относительно перигелия. Величина Δt находилась из улучшения орбиты.

Предполагалось, что в движении комет помимо постоянно действующих негравитационных ускорений возможны импульсные воздействия на их ядра. Моделирование импульсных воздействий на комету осуществлялось добавлением вектора \bar{I} к текущему вектору скорости в моменты этих предполагаемых воздействий.

При учете величин смещения фотоцентра, которые предполагались разными для различных интервалов наблюдений, считалось, что данные смещения происходят вдоль радиус-вектора ядра кометы и не зависят от гелиоцентрического расстояния. В качестве положительного направления бралось направление в сторону Солнца.

Для объединения появлений комет, имеющих большое количество наблюдаемых оборотов вокруг Солнца, была выбрана следующая стратегия. Прежде всего, находились оценки величины среднеквадратических ошибок наблюдений каждого появления, по возможности свободные от ошибок динамической модели движения, в первую очередь, от ошибок модели учета негравитационных ускорений. Ошибки наблюдений каждого появления назывались *априорными* и определялись путем попарного объединения появлений, поскольку при таком подходе влияние негравитационных ускорений незначительно, а орбиты точнее, чем при объединении наблюдений одного появления. Объединение трех и более появлений для большинства комет требует учета негравитационных ускорений в их движении. При объединении двух появлений делалась оценка величины смещения фотоцентра кометы и, в зависимости от величины ошибки этого параметра, он учитывался или не учитывался при оценке величины среднеквадратической ошибки наблюдений.

Для каждого появления T_i оценивалась величина априорной ошибки единицы веса $\sigma_a(T_i)$. Для появлений, в которых при попарном объединении получалось две оценки среднеквадратических ошибок, в качестве априорной ошибки бралось значение среднего арифметического этих величин.

Далее метод предполагает объединение всех имеющихся наблюдений по следующей схеме. В первую очередь объединяются наблюдения трех последовательных появлений, ближайших к начальной эпохе. Начальная эпоха элементов определяется как средневзвешенная величина, учитывающая количество всех имеющихся наблюдений, их моменты и точность. При этом

определяются параметры орбиты, константы негравитационного ускорения и величина смещения фотоцентра, а также вычисляются среднеквадратические ошибки наблюдений каждого появления – *апостериорные* ошибки $\sigma_p(T_i)$. Далее, по одному, производится добавление наблюдений последующих появлений. Если хотя бы одна из величин апостериорных ошибок наблюдений объединяемых появлений значительно превосходит величину априорной для этого же появления, то предполагается, что негравитационные эффекты в данном появлении изменились. В этом случае к уже определенным величинам добавляются новые компоненты негравитационного ускорения $A_1 \cdot g(r)$, $A_2 \cdot g(r)$, $A_3 \cdot g(r)$, которые учитываются в уравнениях движения, начиная с момента прохождения кометой афелия, предшествующего данному появлению. В случаях, когда ускорения по модели Марсдена не позволяют представить наблюдения достаточно точно, предполагается, что в движении комет имеет место мгновенное изменение скорости из-за импульсных воздействий на кометное ядро. В таком случае в число улучшаемых параметров вводятся дополнительные неизвестные – компоненты мгновенного изменения скорости, момент приложения которых, как правило, определяется варьированием.

В *третьей главе* приводится исторический обзор наблюдаемых появлений кометы Копфа с выявлением неблагоприятных факторов, затрудняющих улучшение ее орбиты, таких как вспышки яркости и сближения с большими планетами. Строится численная теория, объединяющая все наблюдаемые появления кометы, по предложенной в данной работе методике. В результате применения новой методики к построению единой численной теории движения кометы Копфа на интервале с 1906 по 2002 гг. удалось объединить наблюдения 15 появлений кометы со средней ошибкой веса $\sigma_0 = 1''.42$, для чего потребовалось 27 параметров: три компоненты вектора начального положения x, y, z ; три компоненты начальной скорости $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$; 18 параметров негравитационных ускорений A_1, A_2, A_3 ; величина смещения фотоцентра d_e и две компоненты мгновенного изменения скорости I_x, I_z . Для вычисления орбиты было использовано 1369 позиционных наблюдений (2738 условных уравнений, 126 из которых были исключены из улучшения по правилу «трех сигм»).

Построенная единая численная теория движения кометы Копфа позволила произвести ряд исследований: с достаточно большой точностью исследовать эволюцию негравитационного ускорения этой кометы на всем наблюдаемом интервале; сделать прогноз ее движения на последующие появления.

Результаты этих исследований приведены на рис. 1. Здесь серыми линиями показаны изменения параметров негравитационных ускорений A_1, A_2, A_3 от появления к появлению, полученные в численной теории движения. Пунктирными линиями отмечены границы области ошибок этих величин, а вертикальными пунктирными линиями – моменты сближения кометы с Юпитером в марте 1943 г., в марте 1954 г. и в январе 1966 г. Также на этом рис. 1 отмечен момент прохождения кометой перигелия в декабре 2002 г., на который делался прогноз величин параметров негравитационного ускорения.

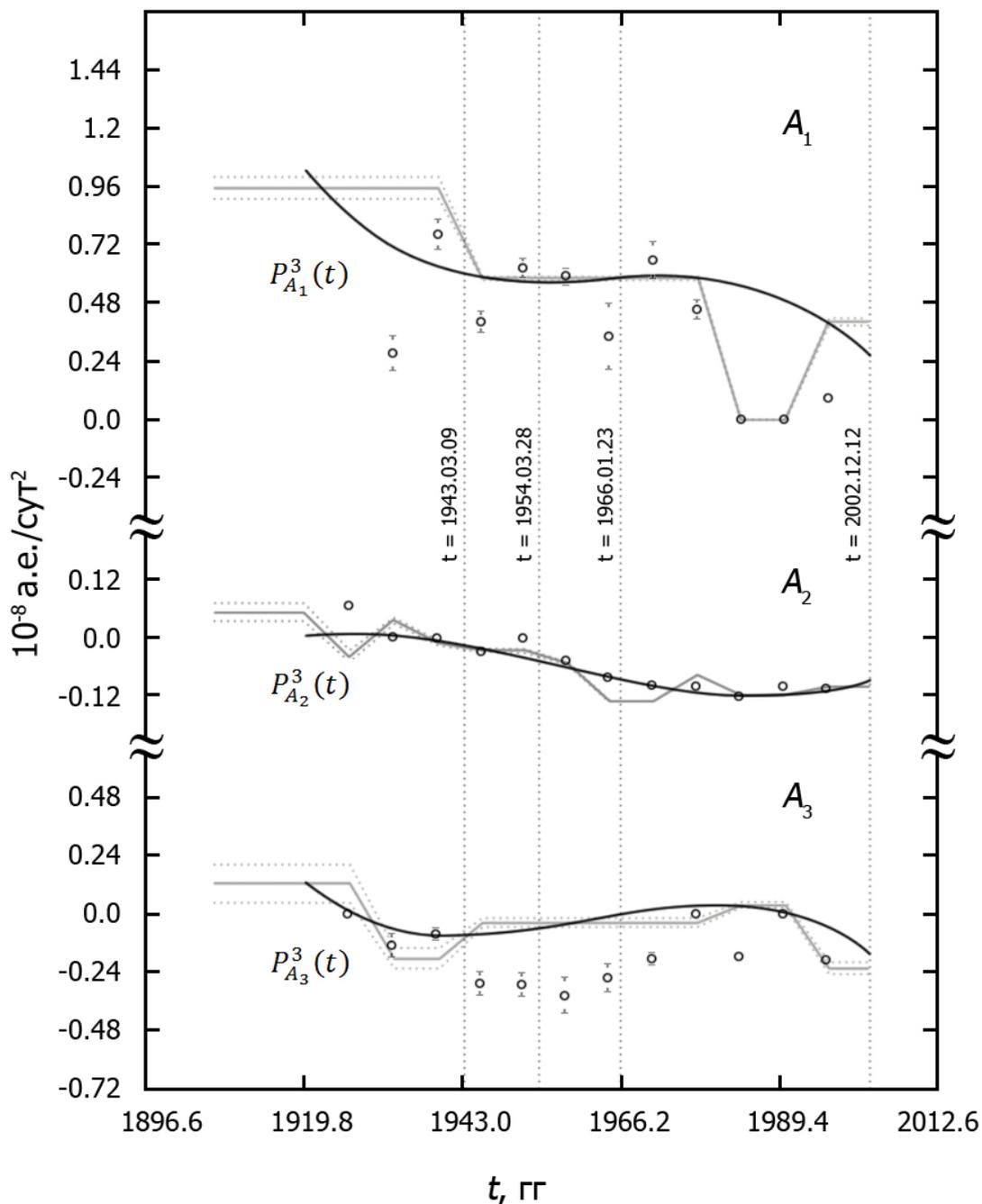


Рис. 1. Изменение компонент A_1, A_2, A_3 негравитационного ускорения в 10^{-8} а.е./сут² на интервале с 1906 по 2002 гг. (серые линии) и их ошибки (пунктирные линии), а также осредняющие многочлены $P_{A_i=1,3}^3$ (черные линии). Полыми точками отмечены значения негравитационных параметров и их ошибки, полученные по классической методике. Вертикальными пунктирными линиями отмечены моменты сближения с Юпитером в марте 1943 г., в марте 1954 г., в январе 1966 г. и момент прохождения кометы перигелия в декабре 2002 г., на который делался прогноз величин параметров негравитационного ускорения

На рис. 1 полыми точками отмечены значения негравитационных параметров и их ошибки, полученные по классической методике, объединением наблюдений трех идущих подряд появлений. По наблюдениям 12 интервалов: 1990–2002 гг.; 1983–1996 гг.; 1977–1990 гг.; 1970–1983 гг.; 1964–1977 гг.; 1958–1970 гг.; 1951–1964 гг.; 1945–1958 гг.; 1939–1951 гг.; 1932–

1945 гг.; 1926–1939 гг.; 1919–1932 гг. – улучшались координаты, компоненты скорости и три негравитационных параметра A_1, A_2, A_3 на эпоху, которая выбиралась вблизи перигелия центрального появления. Следует отметить, что в результате сближений кометы с Юпитером трансверсальная составляющая негравитационного ускорения A_2 изменила знак.

Для надежного определения величин компонент негравитационного ускорения в появлении 2002 г. необходимы наблюдения кометы в следующем появлении 2009 г., которые отсутствовали на момент построения численной теории. Как правило, при прогнозе движения комет берутся значения негравитационных параметров, полученные для последних наблюдаемых появлений. В нашем случае это: $A_1 = 0.404 \cdot 10^{-8}$ а.е./сут², $A_2 = -0.103 \cdot 10^{-8}$ а.е./сут² и $A_3 = -0.222 \cdot 10^{-8}$ а.е./сут², полученные для появлений 1996–2002 гг.

В данной работе изменение со временем негравитационного ускорения кометы Копфа аппроксимировалось осредняющими многочленами и по ним вычислялись значения негравитационных параметров в появлении 2002 г. Коэффициенты осредняющих многочленов находились методом наименьших квадратов. По этим многочленам на момент прохождения перигелия в появлении 2002 г. были получены следующие значения негравитационных параметров: $A_1 = 0.257 \cdot 10^{-8}$ а.е./сут², $A_2 = -0.089 \cdot 10^{-8}$ а.е./сут² и $A_3 = -0.165 \cdot 10^{-8}$ а.е./сут². На рис. 1 черными сплошными линиями приведены графики осредняющих многочленов $P_{A_{i=1,3}}^3(t)$ для каждой из компонент негравитационного ускорения.

Короткопериодическая комета Копфа была вновь обнаружена 30 января 2008 г. на Catalina Sky Survey в Аризоне и имела 20-ю видимую звездную величину. В циркуляре центра малых планет от 21 февраля 2008 г. (M.P.C. 61957) были опубликованы 9 астрометрических наблюдений (четыре наблюдения 30 января, три наблюдения 9 февраля и два наблюдения 10 февраля 2008 г.). Численная теория движения кометы Копфа, построенная в данной работе, с учетом изменения негравитационных параметров, полученных по осредняющим многочленам на момент прохождения перигелия в появлении 2002 г., с большой точностью представила данные девять наблюдений со средней ошибкой веса $\sigma_0 = 0''.51$.

После опубликования новых наблюдений появилась возможность более надежным образом определить компоненты негравитационного ускорения кометы Копфа, действующие в 2002 г., используя все имеющиеся наблюдения появления 2009 г. (1996 позиционных наблюдения). Для этого были объединены наблюдения трех появлений с 1996 по 2009 гг. и улучшены 9 параметров орбиты: координаты и компоненты скорости, а также коэффициенты радиальной A_1 , трансверсальной A_2 , нормальной A_3 компонент негравитационного ускорения на выбранную начальную эпоху 1 января 2003 г. (2452640.5 JD). Наблюдения выбранных появлений кометы были представлены этой орбитой со средней ошибкой веса $\sigma_0 = 1''.45$, а значения коэффициентов негравитационного ускорения A_1, A_2, A_3 и их ошибки приведены в табл. 1 в первой строке. Во второй строке приведены значения параметров A_1, A_2, A_3 , полученные на ту же эпоху по осредняющим многочленам, а в

третьей строке табл. 1 – параметры, полученные в численной теории для появлений 1996–2002 гг. Как видно из табл. 1, значения коэффициентов негравитационного ускорения, вычисленные с использованием новых наблюдений кометы в появлении 2009 г., более близки к значениям, предсказанным по предлагаемой в работе методике, чем соответствующие значения коэффициентов, представленные в третьей строке.

Таблица 1. Значения негравитационных параметров и их ошибки в 10^{-8} а.е./сут², полученные с учетом новых наблюдений 2009 г., по осредняющим многочленам и полученные в численной теории

$T_{\text{п}} \text{ г}$	A_1	A_2	A_3
2002.99	$0.08517 \pm 0.736 \cdot 10^{-2}$	$-0.08134 \pm 0.383 \cdot 10^{-3}$	$-0.10113 \pm 0.451 \cdot 10^{-2}$
2002.99	$0.25713 \pm 0.833 \cdot 10^{-3}$	$-0.08930 \pm 0.770 \cdot 10^{-4}$	$-0.16536 \pm 0.204 \cdot 10^{-2}$
2002.99	$0.40424 \pm 0.113 \cdot 10^{-1}$	$-0.10262 \pm 0.838 \cdot 10^{-3}$	$-0.22225 \pm 0.236 \cdot 10^{-1}$

Прогноз негравитационных ускорений по осредняющим многочленам, сделанный в работе, позволил более точно представить наблюдения этой кометы в появлении 2009 г. Весь имеющийся на настоящий момент ряд из 1996 позиционных наблюдений появления 2009 г., по построенной теории движения представляется с ошибкой $\sigma_0 = 39''.05$. Используя классический метод, идея которого сводится к объединению наблюдений трех последовательных появлений 1990, 1996 и 2002 гг. с одним набором негравитационных параметров была вычислена орбита. Ошибка представления этой орбитой первых девяти наблюдений появления 2009 г., не вошедших в улучшение, составила $\sigma_0 = 6''.33$, а всего ряда наблюдений 2009 г. $\sigma_0 = 46''.4$.

Используя модель вращающегося кометного ядра, предложенную Секаниной в 1981 г., по изменению негравитационных ускорений, полученных в данной работе, были определены значения параметров ориентации ядра кометы Копфа. В модели 3. Секанины негравитационные параметры A_1, A_2, A_3 в некоторой точке на орбите могут быть выражены как функция изменения угловых параметров η, I и ϕ вращающегося ядра:

$$A_{i=1,2,3}(t) = A \cdot C_{i=1,2,3}(\eta, I(t), v(t) + \phi(t)),$$

где $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}$; η – кометоцентрический угол теплового запаздывания между направлением на Солнце и точкой приложения суммарного вектора реактивного ускорения; I – наклон кометного экватора к плоскости орбиты; v – истинная аномалия кометы; ϕ – кометоцентрическая долгота Солнца в перигелии; $C_{i=1,3}$ – направляющие косинусы негравитационного ускорения, действующего на вращающееся кометное ядро. В работе предполагалось, что из-за прецессии оси вращения кометы углы I и ϕ изменяются со временем:

$$I = I_0 + \frac{dI}{dt}(t - t_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2}(t - t_0)^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 I}{dt^3}(t - t_0)^3;$$

$$\phi = \phi_0 + \frac{d\phi}{dt}(t - t_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2 \phi}{dt^2}(t - t_0)^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 \phi}{dt^3}(t - t_0)^3.$$

Используя данные о значениях негравитационных ускорениях в различных появлениях кометы, были получены значения угловых параметров ядра и их производные. Таким образом, изменение негравитационных ускорений было представлено 10 параметрами: $A, \eta, I_0, \frac{dI}{dt}, \frac{d^2I}{dt^2}, \frac{d^3I}{dt^3}, \Phi_0, \frac{d\Phi}{dt}, \frac{d^2\Phi}{dt^2}, \frac{d^3\Phi}{dt^3}$.

На момент прохождения перигелия в появлении 2002 г. были получены следующие значения наклона кометного экватора к плоскости орбиты $I = 116^\circ.87 \pm 0^\circ.1$ и кометоцентрической долготы Солнца в перигелии $\phi = 232^\circ.65 \pm 0^\circ.1$.

В *четвертой главе* используя предложенную методику построения долгосрочных численных теорий движения комет на интервале с 1967 по 2010 гг., получена численная теория движения кометы Темпель 1 – объекта исследования космической миссии Deep Impact. Были получены три варианта орбиты этой кометы с различными наборами параметров. В *первом варианте*, была построена численная теория движения кометы Темпель 1, предполагая, что на рассматриваемом интервале с 1967 по 2010 гг. негравитационные параметры не изменялись. В этом варианте улучшались 9 параметров орбиты: координаты и компоненты скорости, коэффициенты радиальной A_1 , трансверсальной A_2 и нормальной A_3 компонент негравитационного ускорения. Значения полученных параметров орбиты и их ошибки приводятся в первой колонке табл. 2, обозначенной как «1-й вариант». Наблюдения кометы Темпель 1 на интервале с 8 июня 1967 г. по 17 января 2010 г. представляются полученным набором элементов со средней ошибкой веса $\sigma_0 = 0''.538$.

Второй вариант решения представляет движение кометы Темпель 1 набором из 12 параметров. Предполагая, что столкновение с ударником могло вызвать изменение величин негравитационных параметров, к основному набору из 9 элементов, представлявших орбиту в первом варианте, были добавлены три компоненты негравитационного ускорения, отвечающие за изменение негравитационных ускорений в появлении 2005 г. Значения полученных параметров орбиты, объединяющих все наблюдения кометы со средней ошибкой веса $\sigma_0 = 0''.533$, и их ошибки приводятся в колонке «2-й вариант» табл. 2. Здесь необходимо отметить, что параметры A'_1, A'_2 и A'_3 являются поправками к радиальной A_1 , трансверсальной A_2 и нормальной A_3 компонентам негравитационного ускорения начиная с появления 2005 г. Значения компонент негравитационного ускорения после столкновения кометы с ударником составили: $A_1 = 0.00968 \cdot 10^{-8}$ а.е./сут²; $A_2 = 0.00017 \cdot 10^{-8}$ а.е./сут²; $A_3 = 0.06483 \cdot 10^{-8}$ а.е./сут².

В *третьем варианте* улучшались 12 параметров орбиты, включающие три компоненты вектора начального положения x, y, z , три компоненты начальной скорости $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$, три параметра негравитационного ускорения A_1, A_2, A_3 , а также три компоненты мгновенного изменения скорости I_x, I_y, I_z , представляющие изменение орбиты в результате столкновения с ударником 4 июля 2005 г. (2453555.73932 JD). Значения координат, компонент скоростей, компонент негравитационного ускорения и мгновенного изменения скорости приводятся в колонке «3-й вариант» табл. 2. Полученная система

параметров орбиты представляет наблюдения со среднеквадратической ошибкой $\sigma_0 = 0''.536$.

Таблица 2. Параметры трех вариантов орбиты кометы Темпель1: компоненты положения x, y, z в а.е.; скорости $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ в а.е./сут; негравитационные параметры A_1, A_2, A_3 и A'_1, A'_2, A'_3 в 10^{-8} а.е./сут²; компоненты мгновенного изменения скорости I_x, I_y, I_z в а.е./сут и их ошибки на эпоху 17 января 2000 г.

	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
x	$-0.333298759 \pm 0.177 \cdot 10^{-6}$	$-0.333298997 \pm 0.197 \cdot 10^{-6}$	$-0.333298774 \pm 0.179 \cdot 10^{-6}$
y	$-1.331971227 \pm 0.573 \cdot 10^{-7}$	$-1.331970511 \pm 0.815 \cdot 10^{-7}$	$-1.331971226 \pm 0.592 \cdot 10^{-7}$
z	$-0.621333438 \pm 0.609 \cdot 10^{-7}$	$-0.621334923 \pm 0.118 \cdot 10^{-6}$	$-0.621333553 \pm 0.630 \cdot 10^{-7}$
\dot{x}	$0.016327762 \pm 0.851 \cdot 10^{-9}$	$0.016327760 \pm 0.958 \cdot 10^{-9}$	$0.016327761 \pm 0.887 \cdot 10^{-9}$
\dot{y}	$-0.002985434 \pm 0.105 \cdot 10^{-8}$	$-0.002985432 \pm 0.118 \cdot 10^{-8}$	$-0.002985435 \pm 0.109 \cdot 10^{-8}$
\dot{z}	$-0.004721444 \pm 0.797 \cdot 10^{-9}$	$-0.004721449 \pm 0.881 \cdot 10^{-9}$	$-0.004721446 \pm 0.820 \cdot 10^{-9}$
A_1	$0.01580 \pm 0.121 \cdot 10^{-2}$	$0.01993 \pm 0.128 \cdot 10^{-2}$	$0.01938 \pm 0.133 \cdot 10^{-2}$
A_2	$0.00167 \pm 0.404 \cdot 10^{-5}$	$0.00168 \pm 0.409 \cdot 10^{-5}$	$0.00168 \pm 0.407 \cdot 10^{-5}$
A_3	$-0.01418 \pm 0.803 \cdot 10^{-3}$	$-0.01293 \pm 0.801 \cdot 10^{-3}$	$-0.01434 \pm 0.817 \cdot 10^{-3}$
A'_1		$-0.01026 \pm 0.453 \cdot 10^{-2}$	
A'_2		$-0.00151 \pm 0.319 \cdot 10^{-3}$	
A'_3		$0.07776 \pm 0.540 \cdot 10^{-2}$	
I_x			$0.6921 \cdot 10^{-8} \pm 0.141 \cdot 10^{-8}$
I_y			$-0.4992 \cdot 10^{-8} \pm 0.296 \cdot 10^{-8}$
I_z			$2.6988 \cdot 10^{-8} \pm 0.367 \cdot 10^{-8}$

Для сопоставления негравитационных моделей было получено соотношение, описывающее связь между величинами поправок A'_1, A'_2, A'_3 к компонентам негравитационного ускорения, полученными во втором варианте орбиты, и компонентами мгновенного изменения скорости в третьем варианте:

$$\Delta \bar{V} \approx \int_{t_n}^{t_k} g(r(t)) (A'_1 \bar{t}_r(t) + A'_2 \bar{t}_t(t) + A'_3 \bar{t}_n(t)) dt, \quad (1)$$

где $g(r(t))$ – скорость испарения кометного вещества в зависимости от гелиоцентрического расстояния $r(t)$ на момент t ; $\bar{t}_r(t), \bar{t}_t(t)$ и $\bar{t}_n(t)$ – направляющие косинусы радиальной, трансверсальной и нормальной компонент негравитационного ускорения соответственно на момент t ; t_n, t_k – начало и конец интервала, на котором действует ускорение (в данном случае с 4 июля 2005 г. по 17 января 2010 г.). Здесь следует отметить, что в выражении (1) величина $\Delta \bar{V}$ не строго равна интегралу, стоящему справа, поскольку в данном равенстве не учитываются дифференциальные отклонения одной орбиты относительно другой.

По формуле (1) интегрированием уравнений движения на интервале с 4 июля 2005 г. по 17 января 2010 г. была произведена оценка $\Delta \bar{V}$. Полученные значения компонент $\Delta \bar{V}$ и соответствующие компоненты мгновенного изменения скорости \bar{I} из третьего варианта представлены в табл. 3.

Таблица 3. x , y и z составляющие $\Delta\bar{V}$ и \bar{I} в а.е./сут

	x	y	z
\bar{I}	$0.6921 \cdot 10^{-8} \pm 0.141 \cdot 10^{-8}$	$-0.4992 \cdot 10^{-8} \pm 0.296 \cdot 10^{-8}$	$2.6988 \cdot 10^{-8} \pm 0.367 \cdot 10^{-8}$
$\Delta\bar{V}$	$0.9167 \cdot 10^{-8}$	$-0.3950 \cdot 10^{-8}$	$3.3972 \cdot 10^{-8}$

Как видно из табл. 3, полученные значения компонент $\Delta\bar{V}$ близки к соответствующим значениям компоненты мгновенного изменения скорости I , т.е. две различные модели движения дают примерно одинаковые значения для приращения скорости кометы Темпель 1 в результате ее столкновения с ударником, что говорит о достаточно надежном определении этой величины.

Используя результаты космической миссии Deep Impact можно оценить возмущение, оказанное на комету Темпель 1 в результате столкновения. Это возмущение будет складываться из двух составляющих. Первое представляет собой импульс, сообщенный ядру кометы массивным ударником. Второе можно представить как реактивную силу, действующую на ядро кометы, вследствие выброса кометного вещества из образовавшегося на поверхности кратера.

Столкновение кометы Темпель 1 с ударником произошло в близперигелийной области с относительной скоростью $|\Delta\bar{v}_{imp}| = 10.3$ км/с. Если масса кометы равна $M = 7.5 \cdot 10^{13}$ кг, а масса ударника $m_{imp} = 370$ кг, тогда приращение скорости $\Delta\bar{V}_{imp}$, которое ударник сообщит комете, вычисляется из выражения, описывающего закон сохранения импульса:

$$M\bar{V} + m_{imp}(\bar{V} + \Delta\bar{v}_{imp}) = (M + m_{imp})(\bar{V} + \Delta\bar{V}_{imp}), \quad (2)$$

где \bar{V} – скорость кометы. Оценки, полученные по формуле (2) показывают, что максимальное приращение скорости, которое может сообщить ударник комете $|\Delta\bar{V}_{imp}| = 5.1 \cdot 10^{-8}$ м/с.

По оценкам Р. Виллингейла выброс кометой $4.1 \cdot 10^8$ кг вещества происходил в течение 12 сут, т.е. через 12 сут после столкновения общая производительность кометой вещества практически сравнялась с общей производительностью до столкновения. В предположении, что выброс кометного вещества происходил мгновенно, приращение скорости кометы можно вычислить по формуле

$$(M + m_{jet})\bar{V} = M(\bar{V} + \Delta\bar{V}_{jet}) + m_{jet}(\bar{V} + \Delta\bar{v}_{jet}). \quad (3)$$

Подставляя в выражение (3) массу выброшенного вещества $m_{jet} = 4.1 \cdot 10^8$ кг и среднюю скорость истечения $|\Delta\bar{v}_{jet}| = 200$ м/с, получим оценку максимального приращения скорости $|\Delta\bar{V}_{jet}| = 1.1 \cdot 10^{-3}$ м/с. Данная оценка позволяет определить значение средней величины ускорения, которое действовало на комету в результате выброса вещества, которое составило $|\overline{Jet}| = 1.1 \cdot 10^{-9}$ м/с². Это значение может быть сопоставлено с вычисленной величиной негравитационного ускорения после столкновения кометы с ударником. Модуль вектора негравитационного ускорения, полученный во втором варианте, на момент прохождения кометой перигелия равен $|\bar{A}| = 4.7 \cdot 10^{-9}$ м/с². Таким образом, максимальное значение ускорения, приобретенного кометой в результате вы-

броса вещества, оказалось примерно в пять раз меньше величины негравитационного ускорения.

Приращение модуля скорости, полученное по третьей модели на момент столкновения кометы с ударником $t_1 = 4$ июля 2005 г., составляет $|\bar{I}(t_1)| = 4.9 \cdot 10^{-2}$ м/с, что значительно больше приращения скорости кометы вследствие выброса кометного вещества $|\Delta \bar{V}_{jet}|$ и тем более импульсного воздействия ударника $|\Delta \bar{V}_{imp}|$, что позволяет сделать вывод о наличии других факторов, повлиявших на движение кометы.

В *пятой главе* рассмотрена несимметричная модель действия негравитационных ускорений относительно перигелия. Среди всех известных на сегодняшний день 232 короткопериодических комет было отобрано 20, имеющих статистически значимые величины смещений максимумов кривых блеска относительно перигелия. Предполагалось, что мерой газопродуктивности является интегральный блеск кометы. Величины значений интервалов времени, на которые происходит смещение максимумов газовой продуктивности относительно перигелия, для этих комет были определены двумя способами: 1) фотометрическим Δt_{ph} , из смещения максимума блеска кометы; 2) динамическим Δt_d , когда значение величины максимума газопродуктивности предполагается совпадающим с максимумом величины негравитационного ускорения, значение которого находится из улучшения орбиты кометы вместе с другими параметрами орбиты.

Для сравнения значений Δt_d со значениями Δt_{ph} было вычислено отношение этих величин $\tau = \Delta t_d / \Delta t_{ph} - 1$, которое в случае близости значений смещений, вычисленных динамическим и фотометрическим способами, должно быть близко к нулю. На рис. 2 точками приводятся значения этих отношений, а горизонтальными линиями – утроенные значения их ошибок σ_τ . Черным цветом выделены случаи, когда значения Δt_d и Δt_{ph} могут быть равны в пределах ошибки. Серым цветом отмечены случаи, когда величины смещений, вычисленные различными способами, статистически значимо отличаются. Данные, приведенные на рисунке, показывают, что для 12 комет величины смещений, определенных этими двумя способами, совпадают в пределах ошибок. Наибольшие статистически значимые отклонения между величинами смещений имеют место для комет: Энке, Темпель 1, Темпель 2, Джакобини-Циннер, Рейнмут 2 и Кларк. Для этих комет значения величин смещений не только разнятся по абсолютной величине, но имеют разные знаки. Так, например, для кометы Темпель 1 момент максимума негравитационного ускорения приходится на доперигелийный момент ($\Delta t_d = 100.89$ сут), а величина смещения максимума кривой блеска Δt_{ph} показывает, что максимум газопродуктивности приходится на 40 сут после момента прохождения перигелия. С относительно небольшими ошибками, но имеющие заметные отклонения друг относительно друга, получены смещения для комет Гунн и Хартли 2.

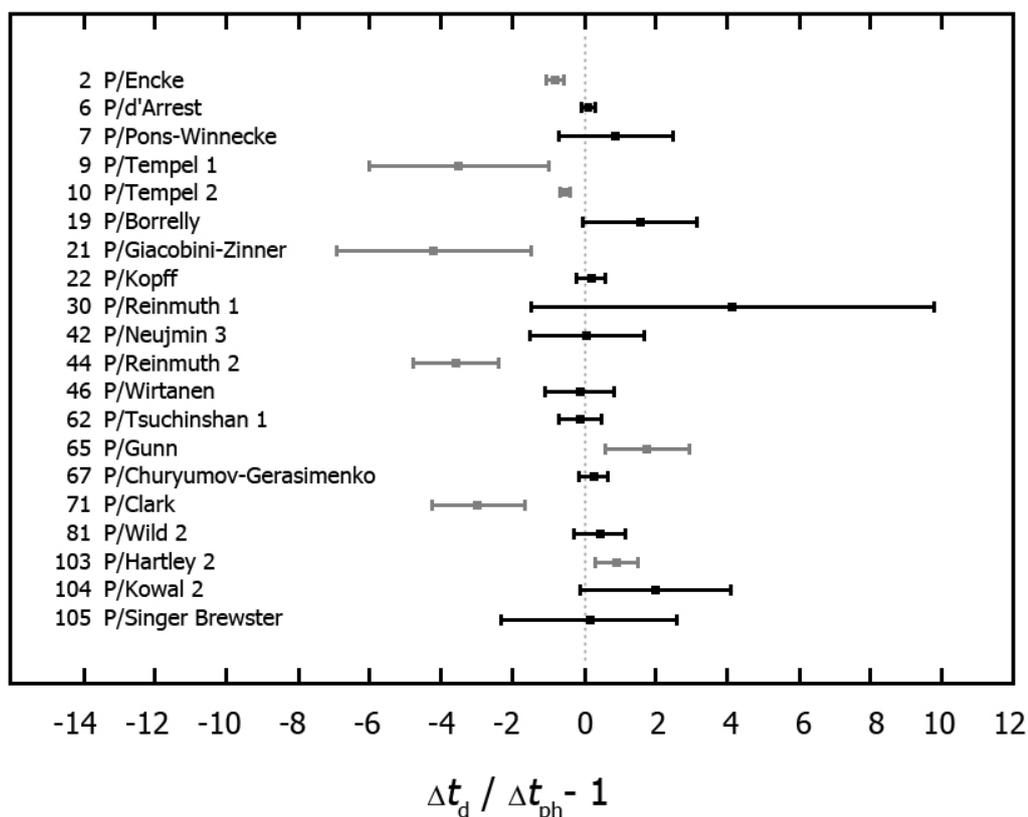


Рис. 2. Отношение значений величин смещений, полученных динамическим и фотометрическим методами, и их ошибки для 20 короткопериодических комет

Полученные результаты показывают, что далеко не для всех комет кривая блеска отражает изменение их газопроизводительностей.

В *шестой главе* описывается созданный электронный каталог кометных орбит «Галлей». Он представляет собой программу управления и работы с обновляемой базой данных комет (БДК), содержащей информацию об элементах комет. Являясь основой каталога, БДК содержит не только элементы орбит уже существующих каталогов комет, но и элементы орбит короткопериодических комет, вычисленные по предложенной в настоящей работе методике. Кроме кеплеровских элементов орбиты любая запись БДК может включать информацию о дополнительных параметрах движения, физических характеристиках кометы, ее наблюдавшихся появлениях и другие сведения. В число задач, выполняемых электронным каталогом, помимо управления базой данных включено исследование эволюции орбит комет и их визуализация (рис. 3), определение обстоятельств сближений комет с большими планетами на заданном интервале, а также ряд других вспомогательных действий. Каталог предназначен для использования на персональном компьютере под управлением операционных систем: Microsoft Windows 98, Windows XP и Windows Vista.

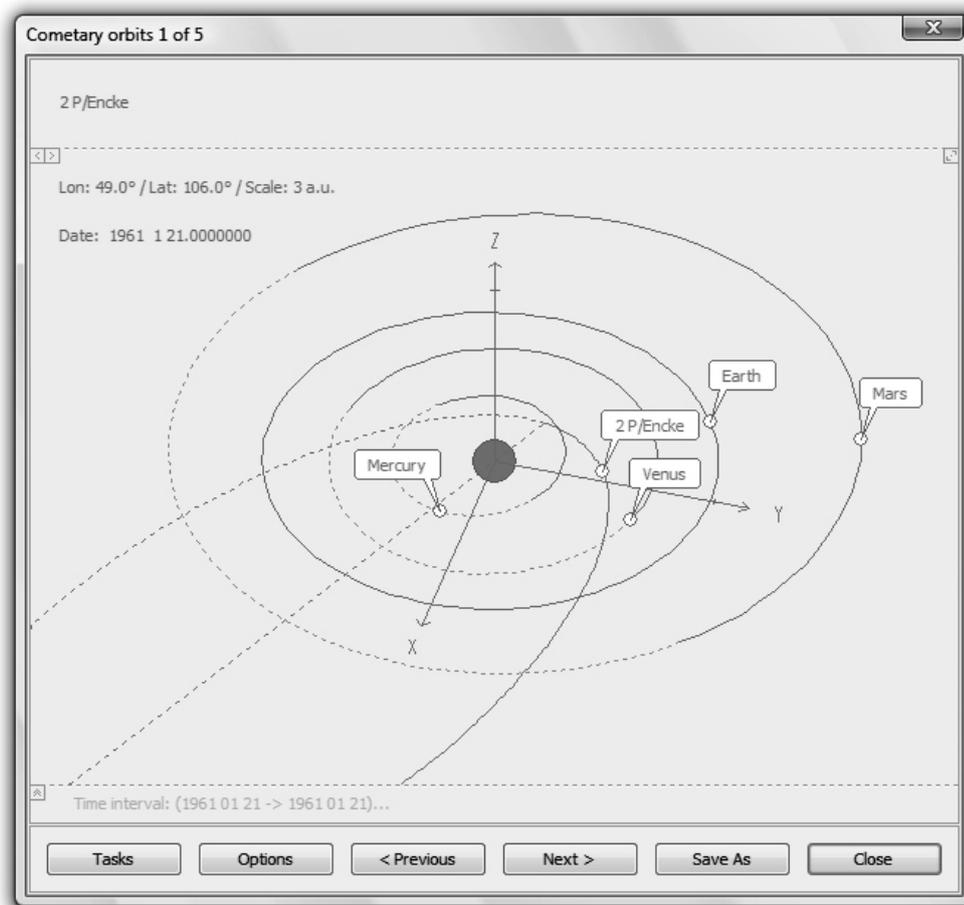


Рис. 3. Пример визуализации орбит электронного каталога «Галлей»

Созданный для применения в среде Microsoft Windows электронный каталог обладает графическим интерфейсом (рис. 4), упрощающим взаимодействие пользователя с программой. Каталог реализован в виде многооконного диалогового Windows-приложения, специально разработанного автором диссертации для наиболее удобной и эффективной работы.

Основное программное ядро электронного каталога кометных орбит «Галлей», реализованное на языке Fortran, позволяет с повышенной точностью производить интегрирование уравнений движения малых планет и комет. В уравнениях движения учитываются гравитационные возмущения от всех больших планет и Плутона. Осуществлена возможность вычислять координаты возмущающих планет по численным эфемеридам DE405 (на интервале с 9 декабря 1599 г. по 20 февраля 2201 г.), DE406 (на интервале с 23 февраля –3000 г. по 6 мая 3000 г.), вычисленные в Лаборатории реактивного движения, а также по численной эфемериде EPM 2008 (на интервале с 29 декабря 1799 г. по 2 января 2200 г.), разработанной в ИПА РАН. Модель движения также включает релятивистские возмущения от Солнца. Учет возмущений от Земли и Луны выполняется раздельно. Негравитационные ускорения учитываются по модели Марседена с возможностью учета величины смещения максимума газопродуктивности относительно перигелия. Численное интегрирование уравнений движения выполняется методом Эверхарта 11-го порядка с постоянным или автоматическим выбором шага

интегрирования. Увеличение точности достигается путем применения модифицированного метода Энке численного интегрирования уравнений движения. Модификация метода Энке состоит в том, что смена оскуляции происходит на каждом шаге интегрирования. При этом параметры невозмущенного движения вычисляются с учетверенной точностью (32 десятичных знака).

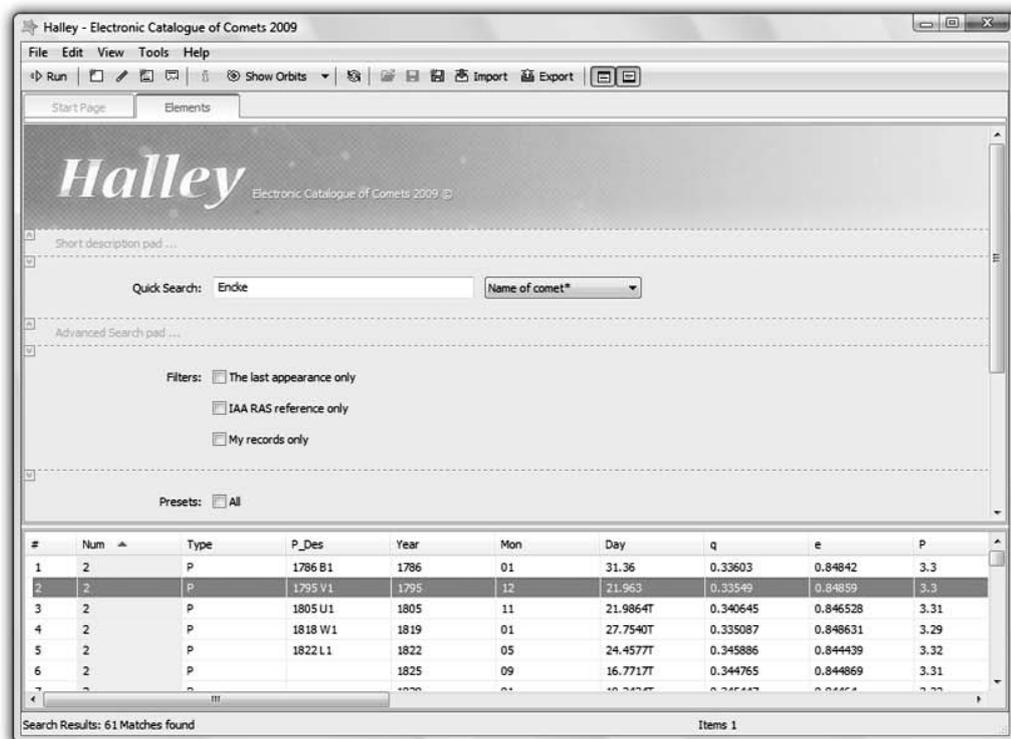


Рис. 4. Раздел управления и работы с элементами электронного каталога «Галлей»

Управление базой данных осуществляется при помощи библиотеки SQLite, реализованной на языке C++. Трансляция исходного кода производилась совместно компиляторами Intel Visual Fortran Compiler и Intel Visual C++ Compiler с использованием функций Win32 API, отвечающих за создание графического интерфейса в среде Microsoft Windows.

Электронный каталог кометных орбит «Галлей» содержит обновляемую базу данных элементов комет. Обновление базы данных, хранящейся на сервере ИПА РАН, является основой поддержки каталога. Подготовка новых элементов комет, наблюдавшихся в текущем месяце, производится в ИПА РАН при помощи специально разработанного автором диссертации программного обеспечения. Также к поддержке относится обновление самого каталога, т.е. исправление найденных в процессе использования ошибок системы, добавление новых разделов и функциональных возможностей.

В *заключении* изложены основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в статьях:

1. Бондаренко Ю. С. Комплекс программ для улучшения орбит комет // Материалы международной конференции «Околоземная астрономия 2007». – Нальчик, 2008. – С. 159–161.
2. Бондаренко Ю. С. Электронный каталог кометных орбит «Галлей» // Труды Института прикладной астрономии РАН. – СПб., 2009. – Вып. 19. – С. 57–67.
3. Shor V. A., Skripnichenko V. I. et al. Package «AMPLE For Comets» // Communications of the IAA RAS (Supplement). – 2009. – № 182. – P. 59–60.
4. Бондаренко Ю. С., Медведев Ю. Д. Долгосрочные численные теории движения комет // *Астрономический Вестник*. – М. 2010. – Т. 44. – № 2. – С. 158–166.
5. Бондаренко Ю. С. Изменение движения кометы Темпель 1 вследствие столкновения с ударником космической миссии Deep Impact // *Сообщение ИПА РАН*. – СПб., 2010. – № 184 – 24 с.

Результаты работы отражены также в следующих тезисах конференций:

1. Бондаренко Ю. С., Медведев Ю. Д. Долгосрочные численные теории движения комет // Тезисы международной конференции «100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее». – 2008. – С. 102.
2. Bondarenko Yu. S., Medvedev Yu. D. Method of calculation of cometary orbits // International conference «Asteroid-Comet Hazard 2009», Book of Abstracts. – St. Petersburg, 2009. – P. 78–81.
3. Bondarenko Yu. S. Electronic Catalogue of Comets 2009 «Halley» // International conference «Asteroid-Comet Hazard 2009», Book of Abstracts. – St. Petersburg, 2009. – P. 95–96.

Подписано в печать 10.05.2010	Формат 60 x 84 ¹ / ₁₆	Офсетная печать	Печ. л. 1.0
Уч.-изд.л. 1.0	Тираж 120	Заказ 225а	бесплатно

Отпечатано в типографии ЗАО «Полиграфическое предприятие» № 3
(191104, Санкт-Петербург, Литейный пр., д. 55.)

Институт прикладной астрономии РАН, 191187, С.-Петербург, наб. Кутузова, 10