

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи  
УДК 523.6

**БИРЮКОВ Евгений Евгеньевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ  
КОМЕТ ГАЛЛЕЕВСКОГО ТИПА**

Специальность: 01.03.01 – “Астрометрия и небесная механика”

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2008

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор  
Вячеслав Васильевич Емельяненко (ЮУрГУ)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
Виктор Абрамович Шор (ИПА РАН)

кандидат физико-математических наук,  
Елена Ивановна Тимошкова (ГАО РАН, Пулково)

Ведущая организация:

Институт астрономии РАН, Москва

Защита состоится “3” июня 2008 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 при Институте прикладной астрономии РАН по адресу: 191187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии РАН (С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10).

Автореферат разослан “30” апреля 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

Ю.Д. Медведев

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Вопросы природы, происхождения, эволюции малых тел Солнечной системы и, прежде всего, комет, традиционно привлекают широкое внимание астрономов, а изучение комет приобретает значение одной из центральных проблем Солнечной системы. Такой интерес к кометам не случаен. Изучение динамической эволюции комет позволяет не только выяснить особенности этих тел, но и понять происхождение и состав других групп малых тел Солнечной системы – кентавров, транснептуновых объектов. Наконец, исследование комет и других малых тел позволяет подойти к выяснению прошлого и настоящего Солнечной системы.

Среди комет лучше всего изучены короткопериодические кометы, из которых выделяют две основные группы: кометы галлеевского типа (КГТ) и кометы семейства Юпитера (КСЮ). Происхождение комет семейства Юпитера можно объяснить захватом как из потока почти параболических комет, так и из транснептуновой области и, в частности, из пояса Эджеворта-Койпера. Вопрос изучения динамической эволюции комет галлеевского типа является наиболее интересным и трудным в современной кометной астрономии. Многочисленные исследования предсказывают, что на орбитах галлеевского типа с абсолютной звездной величиной  $H_{10} \leq 7^m$  должно существовать около 3000 комет, захваченных с почти параболических орбит, в то время как обнаружено всего 23 кометы. В объяснении этого несоответствия многие исследователи ограничивались только предположениями о физическом угасании кометных ядер и о столкновении комет с планетами Солнечной системы. В некоторых работах предпринимались попытки рассмотреть возможные механизмы угасания комет, однако в них рассматривалось только влияние угасания на количество комет галлеевского типа. Несмотря на существенный прогресс в этом направлении, мы еще далеки от понимания того, как процесс физической

эволюции ядер комет влияет на распределение орбит обнаруженных КГТ и их количество.

Указанные обстоятельства диктуют необходимость тщательного исследования эволюции комет от их первого визита в планетную область Солнечной системы до исчезновения (физического или динамического).

### Цель работы

Целью данной диссертационной работы является:

1. Исследовать захват комет на орбиты галлеевского типа с выявлением промежуточных динамических стадий существования комет в планетной области.
2. Исследовать влияние угасания на распределение орбит комет галлеевского типа, а также вклад угасших комет в популяцию астероидов.
3. Объяснить распределение орбит обнаруженных КГТ и их количество.
4. Построить распределение орбит различных классов малых тел в околоземном пространстве, происхождение которых связано с облаком Оорта.

### Научная новизна

Впервые проведено исследование захвата комет из облака Оорта на галлеевские орбиты с учетом возмущений от Галактики, проходящих звезд, четырех планет-гигантов с применением высокоскоростного точного метода симплектического интегрирования уравнений движения. Также впервые была учтена зависимость интенсивности потока комет из облака Оорта в планетной области от перигелийного расстояния орбит. Благодаря этому было показано, что учет потока в планетной области изменяет современные представления о количественном составе и распределении орбит различных семейств малых тел Солнечной системы. В частности:

1. Кометы с  $q > 4$  а.е. являются важным источником комет галлеевского типа.

2. Происхождение кентавров можно объяснить захватом из потока комет на почти параболических орбитах.

Впервые были исследованы все промежуточные динамические фазы захвата комет на галлеевские орбиты. Продемонстрировано, что вековые возмущения способны оказывать заметное влияние при захвате комет на орбиты галлеевского типа.

Впервые было изучено влияние угасания комет из облака Оорта с учетом разрушения ядер на распределение орбит малых тел (комет и астероидов). Получены оценки вклада комет из облака Оорта в кометно-метеорный комплекс в околоземном пространстве.

Впервые было выполнено исследование распределения орбит дамоклоидов с учетом эффектов наблюдательной селекции.

#### Научное и практическое значение работы

Проведенный в работе анализ динамической эволюции комет из облака Оорта в планетной области может быть использован в дальнейших исследованиях влияния вековых возмущений на динамическую эволюцию короткопериодических комет.

Полученные при численном моделировании оценки вклада комет облака Оорта в различные популяции объектов на короткопериодических орбитах могут быть учтены при составлении программ астрономических наблюдений.

Модель угасания ядер комет с учетом разрушения может использоваться в дальнейшем при исследовании эволюции комет. В частности, она может быть применена в исследованиях эволюции других классов комет, которые могут происходить из иных источников (например, транснептуновой области).

#### Основные полученные результаты

1. Обнаружено два типа захвата на орбиты комет галлеевского типа, отличающиеся как скоростью захвата, так и динамической эволюцией. Один из типов захвата,  $q$ -захват, характеризуется преобладающим

влиянием на орбиты объектов возмущений от Галактики и от Юпитера. При  $a$ -захвате преобладающее влияние на эволюцию объектов оказывают возмущения от планет-гигантов.

2. Происхождение кентавров может быть связано с захватом из облака Оорта.
3. Количество комет галлеевского типа, захваченных с почти параболических орбит с  $q < 4$  и с  $q > 4$  а.е., приблизительно равно. Таким образом игнорировать вклад почти параболических комет с  $q > 4$  а.е. в популяцию КГТ не следует.
4. Угасание комет может происходить на расстояниях более 2,5 а.е. от Солнца. Следовательно, угасание комет связано с сублимацией не только водяного льда, но и льдов других, более летучих соединений.
5. Наблюдаемое распределение орбит как КГТ, так и дремлющих ядер комет (дамоклоидов), хорошо объясняется введением вероятности угасания и вероятности разрушения ядер, которые есть функции возраста комет и перигелийного расстояния орбит.
6. Построено распределение орбит дамоклоидов с учетом эффектов наблюдательной селекции. Получено, что показательный закон распределения объектов по размерам является хорошей аппроксимацией в некоторых интервалах абсолютных звездных величин.
7. Со стороны угасших ядер КГТ не существует значительной опасности столкновения с Землей.

На защиту выносятся следующие положения

1. Два типа динамической эволюции комет из облака Оорта на орбиты галлеевского типа
2. Модель угасания (с учетом разрушения) комет галлеевского типа из облака Оорта.
3. Распределение объектов на орбитах галлеевского типа в околоземном пространстве.

## Апробация работы

Основные результаты диссертации изложены автором на следующих конференциях:

Всероссийская конференция «ВАК-2001», СПбГУ, СПб, 2001; Всероссийская конференция «Горизонты вселенной», ГАИШ МГУ, Москва, 2004; Восьмой съезд Астрономического общества и Международный симпозиум «Астрономия 2005 – современное состояние и перспективы», ГАИШ МГУ, Москва, 2005; Международная астрономическая конференция «Физика небесных тел», КраО, Крым, 2005; Астрономическая конференция «Астрономия – 2006, традиции, настоящее и будущее», СПбГУ, СПб, 2006; Генеральная ассамблея МАС, симпозиум № 236, Прага, Чехия, 2006; Всероссийская астрономическая конференция ВАК – 2007, Казань; Международная конференция «Околосемная астрономия -2007», Терскол; Международная конференция «Современные проблемы астрономии - 2007», Одесса.

На научных семинарах: кафедр теоретической механики, вычислительной и небесной механики ЮУрГУ; Главной (Пулковской) обсерватории РАН; Института астрономии РАН.

## Объем и структура диссертации

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации 172 страницы.

Диссертация содержит 16 таблиц, 67 рисунков и список литературы из 181 названия.

**Первая глава** носит обзорный характер.

*В параграфе 1.1.* построены распределения орбит разных динамических классов обнаруженных комет. Дан анализ различных классификаций наблюдаемых комет. Обоснован выбор классификации в соответствии с которой кометы галлеевского типа движутся по орбитам с

периодом обращения вокруг Солнца  $20 < P < 200$  лет и параметром Тиссерана с Юпитером  $T_J < 2$ . Для минимизации эффектов наблюдательной селекции в работе рассматривались только кометы галлеевского типа с перигелийным расстоянием орбит  $q < 1,5$  а.е.. Составлен каталог обнаруженных комет галлеевского типа, включающий значения абсолютных звездных величин  $H_{10}$ .

*Параграф 1.2* посвящен обзору работ, в которых исследовалось моделирование захвата комет из облака Оорта на орбиты КГТ и КСЮ.

*В параграфе 1.2.1* дано описание основных механизмов захвата комет из облака Оорта на орбиты галлеевского типа: механизм тесных сближений с планетами-гигантами и механизм диффузии. Отмечено, что захват в результате тесных сближений представляет собой сложное сочетание или чередование эволюционного и катастрофического развития с временным преобладанием той или иной стадии и с периодами длительных застоев в том или ином кометном резервуаре. При этом главную роль играют возмущения от планет-гигантов. Механизм диффузии заключается в накоплении за большие интервалы времени малых планетных возмущений в обратных значениях больших полуосей почти параболических и долгопериодических комет.

*В параграфе 1.2.2* представлен анализ работ, в которых исследовался захват комет на орбиты КГТ и КСЮ из облака Оорта и пояса Эджеворта-Койпера.

Дан исторический обзор формирования идей о происхождении комет галлеевского типа.

*В параграфе 1.2.3.* говорится об основной проблеме в оценке количества КГТ. Многими исследователями было получено, что на орбитах галлеевского типа с  $q < 1,5$  а.е. должно существовать порядка 3000 комет с абсолютной звездной величиной меньше, чем  $H_{10} = 7^m$ . Однако в каталоге Марсдена и Вильямса [1] имеются данные о 23 кометах. Такое расхождение в оценке количества комет невозможно объяснить простым следствием

эффектов наблюдательной селекции. Очевидное решение этой проблемы заключается в том, что кометы угасают.

В параграфе 1.3 описываются физические характеристики комет. Дан обзор развития представлений о происхождении комет, на основании которого обсуждается состав комет, доля пылевой составляющей в ядрах комет, размеры и распределение комет по размерам. Отмечено, что значение абсолютной звездной величины  $H_{10} = 7^m$  соответствует диаметру ядра кометы  $D = 5 - 15$  км. Получено, что если кометные ядра распределены по закону  $n(r)dr \sim r^{-2,4} dr$  с диаметром в интервале 1 – 60 км, плотностью, равной  $\rho = 0,5$  г/см<sup>3</sup>, то средняя масса комет равна  $1,4 \cdot 10^{17}$  г.

Проанализированы механизмы угасания комет на основе данных наблюдения комет, возможности превращения комет в астероиды или разрушения ядер.

## **Вторая глава**

Во второй главе дается описание рассматриваемой модели и метода вычислений.

В параграфе 2.1 дается описание модели потока почти параболических комет из облака Оорта. Обоснован выбор оценки потока почти параболических комет с абсолютной звездной величиной меньше чем  $H_{10} = 7^m$ , который составляет  $\sim 0,2$  кометы в год на единицу перигелийных расстояний. Предполагается, что орбиты потока почти параболических комет распределены изотропно. В соответствии с этим, значения аргумента перигелия ( $\omega$ ) и долготы восходящего узла ( $\Omega$ ) орбит почти параболических комет были заданы случайным образом по равномерному закону распределения, наклона орбит – равномерно по  $\cos$  угла наклона. Значения больших полуосей орбит комет были заданы случайным образом по равномерному распределению на интервале 10000 а.е. – 30000 а.е. Первоначальные перигелийные расстояния распределены в планетной области. При этом планетная область была разбита на пять промежутков: 0 – 4 а.е., 4 – 6 а.е., 6 – 10,5 а.е., 10,5 – 18 а.е., 18 – 31 а.е.. Перигелийные

расстояния орбит распределены равномерно в пределах каждого промежутка. В каждой области было взято 10000 почти параболических комет. Таким образом, всего для исследования было взято 50000 кометных орбит из облака Оорта. Были введены коэффициенты («веса»), характеризующие интенсивность потока почти параболических комет в зависимости от перигелийного расстояния орбит.

*Параграф 2.2* посвящен методу интегрирования уравнений движения. В работе использовалась программа Емельяненко В.В., в которой реализован высокоскоростной точный метод симплектического интегрирования уравнений движения комет [2]. Приведены уравнения движения. Дано описание модели учета возмущений от Галактики (как от ядра, так и от галактического диска) и от проходящих звезд. При проведении численного эксперимента были учтены возмущения от планет-гигантов. Отмечена зависимость шага интегрирования от значения возмущающей функции. Интегрирование производилось на интервале времени  $4,6 \cdot 10^9$  лет.

### **Третья глава**

В третьей главе представлены результаты численного интегрирования уравнений движения комет из облака Оорта.

*В параграфе 3.1* показано, что существует два типа захвата комет облака Оорта на орбиты галлеевского типа.

*Параграф 3.1.1* посвящен первому способу захвата комет на орбиты галлеевского типа, который можно назвать *a*-захватом. При этом способе захвата объекты из облака Оорта на первом этапе динамической эволюции переходят на короткопериодические орбиты вследствие тесных сближений с планетами-гигантами и механизма диффузии. Продемонстрировано значительное влияние возмущений от Галактики на эволюцию почти параболических комет с перигелиями во внешней планетной области, который переводит кометы во внутреннюю планетную область, где захват на короткопериодические орбиты происходит быстрее. Возможны и довольно редкие тесные сближения комет с планетами-гигантами. После захвата на

короткопериодические орбиты кометы, в результате возмущений от планет-гигантов, постепенно подтягиваются к внутренней части планетной области и переходят на галлеевские орбиты. Переход комет с короткопериодических орбит на галлеевские происходит очень медленно ( $\sim 10^6$  лет) через промежуточные динамические стадии движения комет по орбитам резонансов с планетами – гигантами. Переход сопровождается ощутимым влиянием вековых возмущений. Наибольшее влияние при захвате комет с короткопериодических орбит на орбиты галлеевского типа оказывает Юпитер. В общей сложности захват комет из облака Оорта на орбиты галлеевского типа реализуется в среднем за 12500 оборотов комет вокруг Солнца.

Выделены основные варианты захвата комет из облака Оорта на орбиты галлеевского типа этим способом:

1. Кометы захватываются на короткопериодические орбиты с перигелийным расстоянием за орбитой Юпитера. В результате вековых возмущений происходят осцилляции перигелийного расстояния орбит комет. Это приводит к тому, что орбита кометы может оказаться вблизи орбиты Юпитера, который переводит ее на орбиту с меньшим значением перигелийного расстояния и постепенно переводит на галлеевскую орбиту. На этом этапе вековые возмущения продолжают оказывать заметное влияние на динамическую эволюцию комет. Захват происходит без тесных сближений комет с Юпитером.
2. Кометы захватываются из облака Оорта на короткопериодические орбиты с перигелием вблизи орбиты Юпитера. Кометы практически сразу оказываются под сильным влиянием Юпитера. Переход на галлеевские орбиты происходит либо в результате тесных сближений с Юпитером, либо в результате механизма диффузии в сочетании с вековыми возмущениями.
3. Возможно диффузионное изменение перигелийного расстояния орбит короткопериодических комет. Однако скорость изменения

перигелийных расстояний в результате диффузии очень мала. Поэтому этот вариант практически не реализуется.

*В параграфе 3.1.2* дано описание второго механизма захвата комет на орбиты галлеевского типа, который можно назвать  $q$ -захватом. Он заключается в том, что на первом этапе динамической эволюции кометы попадают на орбиты с перигелийным расстоянием орбит  $q < 1,5$  а.е. На втором этапе динамической эволюции кометы переходят на орбиты КГТ. Этот механизм захвата реализуется с достаточно высокой скоростью. Среднее число оборотов, необходимое для перехода почти параболических комет на галлеевские орбиты, равно 500.

Выделены два основных способа перевода комет из облака Оорта на орбиты с перигелийным расстоянием меньше, чем 1,5 а.е. Первый способ заключается в том, что в результате возмущений от звезд и Галактики кометы устремляются внутрь планетной области Солнечной системы. Вследствие этого формируется постоянный поток почти параболических комет. Среди этих комет есть и те, перигелийные расстояния орбит которых меньше 1,5 а.е. Второй способ заключается в ступенчатом переходе комет с перигелиями в планетной области на орбиты с  $q < 1,5$  а.е. благодаря возмущениям от Галактики. В результате этого кометы быстро оказываются на орбитах с малым значением перигелийного расстояния, где очень сильны возмущения от Юпитера.

На втором этапе динамической эволюции в результате возмущений от Юпитера орбиты комет трансформируются в галлеевские. На этом этапе действует классический механизм диффузии больших полуосей. Перигелийные расстояния орбит практически не меняются. Уменьшение больших полуосей орбит комет происходит очень быстро по причине сильных возмущений от Юпитера. Вековые особенности движения комет для данного способа захвата не характерны.

Отмечено, что упрощенные методы моделирования захвата комет из облака Оорта на галлеевские орбиты пригодны только для комет с малым

перигелийным расстоянием орбит, т.е. для комет, которые с помощью  $q$  – захвата попадают на галлеевские орбиты. При этом механизме захвата орбиты комет испытывают нерегулярные возмущения со стороны планет-гигантов (главным образом от Юпитера) и потому их движение может быть хорошо описано с помощью диффузионного механизма. При исследовании захвата комет из области высоких перигелиев необходимо использовать более точные численно-аналитические методы по причине существенного влияния на эволюцию комет вековых возмущений.

*Параграф 3.2* посвящен объектам на промежуточных орбитах: кентаврам и дамоклоидам, существование которых подтверждает справедливость обнаруженных способов захвата.

*В параграфе 3.2.1* рассмотрено движение комет при захвате из облака Оорта на орбиты кентавров. Не смотря на то, что традиционно кентаврами называют тела, движущиеся по орбитам, пересекающим орбиты планет-гигантов, кроме Юпитера (т.е. перигелийные расстояния орбит которых  $5 < q < 28$  а.е.), со значением большой полуоси  $a < 100$  а.е., нами были рассмотрены только те кентавры, у которых период обращения вокруг Солнца  $P < 200$  лет. Как следует из результатов проведенного нами численного интегрирования, среднее динамическое время жизни кентавров составило  $7 \cdot 10^6$  лет, и на орбитах кентавров должно существовать  $0,5 \cdot 10^6$  комет с абсолютной звездной величиной меньше, чем  $H_{10} = 7^m$ , захваченных из облака Оорта. Был проведен анализ распределения кентавров по абсолютным звездным величинам  $H$  и показано, что для крупных кентавров  $N(H) \sim 10^{0,6H}$ . Распределение орбит кентавров, захваченных из облака Оорта на короткопериодические орбиты, хорошо согласуется с распределением орбит кентавров с учетом эффектов наблюдательной селекции. Следовательно, происхождение значительной части кентавров может быть связано с захватом из облака Оорта.

*В параграфе 3.2.2* рассмотрен захват из облака Оорта на орбиты дамоклоидов - астероидов, которые движутся по галлеевским орбитам с

перигелийным расстоянием  $q < 5$  а.е. Составлен каталог обнаруженных дамоклоидов. Получено, что на орбитах дамоклоидов должно существовать 15000 комет с абсолютной звездной величиной меньше, чем  $H_{10} = 7^m$ .

*В параграфе 3.3.1* представлены значения вероятностей захвата комет на орбиты галлеевского типа и на орбиты семейства Юпитера.

Продемонстрировано влияние возмущений от Галактики, которые приводят к уменьшению значения вероятности захвата на орбиты галлеевского типа для почти параболических комет с первоначальными перигелийными расстояниями в первой области ( $q_0 < 4$  а.е.). Для  $4 < q_0 < 31$  а.е. вероятность захвата на орбиты КГТ повышается.

*В параграфе 3.3.2* Исследовано распределение орбит комет галлеевского типа, захваченных из облака Оорта. Среднее динамическое время жизни комет на орбитах галлеевского типа с  $q < 1,5$  а.е. составило  $1,5 \cdot 10^5$  лет, и на орбитах галлеевского типа должно существовать 3200 комет с абсолютной звездной величиной меньше, чем  $H_{10} = 7^m$ . Среднее динамическое время жизни комет на орбитах галлеевского типа с  $q < 1$  а.е. составляет  $9 \cdot 10^4$  лет и на этих орбитах должно существовать 1000 комет с абсолютной звездной величиной меньше, чем  $H_{10} = 7^m$ .

Получено, что больше половины комет галлеевского типа захвачено с почти параболических орбит с первоначальным значением перигелийного расстояния  $q > 4$  а.е.

Из анализа распределения перигелийных расстояний орбит короткопериодических комет, которые будут захвачены на орбиты галлеевского типа и семейства Юпитера, следует, что КГТ и КСЮ могут стать только те объекты на короткопериодических орбитах, у которых  $q < 13$  а.е.

Отмечено, что полученные оценки вероятностей захвата на орбиты КГТ и КСЮ согласуются с предыдущими работами по захвату комет из облака Оорта на орбиты галлеевского типа.

## Четвертая глава

В четвертой главе приведены результаты моделирования физической эволюции комет

*Параграф 4.1* посвящен моделированию угасания комет облака Оорта.

*В параграфе 4.1.1* рассмотрено угасание комет при  $r \leq 2,5$  а.е., то есть при условии, что угасание комет связано с сублимацией водяного льда. Была введена вероятность угасания кометы за один оборот вида  $P = \frac{1}{N} q^{-\alpha}$ , где  $N$  – нормирующий множитель, характеризующий число оборотов комет вокруг Солнца на орбитах с  $q = 1$  а.е.,  $q$  – перигелийное расстояние орбиты кометы,  $\alpha$  – некоторая константа. С помощью критерия Смирнова-Колмогорова было получено, что при  $N = 600$  и  $\alpha = 1$  распределение орбит комет галлеевского типа, захваченных из облака Оорта, согласуется с распределением орбит обнаруженных КГТ. Но в этом случае на орбитах галлеевского типа с  $q < 1,5$  а.е. должно быть 188 комет и с  $q < 1$  а.е. – 64 кометы. Сделан вывод, что гипотеза угасания комет при  $r \leq 2,5$  не согласуется с наблюдениями.

*В параграфе 4.1.2* на основании данных наблюдений короткопериодических комет (около 20% короткопериодических комет движется на орбитах с  $q > 3,5$ ) была рассмотрена возможность угасания комет при  $r \leq 3,5$  а.е., то есть угасание комет связано с сублимацией льдов не только воды, но и других веществ. Оказалось, что при учете угасания комет на больших расстояниях от Солнца распределение орбит меняется слабо (поэтому мы положили, что параметры  $N = 600$  и  $\alpha = 1$  можно оставить). Однако среднее время жизни комет уменьшается. В результате на орбитах галлеевского типа с  $q < 1,5$  а.е. должно быть 90 комет и с  $q < 1$  а.е. – 25 комет. Если учесть эффекты наблюдательной селекции, то на орбитах галлеевского типа с перигелийным расстоянием  $q < 1,5$  а.е. будет обнаружено 20 комет и 11 комет  $q < 1$  а.е. Вероятность того, что распределения перигелиев модельных и наблюдаемых комет галлеевского типа совпадают, равна 0,86.

Значение среднего наклона орбит активных (то есть не «угасших») КГТ с  $q < 1,5$  а.е., захваченных из облака Оорта, составил  $72,5^\circ$ . Следовательно, не следует корректировать изотропное распределение орбит комет из облака Оорта, как было предложено в работе [3]. Таким образом, предложенная модель угасания комет хорошо согласуется с наблюдениями комет галлеевского типа.

*Параграф 4.2* посвящен механизмам угасания комет.

*В параграфе 4.2.1* учтены эффекты наблюдательной селекции дамоклоидов. Была введена вероятность обнаружения объекта с видимой звездной величиной  $m$  и элементами орбиты  $E$ :  $p(m, E) = p_1 p_2 p_3$ , где  $p_1$  – вероятность, что объект с элементами орбиты  $E$  попал в поле обзора,  $p_2$  – вероятность, что объект с орбитальными элементами  $E$  имеет видимую звездную величину  $m$ ,  $p_3$  – вероятность обнаружения объекта с видимой звездной величиной  $m$ . На основании анализа построенного распределения дамоклоидов по размерам получено, что показательный закон распределения объектов по размерам является хорошей аппроксимацией в некоторых интервалах абсолютных звездных величин.

*В параграфе 4.2.2.* приведены результаты моделирования разрушения ядер угасших комет. Предложенная модель угасания предсказывает, что на орбитах с  $q < 1,5$  а.е. существует  $\sim 3100$  ядер угасших комет и на орбитах с  $q < 1$  а.е. существует  $\sim 1000$  ядер угасших комет. Но обнаружен всего один дамоклоид на орбите с  $q < 1$  а.е. Поэтому, для того чтобы модель угасания была полноценной, необходимо рассмотреть возможность разрушения кометных ядер. Аналогично вероятности угасания, вероятность разрушения кометы за один оборот равна  $P_{разр} = \frac{1}{M} q^{-\beta}$ , где  $M$  – среднее число оборотов кометы вокруг Солнца на орбите с  $q = 1$  а.е. до разрушения после угасания,  $\beta$  – некоторая константа. Наилучшее согласие с наблюдениями дамоклоидов обеспечивается при  $M = 100 - 300$  и  $\beta = 3 - 3,5$ . В этом случае на орбитах дамоклоидов с  $q < 1$  а.е., происхождение которых связано с захватом из

облака Оорта, должно существовать 10-14 объектов. С учетом физической эволюции кометных ядер на галлеевских орбитах, пересекающих орбиту Земли, существует примерно одинаковое количество комет и астероидов, происхождение которых связано с захватом из облака Оорта. Таким образом, со стороны угасших ядер комет галлеевского типа опасность столкновения с Землей не превышает опасности столкновения со стороны активных ядер комет галлеевского типа.

*В параграфе 4.2.3.* показано, что вклад разрушенных ядер комет в спорадический метеорный фон и в зодиакальное облако не превышает нескольких процентов, что также согласуется с наблюдениями.

*В заключении* сформулированы основные результаты диссертации.

Результаты диссертации опубликованы в 13 работах (8 статей, 5 тезисов) общим объёмом 59 страниц.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах

1. Бирюков Е.Е., Мазеева О.А. Астероиды и кометы из облака Оорта на орбитах галлеевского типа // «ОКОЛОЗЕМНАЯ АСТРОНОМИЯ-2007» сборник трудов конференции. 3-7 сентября, п. Терскол. Редакторы: Рыхлова Л.В., Тарадий В.К. – Эльбрус. – 2008. – С. 122-127.
2. Бирюков Е.Е. Захват комет из облака Оорта на орбиты галлеевского типа и орбиты семейства Юпитера // *Астрономический вестник*. – 2007. – Т. 41. – № 3. – Стр.232-240.
3. Д.Ф. Лупишко, В.В.Емельяненко, Е.Е. Бирюков. Динамическая и физическая эволюция комет: доля астероидов, сближающихся с Землей, кометного происхождения // *Вестник ЮУрГУ, Серия «Математика, физика, химия»*. – 2007. – Вып. 9. – №19(91). – С. 78–81.
4. Бирюков Е.Е. Динамическая эволюция комет галлеевского типа и проблема их угасания // *Труды Всероссийской астрономической конференции «ВАК – 2007»*. Казань: Издательство Казанского государственного университета. – 2007. – 536С. – Т. 78. – С. 101-102.
5. Бирюков Е.Е. Облако Оорта как источник короткопериодических комет // *Известия Крымской астрофизической обсерватории* – 2007. – Т. 104. – №4. – С. 231-237.
6. Бирюков Е.Е. Динамическая эволюция почти параболических комет на орбиты галлеевского типа // *Международная мемориальная научная конференция «Современные проблемы астрономии»*, Одесса, 12-18 августа 2007г. – 2007. – С. 7.

7. Бирюков Е.Е. Особенности захвата комет галлеевского типа с почти параболических орбит // Вестник ЮУрГУ, Серия: «Математика, физика, химия». – 2006. – Вып. 7. – №7(62). – Стр. 71-78.
8. Бирюков Е.Е. Угасание комет из облака Оорта // Вестник ЮУрГУ, Серия: «Математика, физика, химия». – 2006. – Вып. 7. – №7(62). – Стр. 79-85.
9. Бирюков Е.Е. Распределение орбит дамоклоидов и их количество с учетом эффектов наблюдательной селекции // Известия главной астрономической обсерватории в Пулково. – 2006. – № 218. – С. 30-40.
10. Biryukov E.E. Fading problem of Halley-type comets // Abstract book of XXVIth general assembly of IAU Prague 14-18 August. – 2006. – P. 91.
11. Бирюков Е.Е. Захват комет из почти параболического потока на короткопериодические орбиты // Труды Государственного астрономического института им. П.К.Штернберга. Тезисы докладов Восьмого съезда Астрономического Общества и Международного симпозиума «Астрономия – 2005: состояние и перспективы развития», Москва. – 2005. Т.78. С.26
12. Бирюков Е.Е., Емельяненко В.В. Симплектическое интегрирование уравнений движения комет галлеевского типа // Тезисы докладов на Всероссийской астрономической конференции «Горизонты Вселенной», Москва. – 2004. С.221.
13. Бирюков Е.Е. Динамика метеорных роев // Тезисы докладов на Всероссийской астрономической конференции «ВАК-2001», Санкт-Петербург. – 2001. С.16

#### Личный вклад автора

В совместных работах [1,3] автору принадлежит постановка задачи и реализация вычислений. В работе [12] автору принадлежит реализация вычислений.

#### Цитируемая литература

1. Marsden B.G., Williams G.V. Catalogue of Cometary Orbits// Minor Planet Center. Smithsonian Astrophys. Obs. Cambridge. MA. – 2005.
2. Emel'yanenko V.V. An Explicit Symplectic Integrator for Cometary Orbits// Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. – 2002. – V. 84. – P. 331-341.
3. Levison H.F., Dones L., Duncan M.J. The origin of Halley-type comets: probing the inner Oort cloud// Astron. J. – 2001. – V. 121. – P. 2253-2267.