РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи

**КОЧЕТОВА Ольга Михайловна**

# Определение масс малых планет динамическим методом

Специальность 01.03.01
Астрометрия и небесная механика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2004

Работа выполнена в Институте прикладной астрономии РАН.

<u>Научный руководитель:</u>

кандидат физико-математических наук Ю. А. Чернетенко

<u>Официальные оппоненты:</u>

доктор физико-математических наук Ю.Д. Медведев
кандидат физико-математических наук Е. Н. Поляхова

<u>Ведущая организация:</u>

Главная астрономическая обсерватория РАН

Защита состоится 24 февраля 2004 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 в Институте прикладной астрономии РАН по адресу: 191187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии РАН.

Автореферат разослан 23 января 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук З. М. Малкин

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы диссертации

Масса малой планеты является одной из ее важных характеристик, необходимой как для корректного учета возмущений, оказываемых малой планетой на другие тела (большие и малые планеты, космические аппараты), так и для определения средней плотности малой планеты (если известны ее размеры и форма), что необходимо для выработки представлений о ее происхождении, минералогическом составе и структуре. Более точное знание масс большого числа малых планет позволит точнее воссоздать происхождение и эволюцию ансамбля малых тел Солнечной системы. Знание масс малых планет необходимо также и для целей космической навигации, и для противодействия астероидной опасности.

Как показано в ряде работ, точность динамических планетных теорий лимитируется неточностью знания масс малых планет и, как следствие, недостаточно точным учетом возмущений от них. Несмотря на значительные усилия исследователей в течение почти четырех десятилетий и все возрастающую точность наблюдений малых планет, уверенные значения масс получены для относительно небольшого их количества.

## Цель работы

Основная цель данной работы — определение масс крупных малых планет динамическим методом с ошибкой, на порядок–полпорядка меньшей самого значения массы (т.е. уверенное определение).

## Научная новизна работы

1. Выполнена оценка влияния составляющих модели движения малой планеты и редукции наблюдений на точность ее эфемериды. При этом в качестве тестовых использовались наблюдения малых планет, выполненные спутником Hipparcos.
2. При определении массы возмущающей малой планеты по движению возмущаемой малой планеты расширен набор используемых

возмущаемых малых планет за счет планет, находящихся в соизмеримости с возмущающим телом.

3. Предложен новый критерий отбора возмущаемых малых планет — по величине ошибки массы, получаемой по наблюдениям только одной малой планеты (для последующего включения в общее решение). При этом наличие тесных сближений с возмущающим телом не является определяющим фактором.
4. Получены массы 21 малой планеты с ошибками, меньшими, чем у других авторов, использующих динамический метод.
5. Для двух малых планет, 7 Ирида и 16 Психея, получено существенное отличие их средних плотностей от принятых. Возможно, это вызвано неоднородной структурой этих планет и/или неточностями в определении их таксономических типов.

## Практическая значимость работы

Работа представляет существенную практическую ценность, поскольку уточнены массы конкретных 21 малой планеты. Используемая методика применима при решении достаточно широкого круга задач, связанных с исследованием движения малых планет.

## Основные результаты, выносимые на защиту

1. Новый подход к отбору возмущаемых малых планет, заключающийся в привлечении малых планет, находящихся в соизмеримости с возмущающим телом и имеющих с ним умеренные кратные сближения.
2. Критерий отбора пробных частиц (малых планет) для последующего включения наблюдений этой планеты в общее решение не по наличию у нее тесных сближений с возмущающим телом, а по величине ошибки массы, получаемой по наблюдениям только данной малой планеты.
3. Значения масс двадцати одной малой планеты и оценка их ошибок.

## Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на шести научных конференциях:

1. Компьютерные методы небесной механики. 18–20 ноября 1997. ИТА РАН. Санкт-Петербург.
2. US/European Celestial Mechanics Workshop. 3–7 July 2000. Poznan.
3. Joint European and National astronomical Meeting (JENAM–2000). 29 May – 3 June 2000. Moscow.
4. Asteroid, Comets, Meteors (ACM-2002). 29 July–2 August 2002. Berlin.
5. Celestial Mechanics-2002: Results and Prospects.10–14 September 2002. IAA RAS. St.Petersburg.
6. Околоземная астрономия-2003. 8–13 сентября 2003. Терскол.

### Публикации по теме диссертации и вклад автора

Основные результаты диссертации изложены в 8 публикациях. В совместных с Ю. А. Чернетенко трех работах автору принадлежит выполнение вычислений и получение основных результатов, участие в их обсуждении, подготовке и оформлении статей.

### Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она изложена на 105 страницах, содержит 12 рисунков и 24 таблицы. Список литературы включает 100 наименований.

## Содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указаны научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы, перечислены результаты, выносимые на защиту, приведены структура и содержание диссертации, указаны печатные работы, в которых отражены основные результаты и определена доля участия автора в совместных публикациях.

В **первой главе** дается краткий обзор современного состояния задачи определения масс малых планет, отмечаются достоинства и недостатки существующих в настоящее время подходов к решению данной проблемы: динамического и астрофизического.

Для получения астрофизической оценки массы используются данные о размерах астероида и его таксономической классификации, основанной на изучении отражательных свойств его поверхностных слоев и сравнении этих свойств с данными лабораторного изучения метеоритов. Метод исходит из ряда предположений (сферическая форма тела, однородный состав, астероид одиночный, а не кратный, и т.д.). К достоинствам этого метода относится, прежде всего, возможность получения оценки масс большого числа малых планет. Точность астрофизических оценок масс зависит от точности определения диаметра и средней плотности.

Общий подход к определению масс возмущающих малых планет динамическим методом состоит в использовании изменений в орбитах возмущаемых малых планет, космических аппаратов, спутников малых планет (называемых в дальнейшем пробными частицами) под влиянием возмущающих масс. Измеряемые величины при этом — это положения пробных частиц. Неизвестные величины (поправки к элементам орбиты пробной частицы и значению массы возмущающего тела) определяются, как правило, из условия наилучшего представления наблюдений пробной частицы по методу наименьших квадратов. Погрешность определения массы зависит (в числе многих других причин) от точности определения координат пробной частицы. При заданной погрешности наблюдений относительная погрешность результата оказывается тем меньшей, чем большие по величине возмущения вызывает искомая масса. Величина этих возмущений для данного тела зависит от ряда факторов, но прежде всего от величины минимального расстояния пробной частицы от возмущающей массы. На этом основании во многих работах близкое прохождение пробной частицы относительно возмущающего тела рассматривалось как необходимое условие для успешного определения массы возмущающего тела. В принципе, критерий близкого прохождения пробной частицы действительно является необходимым, однако, поскольку величина результирующего возмущения зависит от многих причин, имеется возможность ослабить строгость критерия близости и существенно расширить диапазон сближений, которые могут вести к заметным возмущениям. Кроме критерия близкого прохождения разными исследователями вводились и другие критерии отбора: значения угла рассеяния траектории, значительное различие в координатах пробных частиц при включении тела с искомой массой в число возмущающих и без него и т. д.

Для уточнения значения массы возмущающего тела могут быть использованы в общем решении наблюдения нескольких пробных частиц. Однако выбор пробных частиц для решения задачи является

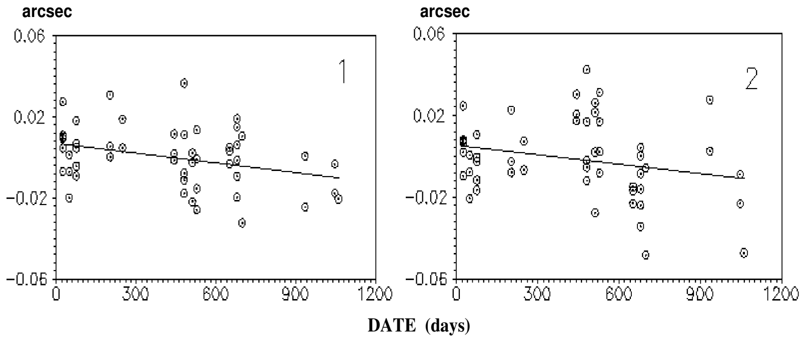


Рис. 1. Представление наблюдений малой планеты 10 Гигия, полученных спутником Hipparcos: 1 — орбитой, основанной только на этих наблюдениях; 2 — орбитой, основанной только на наземных позиционных наблюдениях.

непростым делом. Чтобы получить более надежное значение массы возмущающего тела с использованием нескольких пробных частиц, определяемая масса должна оказывать заметное влияние на движение каждой пробной частицы в отдельности. Без этого включение дополнительных пробных частиц приводит к "зашумлению" задачи и снижению точности определяемого значения массы.

Во **второй главе** исследуется влияние используемой модели движения и методов редукции наблюдений на точность вычисляемых положений малых планет. Подробно изложена используемая модель, достаточно полно и точно описывающая движение малой планеты. Оценено влияние на точность эфемеридных положений малой планеты возмущений от наиболее крупных малых планет. Рассмотрено влияние учета эффекта фазы, гравитационного отклонения света и назначения весов наблюдениям.

Тестирование модели проводилось на примере малой планеты 10 Гигия. В качестве тестовых наблюдений использовались высокоточные наблюдения Гигии, полученные спутником Hipparcos и не включаемые в процедуру уточнения параметров орбиты. Опорная орбита была получена по позиционным наблюдениям этой малой планеты на интервале 1901–1997 гг. Показано, что при учете всех эффектов

Таблица 1. Сравнение определений значений массы Юпитера.

| Возмущаемые тела | Обратное значение массы Юпитера | Авторы |
|---|---|---|
| Martian landers | 1047.34830 $\pm$ 0.00017 | Питьева, 1997 |
| Martian landers | 1047.34866 $\pm$ 0.00003 | Питьева, 2001 |
| 28 малых планет ( 9310 набл.) | 1047.34876 $\pm$ 0.00062 | Кочетова, Чернетенко, 2001 [4] |
| 28 малых планет (16061 набл.) | 1047.34861 $\pm$ 0.00039 | данная работа |

реальная точность эфемериды в окрестности эпохи оскуляции более чем на порядок выше точности, определяемой ошибкой единицы веса (ошибка единицы веса равна $0.65''$, а тестовые наблюдения, имеющие точность $0.016''$, представляются этой орбитой со средней ошибкой $0.020''$). На рис.1 приводятся уклонения тестовых наблюдений Гигии от вычисляемых положений, которые показывают, что орбиты, соответствующие вариантам 1 и 2, очень близки. Таким образом, при учете всех значимых факторов реальная точность вычисляемых эфемеридных положений составляет несколько сотых долей секунды дуги. Тестирование алгоритма определения масс проводилось на примере определения массы Юпитера (известной в настоящее время с высокой точностью) из наблюдений малых планет, находящихся в соизмеримости 2:1 с Юпитером. Результаты приводятся в табл. 1. Они показывают хорошее совпадение наших значений для массы Юпитера с более точными результатами Питьевой (Proceedings of IAU Colloquium 165, 251–256, 1997; Astron.&Astroph., 2001, **371**, 760–765).

Для решения систем условных уравнений использовался метод наименьших квадратов. Опробованы также и иные методы: метод наименьших модулей, минимаксный метод Хубера, метод коллокаций.

**В третьей главе** подробно описываются предложенные нами новые схемы определения масс малых планет динамическим способом. Излагается новая методика отбора возмущаемых малых планет для определения массы возмущающей малой планеты, отличная от существующей на сегодняшний день. Изложены результаты применения

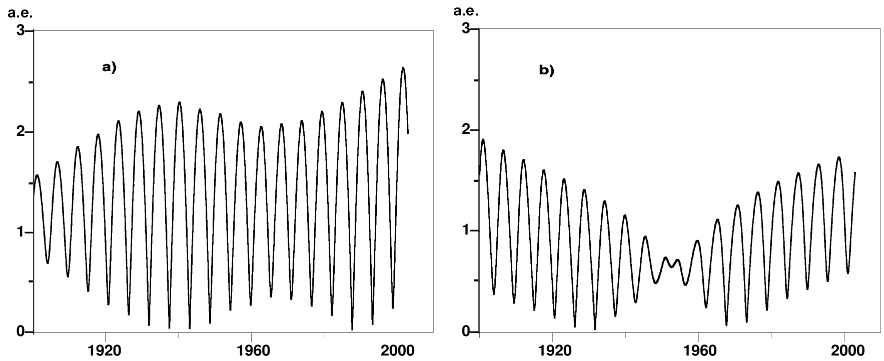


Рис. 2. Изменение расстояний возмущаемых малых планет a) 357 Нинина и b) 820 Адриана от возмущающей малой планеты 10 Гигия, находящейся с ними в соизмеримости 1:1.

новой методики и проведено сравнение с результатами, опубликованными другими авторами.

Возможность использования менее жесткого критерия при отборе пар малых планет, движущихся в окрестности точной соизмеримости друг с другом, объясняется тем, что сближения тел в таких парах регулярно повторяются (рис. 2). Кроме того, относительные скорости тел в окрестности сближения оказываются сравнительно небольшими. Поэтому гравитационное влияние возмущающего тела на возмущаемое оказывается ощутимым и при умеренных сближениях. Для определения масс крупных астероидов соответствующие возмущаемые малые планеты выбирались среди:

- малых планет, имеющих, как правило, одиночные тесные сближения с возмущающим телом ($\Delta_{min} \leq 0.05$ а.е.; именно такой предел для выбора возмущаемых малых планет является общепринятым),
- малых планет, находящихся вблизи соизмеримости 1:1 с возмущающим телом и имеющих с ним повторяющиеся сближения до минимальных расстояний $\Delta_{min} \leq 0.1$ а.е.

Оценка массы возмущающего тела и уточнение элементов орбит возмущаемых тел проводились на основе анализа отклонений наблюденных положений возмущаемых малых тел от вычисленных. Уравнения движения возмущающей малой планеты интегрировались совместно с уравнениями движения возмущаемой планеты. Учитывались возмущения от девяти больших планет, координаты и массы которых брались в соответствии с численной эфемеридой DE403. Кроме того, учитывались возмущения от 300 астероидов, значения масс которых приняты также в соответствии с DE403. Для вычисления координат этих 300 малых планет (в числе которых могла быть и малая планета, масса которой уточнялась) их уравнения движения интегрировались совместно с уравнениями движения возмущаемой планеты, а в качестве стартовых элементов были взяты оскулирующие элементы, опубликованные в "Эфемеридах малых планет на 2003 год". В уравнениях движения учитывались релятивистские возмущения, обусловленные действием Солнца. Наблюдения были исправлены за гравитационное отклонение света и эффект фазы. Коэффициенты условных уравнений для уточнения параметров орбит возмущаемых малых планет и массы возмущающего тела вычислялись путем численного интегрирования уравнений в вариациях совместно с уравнениями движения. Решение системы условных уравнений выполнялось методом наименьших квадратов.

В качестве измерений брались наблюдения малых планет на интервале 1900–2002 гг. из каталога Центра малых планет (США, Кембридж). Отбирались только те наблюдения, которые имели априорную точность по дате наблюдения не менее 0.00001 суток, по прямому восхождению не менее $0.01^s$ и по склонению не менее $0.1''$. Угловые координаты в этом каталоге приведены к фундаментальному звездному каталогу FK5 и равноденствию 2000.0. Все наблюдения считались равноточными.

В результате применения описанной выше процедуры отбора, для каждой выбранной нами 21 возмущающей малой планеты были получены наборы соответствующих возмущаемых тел. Затем для определения массы каждой возмущающей планеты были выполнены три решения:

- только по малым планетам, имеющим тесные сближения с возмущающим телом ($\Delta_{min} \leq 0.05$ а.е.),
- только по малым планетам, находящимся вблизи соизмеримости 1:1 с возмущающим телом ($\Delta_{min} \leq 0.1$ а.е.),
- общее решение.

Таблица 2. Оценки масс, полученные из различных наборов возмущаемых малых планет (массы выражены в $10^{-11}$ $M_{Sun}$).

| Возмущающая малая планета | Тесные сближения | Соизмеримость 1:1 | Общее решение | Число планет |
|---|---|---|---|---|
| 3 Юнона | 2.26 ± 0.38 | 1.64 ± 0.78 | 2.09 ± 0.35 | 33 |
| 6 Геба | 0.62 ± 0.09 | 1.16 ± 0.24 | 0.69 ± 0.09 | 36 |
| 7 Ирида | 1.40 ± 0.16 | 1.53 ± 0.63 | 1.41 ± 0.14 | 30 |
| 10 Гигия | 4.95 ± 0.49 | 4.50 ± 0.76 | 5.01 ± 0.41 | 24 |
| 11 Партенопа | 0.27 ± 0.16 | 0.287± 0.008 | 0.274 ± 0.009 | 46 |
| 15 Эвномия | 0.51 ± 0.49 | 1.17 ± 0.17 | 1.06 ± 0.16 | 18 |
| 16 Психея | 1.16 ± 0.25 | 2.18 ± 0.39 | 1.34 ± 0.22 | 44 |
| 22 Каллиопа | 0.69 ± 0.30 | 2.83 ± 0.80 | 0.85 ± 0.28 | 32 |
| 29 Амфитрита | 0.90 ± 0.14 | 1.75 ± 0.52 | 0.77 ± 0.12 | 15 |
| 31 Ефросина | 1.04 ± 0.58 | 0.59 ± 1.22 | 0.94 ± 0.52 | 18 |
| 48 Дорис | 0.18 ± 0.41 | 0.72 ± 0.44 | 0.61 ± 0.30 | 42 |
| 52 Европа | 1.58 ± 0.33 | 0.81 ± 0.39 | 1.27 ± 0.25 | 26 |
| 65 Кибела | 0.60 ± 0.43 | 0.57 ± 0.16 | 0.58 ± 0.15 | 25 |
| 88 Фисба | 0.55 ± 0.13 | 0.96 ± 0.35 | 0.59 ± 0.12 | 64 |
| 121 Гермиона | 0.44 ± 0.05 | 0.30 ± 0.80 | 0.45 ± 0.05 | 12 |
| 324 Бамберга | 2.49 ± 0.38 | 1.44 ± 1.08 | 2.29 ± 0.38 | 36 |
| 444 Гиптис | 0.63 ± 0.12 | 0.63 ± 0.48 | 0.63 ± 0.12 | 61 |
| 451 Пациенция | 0.92 ± 0.42 | 1.18 ± 0.60 | 1.02 ± 0.34 | 26 |
| 511 Давида | 2.48 ± 0.24 | 2.78 ± 1.54 | 2.40 ± 0.24 | 26 |
| 532 Геркулина | 1.58 ± 0.29 | 0.39 ± 0.81 | 1.68 ± 0.28 | 54 |
| 704 Интерамния | 1.05 ± 0.65 | 0.86 ± 0.54 | 0.81 ± 0.42 | 27 |

Во всех вариантах определялись поправки к элементам орбит всех возмущаемых малых планет и значению массы возмущающего тела. Результаты приводятся в табл. 2. В 5-ом столбце приводится количество возмущаемых малых планет, наблюдения которых включены в общее решение. Сравнение результатов, полученных по разным наборам возмущаемых тел, показывает, что включение в решение возмущаемых малых планет, находящихся в соизмеримости с возмущающей, приводит, как правило, к более надежной окончательной оценке значения массы.

Итак, на первом этапе данной работы мы использовали различные критерии отбора пробных частиц для определения массы возмущаю-

Таблица 3. Оценки масс некоторых малых планет, полученные по разному числу пробных частиц.

| Возмущающая планета | $\sigma_{mass}$ ($10^{-10} M_{Sun}$) | Число использованных наблюд. | Общее число возмущаемых малых планет | Масса возмущающей планеты ($10^{-11} M_{Sun}$) |
|---|---|---|---|---|
| 7 Ирида | $\leq$0.3 | 50402 | 127 | 1.31 $\pm$ 0.10 |
| | $\leq$0.5 | 108227 | 249 | 1.23 $\pm$ 0.10 |
| | $\leq$0.7 | 174059 | 394 | 1.20 $\pm$ 0.09 |
| 10 Гигия | $\leq$0.3 | 23518 | 47 | 4.09 $\pm$ 0.24 |
| | $\leq$0.4 | 45568 | 94 | 4.08 $\pm$ 0.22 |
| | $\leq$0.5 | 60462 | 129 | 4.16 $\pm$ 0.21 |
| | $\leq$0.7 | 108436 | 247 | 4.10 $\pm$ 0.20 |
| | $\leq$0.9 | 159591 | 373 | 4.06 $\pm$ 0.19 |
| 16 Психея | $\leq$0.3 | 55991 | 99 | 0.57 $\pm$ 0.16 |
| | $\leq$0.5 | 106175 | 215 | 0.68 $\pm$ 0.14 |
| 511 Давида | $\leq$0.3 | 9008 | 17 | 2.58 $\pm$ 0.22 |
| | $\leq$0.5 | 24923 | 54 | 2.46 $\pm$ 0.21 |
| | $\leq$0.7 | 52213 | 102 | 2.29 $\pm$ 0.20 |
| 532 Геркулина | $\leq$0.3 | 42669 | 26 | 0.94 $\pm$ 0.26 |
| | $\leq$0.5 | 62094 | 77 | 1.03 $\pm$ 0.24 |
| | $\leq$0.7 | 100740 | 120 | 1.01 $\pm$ 0.23 |

щего тела в зависимости от наличия у них тесных или повторяющихся умеренных сближений. На втором этапе работы мы попытались сформулировать общий критерий для отбора пробных частиц, одинаково применимый к любой пробной частице. Таким критерием, по нашему мнению, является величина ошибки массы, определяемой по наблюдениям только одной пробной частицы. Данный критерий вбирает в себя реальную возможность использования наблюдений данной пробной частицы в зависимости от их количества, качества и распределения во времени и т.д., а также учитывает геометрию сближений частицы с телом, масса которого определяется. Для уточнения масс с приме-

Таблица 4. Сравнение масс, $m$, и плотностей, $\rho$, некоторых возмущающих астероидов, полученных только по критерию ошибки массы, с астрофизическими оценками масс и средними плотностями.

| Малая планета | Диаметр, км (1989) | Тип | Данная работа | | Krasinsky et al.(2001) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $m$ ($10^{-11} M_{Sun}$) | $\rho$ (г/см$^3$) | $m$ ($10^{-11} M_{Sun}$) | $\rho$ (г/см$^3$) |
| 3 | 244 | S | 0.71±0.20 | 1.9 | 1.01±0.1 | 2.71 |
| 7 | 203 | S | 1.20±0.09 | 5.5 | 0.58±0.1 | 2.71 |
| 10 | 429 | C | 4.06±0.19 | 2.0 | 2.79±0.1 | 1.38 |
| 16 | 264 | M | 0.68±0.14 | 1.4 | 2.53±0.1 | 5.32 |
| 31 | 248 | C | 0.85±0.32 | 2.1 | 0.54±0.09 | 1.38 |
| 324 | 242 | CP | 0.53±0.23 | 1.4 | 0.50±0.05 | 1.38 |
| 444 | 170 | C | 0.45±0.10 | 3.5 | 0.17±0.04 | 1.38 |
| 451 | 230 | CU | 0.59±0.29 | 1.8 | 0.43±0.03 | 1.38 |
| 511 | 337 | C | 2.29±0.20 | 2.3 | 1.36±0.07 | 1.38 |
| 532 | 231 | S | 1.01±0.23 | 3.1 | 0.86±0.09 | 2.71 |
| 704 | 333 | F | 1.27±0.30 | 1.3 | 1.30±0.07 | 1.38 |

нением данного критерия были отобраны 11 малых планет из числа тех 21, массы которых уже были определены на первом этапе работы.

Для каждой из 11 планет данный критерий был применен для отбора пробных частиц из общего числа 52220 малых планет, включенных в компьютерную версию "Эфемерид малых планет на 2004 г.". В качестве измерений брались наблюдения малых планет на интервале 1900–2003 гг. из каталога Центра малых планет. По наблюдениям каждой из 52220 малых планет вычислялись масса и ее ошибка одной из одиннадцати планет. В процедуру уточнения масс по многим пробным частицам включались только те частицы, для которых найденная ошибка оказывалась меньше заданной величины. Варьируя допустимую величину ошибки, оказывалось возможным уточнять массу по разному числу малых планет. Эта процедура производилась нами до тех пор, пока ошибка определения массы по многим пробным частицам не переставала изменяться. Результаты для некоторых малых планет представлены в табл. 3.

Представляет определенный интерес выяснить, каким образом величина ошибок массы, определяемой по отдельным частицам, зависит от минимального расстояния пробной частицы и тела с уточняемой

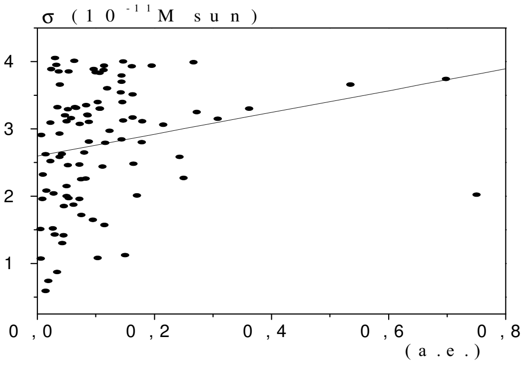


Рис. 3. Зависимость ошибки массы от минимального расстояния между возмущающим астероидом и пробной частицей.

массой. На рис. 3 показаны значения ошибок определения массы 10 Гигия по наблюдениям 94 малых планет, отобранных по критерию $\sigma_{mass} \leq 4 \cdot 10^{-11} M_{Sun}$, в зависимости от их минимального расстояния до Гигии. Рисунок показывает увеличение ошибок определения массы с ростом минимального расстояния до Гигии. Вместе с тем, видно, что такая крупная малая планета как Гигия оказывает заметное влияние на движение других малых планет, не приближающихся к ней ближе 0.3–0.4 а.е. и даже более. Окончательные результаты определения масс одиннадцати малых планет с использованием нового критерия представлены в табл. 4. Для всех планет ошибки найденных значений масс уменьшились по сравнению с ошибками общего решения (табл.2) в 1.2–1.7 раза. Сами значения масс в большинстве случаев изменились в пределах 1 $\sigma_{mass}$–2 $\sigma_{mass}$, причем в 10 случаях из 11 отмечается сближение новых значений масс с их астрофизическими оценками (Krasinsky G. A., Pitjeva E. V., Vasilyev M. V., Yagudina E. I. Сообщения ИПА РАН, 2001, N 139) по сравнению с найденными на первом этапе нашей работы. Увеличилось различие лишь для малой планеты 16 Психея. Этот вывод позволяет по-новому взглянуть на результаты первого этапа нашего исследования, когда мы использовали при определении масс только те пробные частицы (малые планеты), которые имеют сближения с определяемой массой до расстояния $\leq$ 0.05 а.е. или $\leq$ 0.1 а.е. (в случае кратных сближений). При таком

Таблица 5. Сравнение полученных значений масс с результатами других авторов (массы выражены в $10^{-11}$ $M_{Sun}$).

| Мал. | Динамический метод | | | | | Астрофиз.м-д |
|---|---|---|---|---|---|---|
| пла- | Krasinsky | Viateau | Michalak | Кузнецов | Данная | Krasinsky |
| нета | (2001) | (2000) | (2001) | (2001) | работа | (2001) |
| 3 | | | | 2.85±0.96 | **0.71±0.22** | **1.01±0.1** |
| | | | | | | (1.02±0.18) |
| 6 | | | 0.69±0.22 | 0.62±0.15 | **0.69±0.09**[3] | **0.49±0.02** |
| | | | 0.67±0.23 | | | (0.51±0.06) |
| 7 | | | | 1.56±0.38 | 1.20±0.09 | 0.58±0.1 |
| | | | | | | (0.64±0.12) |
| 10 | 4.8±3.9 | | 7.35±0.48 | 1.74±0.68 | 4.06±0.19 | 2.79±0.1 |
| | | | 5.21±0.50 | | | (2.73±0.80) |
| 11 | | 0.256±.007[1] | | 0.335±.012 | **0.287±.008**[3] | **0.293±.002** |
| 15 | 1.3±0.3 | | 0.72±0.27 | 1.77±0.18 | **1.06±0.16**[3] | **1.40±0.2** |
| | | | 1.27±0.27 | | | (1.33±0.28) |
| 16 | 12.7±1.8 | 0.87±0.26[2] | | 1.49±0.31 | 0.68±0.14 | 2.53±0.1 |
| | | | | | | (2.54±0.58) |
| 22 | | | | 0.67±0.66 | **0.85±0.28**[3] | **0.90±0.07** |
| 29 | | | | 2.24±0.20 | **0.77±0.13**[3] | **0.74±0.07** |
| 31 | 33.2±4.1 | | | 2.83±1.25 | **0.85±0.32** | **0.54±0.09** |
| | | | | | | (0.68±0.22) |
| 48 | | | | 5.96±0.66 | **0.61±0.30**[3] | **0.41±0.05** |
| 52 | -6.4±1.6 | | 4.00±0.78 | 3.78±0.48 | **1.27±0.25**[3] | **1.08±0.06** |
| | | | 4.00±0.78 | | | (1.12±0.33) |
| 65 | 3.9±1.3 | | | 3.37±2.06 | **0.58±0.15**[3] | **0.52±0.03** |
| | | | | | | (0.54±0.16) |
| 88 | | | 0.74±0.13 | 1.50±0.35 | **0.59±0.12**[3] | **0.45±0.02** |
| | | | 1.16±0.13 | | | (0.33±0.10) |
| 121 | | 0.47±0.08[2] | | | **0.45±0.05**[3] | **0.36±0.02** |
| | | | | | | (0.37±0.11) |
| 324 | 4.9±3.0 | | | 1.22±1.00 | **0.53±0.23** | **0.50±0.05** |
| | | | | | | (0.49±0.15) |
| 444 | | | 0.36±0.16 | 0.25±0.20 | **0.45±0.10** | **0.17±0.04** |
| | | | 0.42±0.16 | | | (0.17±0.06) |
| 451 | 5.4±3.8 | | | 3.21±0.85 | **0.59±0.29** | **0.43±0.03** |
| | | | | | | (0.46±0.14) |
| 511 | 29.4±4.3 | | 3.34±0.28 | 1.90±0.44 | 2.29±0.20 | 1.36±0.07 |
| | | | 3.54±0.28 | | | (1.40±0.41) |
| 532 | | | | 3.16±0.61 | **1.15±0.22** | **0.86±0.09** |
| 704 | 6.8±6.7 | | 5.16±0.90 | 0.61±1.08 | **1.27±0.30** | **1.30±0.07** |
| | | | 3.52±0.93 | | | (1.29±0.38) |

подходе большое число малых планет исключалось из определения возмущающей массы, что, по-видимому, явилось причиной значительного отличия масс некоторых планет, найденных на втором этапе нашей работы, от значений масс, полученных на первом этапе. В табл. 5, столбцы 2–5, приводятся результаты определения масс малых планет, полученные разными авторами в течение последних лет (динамический метод — Krasinsky et al. (Сообщения ИПА РАН. 2001, N 139); Viateau B. (Astron.&Astrophys., 2000, **354**, 725–731); Viateau B.&Rapaport M. (Astron.&Astrophys., 2001, **370**, 602–609) — в 3-ем столбце таблицы две последние работы отмечены цифрами [2] и [1] соответственно; Michalak G. (Astron.&Astrophys. 2001, **374**, 703–711); Кузнецов В. Б. (Сообщения ИПА РАН. 2001, N 138)). Эти результаты сопоставляются с результатами настоящей работы (столбец 6). Все указанные в этой таблице авторы, применявшие динамический метод, использовали в качестве пробных частиц малые планеты. Кроме того, использовались современные эфемериды больших планет, высокоточные методы численного интегрирования и общий для всех каталог наблюдений малых планет, поддерживаемый Центром малых планет. Хотя здесь необходимо отметить, что временные интервалы, охваченные используемыми наблюдениями, различны у разных авторов. В последнем столбце табл. 5 приводятся результаты астрофизического подхода, причем для некоторых малых планет в этом столбце приводится два значения: авторы результата в верхней строке — Krasinsky et al. (Сообщения ИПА РАН. 2001, N 139), автор результата в нижней строке, указанного в скобках — Е. В. Питьева (частное сообщение, 2003). В 6-ом столбце этой таблицы представлены результаты нашей работы как с использованием критерия отбора по тесным и умеренным сближениям (в таблице они отмечены цифрой [3]), так и по критерию отбора только по заданной величине ошибки возмущающей массы (11 значений масс). Для 17 из 21 малой планеты полученные в работе значения масс согласуются с астрофизическими оценками в пределах ошибок (в таблице они выделены жирным шрифтом). Для двух малых планет, 7 и 16, нами получено существенное отличие средних плотностей от общепринятых. Возможно, это вызвано неоднородной структурой этих планет и/или неточностями в определении их таксономических типов, или влиянием неучтенных ошибок позиционных наблюдений на полученные нами значения.

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

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**


[1] Кочетова О. М., Чернетенко Ю. А. Влияние эффекта фазы и других факторов на результаты обработки наблюдений малых планет. Тезисы докладов конференции "Компьютерные методы небесной механики".1997. СПб. ИТА РАН. С. 92–95.

[2] Kochetova O. M. Opportunities for observations of minor planets having close approaches with (1) Ceres, (2) Pallas, (4) Vesta. The Minor Planet Bulletin. V. 27. N 4. 2000. P. 51.

[3] Кочетова О. М. Исследование влияния модели движения и ошибок наблюдений малой планеты на точность определения параметров орбиты. Труды ИПА РАН. Вып.5. 2000. СПб. С. 197–203.

[4] Kochetova O., Chernetenko Yu. Determination of mass of Jupiter and that of some minor planets from observations of minor planets moving in 2:1 commensurability with Jupiter. Dynamics of Natural and Artificial Celestial Bodies. Eds: Pretka-Ziomek H., Wnuk E., Seidelmann P. K., Richardson P. The Netherlands.2001. P. 333–334.

[5] Chernetenko Yu. A., Kochetova O. M. Masses of some large minor planets. Asteroid, Comets, Meteors. 2002. Berlin. P.437–440.

[6] Kochetova O. M. Estimation of masses of some minor planets from observations of perturbed bodies. Труды ИПА РАН. Вып.8. 2002. СПб. С. 104–105.

[7] Кочетова О. М. Применение новых критериев отбора возмущаемых малых планет для определения масс возмущающих малых планет динамическим способом. Сообщения ИПА РАН. N 165. 2003. 43 С.

[8] Кочетова О. М. Определение масс ряда крупных астероидов динамическим методом. Астрон. вестник. Том 38. N 1. 2004. С. 71–81.

Подписано к печати 16.01.2004. Формат 60 × 90/16. Офсетная печать.
Печ. л. 1 Уч.-изд. л. 1 Тираж 100 Заказ 16 бесплатно

Отпечатано в типографии "Август"
(193148 Санкт-Петербург, ул. Крупской, д. 55).

ИПА РАН, 191187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10