

0- 798138

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Усанин Владимир Сергеевич

ДОЛГОСРОЧНЫЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ КОМЕТЫ ЭНКЕ

Специальность 01.03.01 – астрометрия и небесная механика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Казанском (Приволжском) федеральном университете.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент

Соколова Марина Геннадьевна.

Официальные оппоненты:

Чернетенко Юлия Андреевна

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,

Институт прикладной астрономии РАН, ведущий научный сотрудник;

Поляхова Елена Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,

Санкт-Петербургский государственный университет, доцент.

Ведущая организация:

Институт астрономии РАН.

Защита диссертации состоится 4 декабря 2012 г. в 17 ч. 00 м. на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, ауд. 2143 (Математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ

Автореферат разослан 29 октября 2012 г.



0000785586

Учёный секретарь

диссертационного совета

Орлов Виктор Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации.

Современный синтез знаний в области астрономии, геологии и палеонтологии привёл к осознанию обществом проблемы астероидно-кометной опасности. Прямое отношение к этой проблеме имеет комета Энке, которая в текущую эпоху сближается с Землёй до расстояния 0,19 а.е. Поскольку её перигелий находится внутри орбиты Земли, в соответствии с общими законами небесной механики вращение линии апсид может через некоторое время привести к пересечению орбит кометы и Земли.

Более того, и сейчас земной атмосферы достигают метеороиды, отделившиеся от кометы Энке. Ещё в 1940 году Ф.Л.Уиппл установил, что известный с XIX века поток ноябрьских Таурид связан с кометой Энке. Затем С.Хамид вычислил радиант кометы вблизи другого узла, который оказался тождественен с открытым незадолго до этого по радарным наблюдениям летним дневным потоком β -Тауриды. В дальнейшем связь кометы Энке и Таурид стала одним из основных доказательств знаменитой модели Уиппла кометного ядра как ледяного конгломерата. В конце XX века сразу несколько исследователей, применяя независимые методы, пришли к выводу, что Тауриды являются лишь частью обширного комплекса малых тел Солнечной системы, включающего также другие известные метеорные потоки, кометы и астероиды. Приблизительно в это же время несколько групп наблюдателей независимо обнаружили, что пылевой шлейф кометы Энке может наблюдаться не только в форме метеоров в атмосфере Земли, но и непосредственно как светящаяся дуга на орбите вблизи кометы. Это указывает на весьма высокую плотность метеорного вещества в шлейфе. Некоторые учёные считают, что комплекс Таурид уже оказывал катастрофические воздействия на Землю. Так, Д.Д.Ашер, У.М.Нейпир и др. связывают с астероидами этого комплекса изменения климата на рубеже плейстоцена и голоцена и верхнепалеолитические вымирания. Широкое распространение получила точка зрения И.Т.Зоткина и Л.Кресака о том, что Тунгусский метеорит принадлежал потоку β -Таурид.

Исследование движения кометы Энке практически важно ещё и потому, что

она многократно рассматривалась американскими и российскими исследователями как возможная цель космической миссии. В 2002 году к комете Энке был запущен космический аппарат «CONTOUR», однако при попытке ухода с околоземной орбиты он разрушился.

В настоящее время построены точные теории движения больших планет, подчиняющихся практически только гравитационным силам, и астероидов, в движении которых заметен также эффект Яковско-Радзиевского. С хорошей точностью может быть исследовано движение метеороидов, на которые, помимо гравитации, воздействует абберационный эффект Пойнтинга-Робертсона. В то же время реактивные негравитационные эффекты в движении комет пока учитываются неполно, так как не определяются только механическими параметрами, но зависят также и от изменяющихся физических характеристик их ядер. Так, в сервисе JPL NASA «HORIZONS» [1] точность орбиты кометы Энке поддерживается разбиением на отрезки по 3–5 появлений. Если же проинтегрировать с помощью этого сервиса орбиту, полученную по современным наблюдениям, до открытия кометы в 1786 году, различие между наблюденным моментом прохождения перигелия и вычисленным составит 58,2 суток. При интегрировании же орбиты 1786 года до настоящего времени, ошибка достигает огромной величины 264 суток. Для орбиты 1898 года отклонения в 1786 и 2010 годах составляют соответственно 49,3 и 18,5 суток. Это на три порядка превышает расхождения, которые могут возникнуть вследствие ошибок определения периода обращения кометы, даваемых NASA. Таковы же результаты применения других подобных сервисов.

Нужно отметить, что в теориях NASA для учёта негравитационных эффектов уже используется модель Марсдена [2]. Даже с применением гипотезы Марсдена об экспоненциальном уменьшении негравитационных параметров точность аппроксимации их наблюдаемого изменения у кометы Энке многократно ниже, чем в моделях, построенных в настоящей работе, поэтому попытки построения долгосрочных численных теорий по модели Марсдена не имеют смысла. Очевидно, она нуждается в улучшении. В настоящее время наиболее глубоко проработаны модели, в которых изменение кометных негравитационных параметров объясняется



пятнистостью ядра и прецессией оси его вращения. Эти модели были предложены З.Секаниной [3, 4] и адаптированы для практического применения С.Шутович [5, 6]. Однако в них не учитываются уменьшение массы и площади поверхности ядра кометы, неизбежно сопровождающие действие реактивной силы. То есть модели не являются самосогласованными. Кроме того, С.Шутович сообщила [7], что не пыталась применять к комете Энке прецессионную модель, а в модели пятнистого ядра удаётся объединить только 3 появления (как и в обычной модели Марседена).

Помимо обозначенных выше практических проблем, отсутствие единой теории движения кометы Энке не позволяет решить и ряд теоретических вопросов. Ещё А.Д.Дубяго и Е.И.Казимирчак-Полонская сформулировали две важные комплексные задачи кометной астрономии, которые должны были быть решены с развитием вычислительной техники. Это, соответственно, исследование связи особенностей движений комет с их происхождением, развитием, распадом и физической структурой, а также разработка методики для построения численных теорий движения каждой из короткопериодических комет, объединяющих без разрывов все их появления на протяжении многих десятилетий и веков. Отсутствие единой теории движения кометы Энке не позволяет считать решёнными обе эти задачи. Также без теории, допускающей непрерывную интерполяцию и уверенную экстраполяцию, невозможно выяснить следующее. Когда и как комета Энке оказалась на современной орбите, не сближающейся с Юпитером? Когда и как образовался комплекс Таурид? Почему не удаётся отождествить комету в древних китайских летописях? Какой вклад в возмущения её орбиты вносят гравитационные и негравитационные силы в отдельности? Каков будет характер движения кометы Энке в следующие несколько столетий?

Цели и задачи диссертационной работы.

Основной целью диссертации является разработка и проверка применимости нескольких модификаций метода Марседена для построения долгосрочных моделей движения комет, имеющих большое число появлений, на примере кометы Энке.

Для реализации цели настоящей работы решались следующие задачи:
– разработка модификаций модели негравитационного ускорения Марседена с

учётом угасания активности комет;

- их предварительная проверка на кометах Энке и Брукса 2;
- создание комплекса программ для дифференциального исправления параметров движения комет и исследования их эволюции;
- построение долгосрочных численных моделей движения кометы Энке и сравнение их с другими известными моделями.

Научная новизна работы.

В работе предложена новая методика построения численных моделей движения комет, вековое изменение негравитационных ускорений которых обусловлено угасанием, позволяющая объединить большое число появлений единым набором параметров. Показано, что характер изменения негравитационных параметров комет Энке и Брукса 2 на длительных промежутках времени не противоречит предположению о его обусловленности угасанием.

Построены долгосрочные численные модели движения кометы Энке, произведён анализ эволюции их параметров со временем. В частности, получены значения параметров Марсдена и дополнительных негравитационных параметров, связанных с физическими характеристиками ядра кометы.

В рамках построенных моделей произведена оценка гравитационных и негравитационных возмущений в движении кометы Энке за весь период её наблюдений, и показано, что в элементах ориентации орбиты преобладают гравитационные возмущения, а в остальных элементах негравитационные и гравитационные возмущения близки по величине. Рассмотрены вопросы о динамической истории кометы, возможности отождествления самой кометы в летописях и связанных с ней метеорных потоков в наблюдательных данных. Сделан прогноз дальнейшего изменения негравитационных параметров и найдено, что он согласуется с прежними оценками, сделанными как по динамическим, так и по фотометрическим данным.

Рассмотрены некоторые другие модели изменения негравитационных параметров комет. Показано, что разработанная в диссертации модель, в которой это изменение объясняется угасанием кометы, содержащей значительную нелетучую

массу, обладает наилучшей среди них сходимостью при дифференциальном исправлении по астрометрическим наблюдениям кометы Энке. Отмечена необходимость проверки применимости к комете Энке прецессионной модели Шутович.

Практическая значимость работы.

Создан комплекс программ, обладающий широким спектром вычислительных возможностей и, в частности, позволяющий производить дифференциальное исправление параметров движения комет, вековое изменение негравитационных ускорений которых обусловлено угасанием.

Достоверность результатов диссертации.

Достоверность результатов работы подтверждается, в первую очередь, согласием следствий из них с известными результатами небесномеханических и астрофизических исследований других авторов. Работа основана на широко известных и признанных достоверными научных методах и процедурах. Во избежание вычислительных ошибок, при отладке программ использовались контрольные соотношения, проводилось сравнение вычисленных промежуточных величин с опубликованными данными. Проведено сравнение величин, полученных из наблюдений, с вычисленными согласно построенным в работе моделям, оценены среднеквадратические ошибки. Основные результаты диссертации были опубликованы и неоднократно обсуждались на научных конференциях и семинарах.

Результаты, выносимые на защиту.

1. Новая методика построения долгосрочных численных моделей движения комет, вековое изменение негравитационных ускорений которых обусловлено угасанием.

2. Комплекс программ, позволяющий, в частности, производить дифференциальное исправление параметров движения комет, вековое изменение негравитационных ускорений которых обусловлено угасанием.

3. Долгосрочные численные модели движения кометы Энке.

4. Величины параметров Марсдена и дополнительных негравитационных параметров, связанных с физическими характеристиками ядра кометы Энке; прогноз

дальнейшего изменения негравитационных параметров, согласующийся с результатами динамических и фотометрических исследований других авторов.

5. Оценка гравитационных и негравитационных возмущений в движении кометы Энке за весь период её наблюдений.

Апробация работы.

Непосредственно автором сделаны доклады по теме диссертации на:

- Международной конференции «European Week of Astronomy and Space Science JENAM-2011», Санкт-Петербург, 7–8 июля 2011 года;
- VIII Конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 14–15 апреля 2011 года;
- Всероссийской астрономической конференции ВАК-2010 «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз, 12–19 сентября 2010 года;
- Международной конференции «Asteroid-Comet Hazard-2009», Санкт-Петербург, 21–25 сентября 2009 года;
- Международной конференции «Окозземная астрономия-2009», Казань, 22–26 августа 2009 года;
- II и III Международных студенческо-аспирантских форумах «Наука, образование и предпринимательство: информационные технологии, инновации», Казань, 12 февраля 2009 года и 19 мая 2010 года;
- Итоговой научно-образовательной конференции студентов Казанского государственного университета 2008 года, Казань, 16 мая 2008 года;
- семинаре Института прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 20 июня 2012 года;
- семинаре кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, 6 октября 2011 года;
- семинаре Института астрономии РАН, Москва, 13 апреля 2011 года;
- итоговых научных конференциях и семинарах кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета, Казань, 2008–2011 годы.

Стендовые доклады автора по теме диссертации были представлены на:

- Научной конференции «Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы», Москва, 28 мая – 1 июня 2012 года;
- 38 и 39-й Международных студенческих научных конференциях «Физика космоса», Екатеринбург, 2–6 февраля 2009 года и 1–5 февраля 2010 года;
- Шестнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных «ВНКСФ-16», Волгоград, 22–29 апреля 2010 года.

Публикации по теме диссертации.

По теме диссертации опубликованы 23 печатные работы [1*–23*], в том числе 5 статей [1*–5*] в журналах из Перечня ведущих периодических изданий Высшей аттестационной комиссии. 14 работ [1*, 7*–9*, 11*–15*, 17*, 19*, 20*, 22*, 23*] написаны автором лично (в сборниках студенческих и аспирантских работ, где опубликованы [8*, 9*, 13*, 14*, 19*, 22*, 23*] указываются также научные руководители, не являющиеся соавторами). 9 публикаций выполнены в соавторстве. Автор принимал участие во всех этапах работ [6*, 16*], в разработке методики и обсуждении результатов исследований [2*–5*, 10*, 18*, 21*], разработке программ для работ [5*, 18*], оформлении публикаций [2*, 3*, 5*, 18*, 21*].

1*. Усанин В.С. Изменение негравитационных параметров кометы Энке как следствие её угасания // Учёные записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2011. – Т. 153, Кн. 1. – С. 109–130.

2*. Жуков Г.В., Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д., Усанин В.С. Исчезнувший метеорный рой созвездия Ворона // Учёные записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2011. – Т. 153, Кн. 2. – С. 141–149.

3*. Жуков Г.В., Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д., Усанин В.С. Комета Борели и методы отождествления метеорных роёв // Учёные записки Казанского государственного университета. Серия Физико-математические науки. – 2010. – Т. 152, Кн. 1. – С. 15–22.

4*. Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д., Усанин В.С. Анализ верхнего предела D -критерия Саутворта-Хокинса для метеороидных потоков Понс-Виннекид и Персеид // Астрономический вестник. – 2009. – Т. 43, № 5. – С. 453–458.

5*. Жуков Г.В., Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д., Усанин В.С. Загадки кометы Холмса (1892 III): 1. Открытие // Георесурсы.– 2009. – № 1 (29). – С. 23–25.

6*. Ishmukhametova M.G., Kondrat'eva E.D., Usanin V.S. Variation of Nongravitational Parameters for Comet Encke as a Result of its Decay // Protecting the Earth against collisions with asteroids and comet nuclei. Proceedings of the International Conference "Asteroid-Comet Hazard-2009" (Finkelstein A., Huebner W., Shor V., eds.) – Saint Petersburg, Nauka. – 2010. – P. 139–145.

7*. Усанин В.С. Изменение негравитационных параметров кометы Энке как следствие её угасания // Околосемная астрономия 2009. Сборник трудов конференции. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 209–215.

8*. Усанин В.С. (Научные руководители: Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д.) Теоретические радианты новых периодических комет // Наука, образование и предпринимательство: информационные технологии, инновации. Материалы III международного аспирантско-студенческого форума. – Казань: АртПечатьСервис, 2010. – С. 14–18.

9*. Усанин В.С. (Научные руководители: Кондратьева Е.Д., Ишмухаметова М.Г.) Долговременное движение частиц, выброшенных из кометы Холмса // Актуализация социально-экономического и естественно-научного образования в науке и предпринимательстве. Материалы II международного студенческо-аспирантского форума. – Казань: Отечество, 2009. – С. 10–14.

10*. Ishmukhametova M.G., Kondrat'eva E.D., Usanin V.S. The D-criterion for the Perseid stream // WGN, Journal of the International Meteor Organization. – 2009. – V. 37, No 2. – P. 68–70.

11*. Усанин В.С. Долгосрочные модели движения кометы Энке // Научная конференция «Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы». Сборник резюме докладов. – Москва: Государственный астрономический институт им. П.К. Штерибера, 2012. – С. 59–60.

12*. Usanin V. Model for motion of comet Encke during all its apparitions // JENAM-2011 European Week of Astronomy and Space Science, Book of abstracts. – Saint Petersburg, Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences

at Pulkovo. – 2011. – P. 61.

13*. Усанин В.С. (Научные руководители: Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д.) Единая самосогласованная модель движения кометы Энке // VIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Программа, тезисы докладов. – Москва: Институт космических исследований РАН, 2011. – С. 77.

14*. Усанин В.С. (Научные руководители: Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д.) Изменение негравитационных параметров кометы Брукса 2 как следствие её угасания // Сборник тезисов, материалы Семнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных ВНКСФ-17. – Екатеринбург: Издательство АСФ России, 2011. – С. 361–362.

15*. Усанин В.С. Изменения негравитационных параметров и угасание комет Энке и Брукса 2 // Тезисы докладов на Всероссийской астрономической конференции ВАК-2010 «От эпохи Галилея до наших дней». – Нижний Архыз: Организационный комитет ВАК-2010, 2010. – С. 53.

16*. Ishmukhametova M.G., Kondrat'eva E.D., Usanin V.S. Variation of nongravitational parameters of comet Encke as a result of its decay // International Conference Asteroid-Comet Hazard-2009, Book of Abstracts. – St.Petersburg, IAA RAS. – 2009. – P. 90.

17*. Усанин В.С. Изменение негравитационных параметров кометы Энке как следствие её угасания // Труды международной конференции «Астрономия и всемирное наследие: через время и континенты». – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – С. 100–101.

18*. Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д., Усанин В.С. Теоретические радианты новых периодических комет // Физика Космоса: Тр. 39-й Международ. студ. науч. конф. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2010. – С. 223.

19*. Усанин В.С. (Научные руководители: Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д.) Теоретические радианты новых периодических комет // ВНКСФ-16: Шестнадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных: материалы конф., информ. бюл. – Екатеринбург, Волгоград: Изд-

во АСФ России, 2010. – С. 382–383.

20*. Усанин В.С. Динамическая эволюция частиц, выброшенных из кометы Холмса // Физика Космоса: Тр. 38-й Международ. студ. науч. конф. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2009. – С. 332.

21*. Ишмухаметова М.Г., Кондратьева Е.Д., Усанин В.С. Критерии генетической общности малых тел применительно к метеорным роям // Физика Космоса: Тр. 38-й Международ. студ. науч. конф. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2009. – С. 303.

22*. Усанин В.С. (Научные руководители: Кондратьева Е.Д., Ишмухаметова М.Г.) Динамическая эволюция частиц, выброшенных из кометы Холмса // Сборник тезисов, материалы Пятнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных. – Екатеринбург, Кемерово: Издательство АСФ России, 2009. – С. 423–425.

23*. Усанин В.С. (Научный руководитель – доц. Кондратьева Е.Д.) Методы отождествления малых тел Солнечной системы, имеющих общее происхождение // Итоговая научно-образовательная конференция студентов Казанского государственного университета 2008 года: сборник тезисов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2008. – С. 60–61.

Объём и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Она изложена на 174 страницах, включает 18 таблиц и 33 рисунка. Библиографический список содержит 184 источника (печатные издания и электронные ресурсы).

Содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи, приводятся сведения о публикациях автора по теме диссертации и апробации работы.

В **первой главе** даётся обзор исследований негравитационных эффектов в движении комет. Показана роль кометы Энке как «розеттского камня» кометной

науки. Отмечается, что в настоящее время для учёта негравитационных эффектов наиболее широко применяется модель Марсдена 1973 года [2] и предпринимаются различные попытки её модификации. Единственная попытка учёта угасания в модели негравитационного ускорения реальной кометы (на примере кометы Энке) была осуществлена З.Секаниной ещё в 1967 году [8]. Делается заключение о необходимости дальнейших работ по модификации модели Марсдена.

Во второй главе приводится предлагаемый автором вывод уравнений для моделей негравитационных ускорений комет с угасанием и их формальное решение. Вначале обосновывается необходимость учёта угасания и возможность рассмотреть отдельно два случая: когда убывание негравитационных параметров обусловливается накоплением значительной нелетучей массы, либо сокращением сублимирующей площади нарастающей коркой. В первом случае рассматриваются варианты с постоянной и переменной формой ядра. Здесь приведён вывод уравнений для этого случая.

Так как выброс массы кометой не строго направлен, уравнение Мещерского даёт для реактивной силы, действующей на комету массы m :

$$\vec{F}_p = \lambda \vec{u} \frac{dm}{dt}, \quad (1)$$

причём в модели Марсдена показатель анизотропии λ и вектор скорости выброса относительно кометы в орбитальной системе координат \vec{u} считаются постоянными.

Количество

частиц

$$N = \frac{mN_A}{M} \quad (2)$$

(где N_A – число Авогадро, M – молекулярная масса), выбрасываемых в единицу времени с единицы чистой площади, даётся в модели Марсдена как

$$-\frac{1}{S} \frac{dN}{dt} \equiv Z = Z_0 g(r(t)), \quad (3)$$

где S – геометрическая площадь ядра кометы, $r(t)$ – её гелиоцентрическое расстояние (в астрономических единицах),

$$g(r) = 0,111262 \cdot 10^{-8} (r/2,808)^{-2,15} (1 + (r/2,808)^{5,093})^{-4,6142}. \quad (4)$$

Получаем реактивное ускорение в орбитальной системе координат ($i=1; 2; 3$ – радиальное, трансверсальное и нормальное направления):

$$w_i = -\frac{\lambda u_i M Z_0 S}{N_A m} g(r). \quad (5)$$

По определению выделим параметры Марседна (единицы а.е./ $(10^4 \text{ сут.})^2$):

$$A_i = -\frac{\lambda u_i M Z_0 S}{N_A m}. \quad (6)$$

Предположим, что имеет место накопление значительной нелетучей массы, не ослабляющей сублимацию. Если ядро не меняет форму, то

$$\frac{S}{m_n} = \frac{\phi}{\rho_n R}, \quad (7)$$

где ϕ зависит от формы (для шара $\phi = 3$), ρ_n и m_n – плотность и масса льда, R – его средний радиус, определяемый как

$$R = \sqrt[3]{\frac{3m_n}{4\pi\rho_n}}. \quad (8)$$

Определим аналогично через массу нелетучих $m_k = m - m_n$:

$$R_k = \sqrt[3]{\frac{3m_k}{4\pi\rho_k}}. \quad (9)$$

Запишем отсюда параметры Марседна:

$$A_i = -\frac{\lambda u_i M Z_0 \phi}{N_A \rho_n} \frac{R^2}{R^3 + (\rho_k R_k^3 / \rho_n)}, \quad (10)$$

а также, обозначив значения A_i и R в некоторый фиксированный момент t_0 соответственно через A_{i0} и R_0 , отношение:

$$\frac{A_i}{A_{i0}} = \frac{R^2}{R_0^2} \frac{R_0^3 + (\rho_k R_k^3 / \rho_n)}{R^3 + (\rho_k R_k^3 / \rho_n)}. \quad (11)$$

Объединяя (2), (3), (7) и (8), получим:

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{\phi M Z_0}{3 N_A \rho_n} g(r). \quad (12)$$

Обозначая в (11) и (12) $\sqrt[3]{\frac{\rho_n}{\rho_k R_k^3}} R = \chi \geq 0$ и $\frac{\phi M Z_0}{3 N_A \rho_n^{2/3} \rho_k^{1/3} R_k} = \alpha \geq 0$, запишем:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_i = A_{i0} \frac{\chi^2(\chi_0^3 + 1)}{\chi_0^2(\chi^3 + 1)}, \\ \frac{d\chi}{dt} = -\alpha g(r(t)), \\ \alpha = \text{const.} \end{array} \right. \quad (13)$$

Если же коэффициент формы ядра ϕ изменяется линейно по мере обтаивания, то

$$\left\{ \begin{array}{l} A_i = A_{i0}(1 + \psi(\chi - \chi_0)) \frac{\chi^2(\chi_0^3 + 1)}{\chi_0^2(\chi^3 + 1)}, \\ \frac{d\chi}{dt} = -\alpha_0(1 + \psi(\chi - \chi_0))g(r(t)), \\ \psi = \text{const.} \end{array} \right. \quad (14)$$

Далее по известным из литературы значениям A_2 для кометы Энке строятся формальные решения, делается вывод о том, что наилучшие результаты даёт модель со значительной нелетучей массой. Также анализируются данные об изменениях A_2 других комет, и строится формальное решение для кометы Брукса 2.

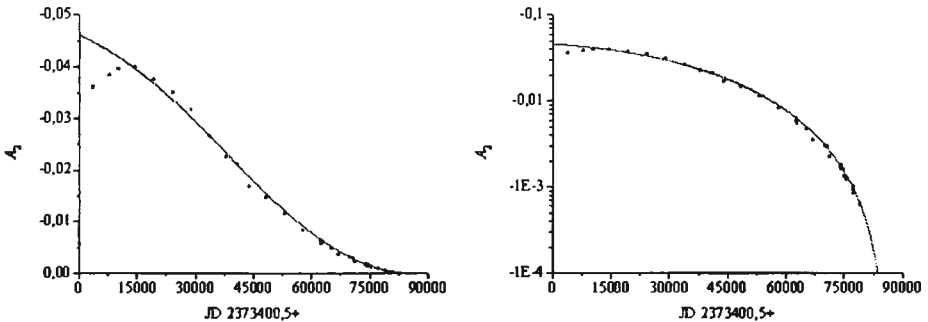


Рисунок 1. Формальное решение системы (13) для кометы Энке.

В третьей главе содержатся алгоритмы, использованные при создании комплекса программ для дифференциального исправления параметров движения комет. Интегратор, в который включены модели кометных негравитационных эффектов (13) и (14), основан на методе Эверхарта. Ошибка замыкания для кометы Энке (складывается из прямого и обратного хода за весь период наблюдений, 1785–2011 годы) составляет 6,69 км. Сравнение с интегратором NASA проводилось по

планетам. За исключением Земли и Луны, наибольшая ошибка (для Меркурия) составила на рассматриваемом промежутке 26,3 км. Для улучшения представления положений Земли в большую полуось орбиты Луны внесена небольшая эмпирическая поправка (так как не учитывалась неточность Земли).

В четвёртой главе приведено описание процесса и результаты построения численных моделей движения кометы Энке. Для компенсации векового хода точности наблюдений вначале должны быть определены их веса, выражаемые через априорную ошибку σ_{apr} . Для исключения воздействия на σ_{apr} модели негравитационных эффектов, наблюдения разбиты на 59 групп. В группах проведён отбор по критерию 3σ . Наименьшее значение σ_{apr} (0",68) получено для 2003–2007 годов, наибольшее (33",4) – для 1786–1795. С использованием весов проводилось объединение появлений. Для небольшого числа появлений итерации оказались расходящимися. В модели со значительной нелетучей массой и постоянной формой ядра получены решения по 30 появлениям 1911–2010 и 1786–1908 годов, а также по всем 60 появлениям. В модели со значительной нелетучей массой и переменной формой ядра сошлись два решения (кроме 1786–1908 годов). Для модели с нарастанием корки на поверхности ядра решения найти не удалось. Сделан вывод об ограниченной применимости всех полученных решений.

Таблица 1. Решения по 30 и 60 появлениям кометы Энке, переменная форма ядра, координаты барицентрические эклиптические J2000,0, $\pm 1\sigma$.

Параметр	30 появлений (1911–2010 годы)	60 появлений (1786–2010 годы)
t	JD 2455880,5 TDB=15 ноября 2011 года	
x , а.е.	+3,56811648 \pm 0,00000047	+3,5681690 \pm 0,0000048
y , а.е.	-1,69289272 \pm 0,00000069	-1,6928273 \pm 0,0000073
z , а.е.	+0,00117946 \pm 0,00000083	+0,0011982 \pm 0,0000109
x' , а.е./сут	+0,00332505484 \pm 0,00000000179	+0,0033248521 \pm 0,0000000130
y' , а.е./сут	+0,00213875287 \pm 0,00000000084	+0,0021388327 \pm 0,0000000052
z' , а.е./сут	+0,00070091854 \pm 0,00000000041	+0,0007009004 \pm 0,0000000056
A_1	-0,0027665 \pm 0,0000890	-0,006348 \pm 0,000283

A_2	$-0,00041408 \pm 0,00000506$	$-0,0006716 \pm 0,0000107$
A_3	$-0,014377 \pm 0,001004$	$-0,02368 \pm 0,00261$
α , сут. ⁻¹	$(4,6161 \pm 0,0417) \cdot 10^{-5}$	$(3,23885 \pm 0,00416) \cdot 10^{-5}$
ψ	$+0,6351 \pm 0,0259$	$+0,7968 \pm 0,0150$
χ	$0,12437 \pm 0,00302$	$0,12321 \pm 0,00162$
σ_{apo} , "	3,94	401
$\sigma_{apo} / \sigma_{apr}$	1,55	21,6

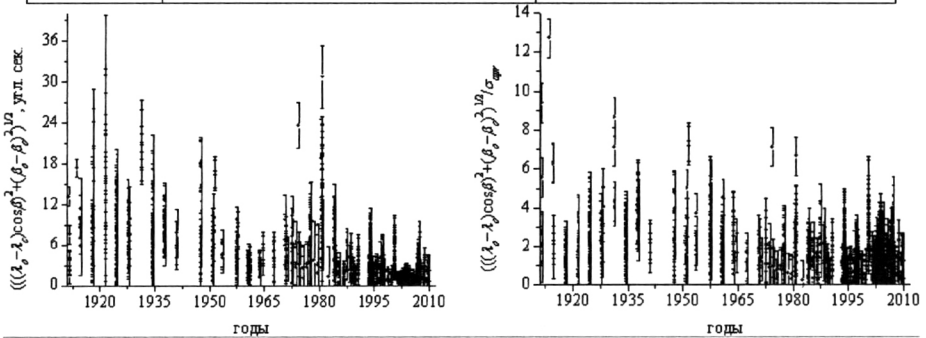


Рисунок 2. Остаточные отклонения в наблюдаемом положении, решение по 30 появлениям, модель с переменной формой ядра.

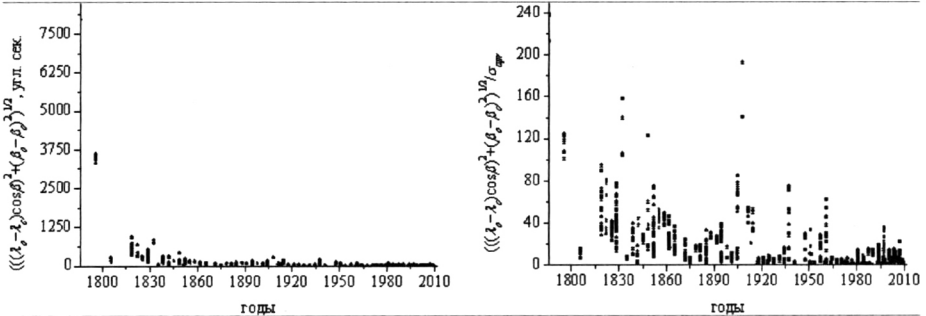


Рисунок 3. Остаточные отклонения в наблюдаемом положении, решение по 60 появлениям, модель с переменной формой ядра.

С решениями, полученными по всем наблюдениям, проведены расчёты, которые в будущем следует повторить с более точной теорией. Вычисленный в модели с переменной формой ядра момент прохождения перигелия в 1786 году

отличается от наблюдавшегося на 0,74 сут., а в последней модели NASA [1] различие достигает 58,2 сут. Выделены вклады планетных и негравитационных возмущений. Сделаны экстраполяции моделей в прошлое, причина отсутствия кометы в летописях при этом не найдена, предложены два возможных объяснения. Проведены экстраполяции моделей в будущее. Определены возможные даты угасания кометы: 2027 или 2043 год. Это совпадает с результатами З.Секанины [8], а также близко к оценке, найденной И.Феррином по фотометрическим данным.

Таблица 2. Возмущения в гелиоцентрическом движении кометы Энке за весь период наблюдений (в рамках рассматриваемой модели с переменной формой ядра).

Элементы	Планетные возмущения	Негравитационные возмущения	Полные возмущения	Доля негравитационных возмущений в суммарных, %
$\omega, ^\circ$	+4,6998	-0,2852	+4,4146	5,72
$\Omega, ^\circ$	-2,8992	+0,2521	-2,6471	8,00
$i, ^\circ$	-2,0449	+0,1154	-1,9295	5,34
e	+0,002350	-0,002483	-0,000133	51,37
$a, \text{ а.е.}$	-0,001398	-0,000454	-0,001852	24,51
$M, ^\circ$	-95,6887	+78,0329	-17,6558	44,92
$\pi, ^\circ$	+1,8006	-0,0331	+1,7675	1,80
$q, \text{ а.е.}$	-0,005417	+0,005430	+0,000013	50,06
$Q, \text{ а.е.}$	+0,002621	-0,006338	-0,003717	70,74
$P, \text{ сут.}$	-1,1402	-0,3702	-1,5104	24,51
$\nu, ^\circ$	-19,8577	+16,9952	-2,8625	46,12
$T, \text{ сут.}$	+319,353	-261,180	+58,173	44,99

Полученные решения сравнены с теорией Ю.А.Чернетенко, она сходна с моделью из 30 появлений со значительной нелетучей массой и переменной формой ядра. Рассмотрена также аппроксимационная модель Ситарского. По этой модели не удалось найти сходящегося решения. Замена переменных замедляет расходимость,

но не приводит к решению. Сделан вывод о необходимости более гибкого подхода к выбору модели негравитационных эффектов в зависимости от целей исследования.

В **заключении** указываются научная новизна и практическая значимость результатов работы, обосновывается их достоверность. Перечисляются положения, выносимые на защиту. Выражается благодарность оказавшим помощь в работе.

В **Приложении 1** приведён ответ С.Шутович [7] на запрос о её исследованиях движения кометы Энке. В **Приложении 2** помещён CD с программами и данными, использованными в работе.

Список литературы и электронных ресурсов

1. Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B. HORIZONS Web-Interface // HORIZONS System. – 1996–2011. – URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>.

2. Marsden B.G., Sekanina Z., Yeomans D.K. Comets and Nongravitational Forces. V. // *Astronomical Journal*. – 1973. – V. 78, No 2. – P. 211–225.

3. Whipple F.L., Sekanina Z. Comet Encke: precession of the spin axis, nongravitational motion, and sublimation // *Astronomical Journal*. – 1979. – V. 84, No 12. – P. 1894–1909.

4. Sekanina Z. Outgassing asymmetry of periodic comet Encke. II. Apparitions 1868–1918 and a study of the nucleus evolution // *Astronomical Journal*. – 1988. – V. 96, No 4. – P. 1455–1475, 1508.

5. Sitarski G. On the Rotating Nucleus of Comet P/Grigg-Skjellerup // *Acta astronomica*. – 1992. – V. 42, No 1. – P. 59–65.

6. Szutowicz S. Active regions on the surface of Comet 43P/Wolf-Harrington determined from its nongravitational effects // *Astronomy and Astrophysics*. – 2000. – V. 363. – P. 323–334.

7. Szutowicz S. Re: Comet. – Personal communication, 2011.

8. Sekanina Z. Dynamical and Evolutionary Aspects of Gradual Deactivation and Disintegration of Short-Period Comets // *Astronomical Journal*. – 1969. – V. 74, No 10. – P. 1223–1234.

102

Подписано в печать 22.10.12	Формат 60x84 ¹ / ₁₆	Цифровая Печ. л. 1.0
Тираж 100	Заказ 13/10	печать

Отпечатано в типографии «Фалкон Принт»
(197101, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Пушкарская, д. 54, офис 2)