

ISSN 0201—5099



ВЫПУСК 10

# АСТРОНОМИЯ И ГЕОДЕЗИЯ

ТОМСК — 1984

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ  
ПРИ ТОМСКОМ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ им. В. В. КУЙБЫШЕВА

---

# АСТРОНОМИЯ И ГЕОДЕЗИЯ

*Выпуск 10*



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Томск — 1984

## СОДЕРЖАНИЕ

Г. С. Тютюрев. Развитие астрономии в Томском университете. 1920—1980 гг. . . . .	3
Р. Г. Лазарев. Развитие метеорных исследований в Томске . . . . .	16
Т. В. Бордовицына. Исследования по небесной механике в Томском университете в 1968—1980 годах . . . . .	24
Н. П. Фаст. Исследования серебристых облаков в Томске . . . . .	31
Н. В. Васильев. Изучение проблемы Тунгусского метеорита в Томском университете и Томском отделении ВАГО . . . . .	40
Т. С. Бороненко, В. А. Тамаров, Ю. Б. Шмидт. Алгоритм построения аналитической теории движения ИСЗ в эйлеровых элементах с применением рядов Ли . . . . .	49
В. А. Шефер. Численная теория движения особой малой планеты Икар . . . . .	57
Ю. А. Федяев. Программа построения методов Рунге—Кутты высоких порядков на ЭВМ . . . . .	72
Ю. В. Сурнин, Ю. В. Деметьев. Аппроксимация результатов наблюдений топоцентрической траектории ИСЗ ортогональными многочленами Чебышева . . . . .	84
В. А. Ащеулов. Определение координат наземной станции по фотографическим и лазерным наблюдениям известных положений спутников . . . . .	94
Л. Е. Быкова, В. В. Шихалев, В. А. Юрга. Построение численной теории движения IX спутника Сатурна Фебы . . . . .	104
А. Ю. Вольфенгаут. Алгоритм и программа численного усреднения уравнений движения небесных тел . . . . .	114
А. А. Сухотин. Применение метода Гаусса—Альфана—Горячева к изучению эволюции орбит метеорных роев . . . . .	121
П. Б. Бабаджанов, Ю. В. Обрубов. Эволюция орбит и условий встречи с Землей метеорных роев Геминид и Квадрантид . . . . .	125
Г. В. Андреев, Г. О. Рябова. Об одном способе определения чувствительности РЛС при наблюдениях метеоров . . . . .	131
А. М. Черницов, С. С. Краев. О применении методов продолжения в задачах улучшения параметров орбит . . . . .	137
В. М. Григорьевский, С. Я. Колесник, В. В. Калевич. Анализ светового потока, отраженного искусственным спутником Земли. II . . . . .	143
Н. П. Фаст. Наблюдение серебристых облаков в Томске в 1980 г. . . . .	153
В. И. Кириченко, В. В. Сотников. Наблюдение серебристых облаков в Новосибирске . . . . .	157
Н. Т. Светашкова. Определение плотности падающего потока спорадических метеорных тел . . . . .	167
И. Н. Потапов. Радиус и альbedo ядра кометы Веста 1976 VI . . . . .	175
М. Р. Федянин, А. М. Морозов. Некоторые результаты исследования оптических параметров атмосферы . . . . .	178
Рефераты на опубликованные статьи . . . . .	187

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКЕ В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ В 1968—1980 ГОДАХ

Т. В. БОРДОВИЦЫНА

Исследование движения малых тел Солнечной системы — тематика традиционная для астрономов Томского университета. В 1968 г. перед томскими специалистами по небесной механике открылись новые возможности, был создан НИИ прикладной математики и механики при ТГУ и в его рамках лаборатория небесной механики. В течение последующих лет исследования по небесной механике в Томском университете концентрируются в лаборатории небесной механики, а затем в отделе небесной механики и астрометрии НИИ ПММ. За прошедший период сотрудниками отдела и кафедры теоретической и небесной механики получен целый ряд интересных результатов, обративших на себя внимание широкой научной общественности.

В 1968 г. в лаборатории небесной механики Т. В. Бордовицной и А. М. Черниковым были начаты работы по исследованию движения внешних спутников Юпитера. В 1970 г. в эту работу включились аспирантка Л. Е. Быкова и сотрудники лаборатории Т. С. Бороненко, Л. А. Московкина и В. А. Юрга.

В лаборатории собран и обработан обширный наблюдательный материал, составляющий для VI спутника 435 наблюдений, для VII — 171, для VIII — 254, для IX — 85, для X — 43, для XI — 33, охватывающий весь период наблюдения спутников с момента открытия. К началу исследования наименее изученными в системе спутников Юпитера были VI и VII. Существование системы начальных параметров и теории движения, разработанных в ИТА АН СССР В. Ф. Проскуриным и С. С. Токмалаевой, представляли наблюдения со средней квадратической ошибкой  $8''$  для VI спутника Юпитера и  $28''$  для VII спутника [1].

При улучшении орбит этих спутников исследователи столкнулись с рядом трудностей: во-первых, было замечено су-

щественное влияние возмущений в коэффициентах условных уравнений на процесс улучшения орбит в целом, во-вторых, была обнаружена расходимость процесса последовательных приближений в методе Гаусса при грубых начальных приближениях [2, 3].

В связи с этим А. М. Черницовым и Т. В. Бордовицыной [4] было выполнено исследование свойств метода Гаусса, наиболее часто применяемого для улучшения орбит небесных тел.

Итерационные процессы метода Гаусса трактовались как модификации метода Ньютона для решения систем нелинейных уравнений, возникающих при описании процесса улучшения орбит. Такая трактовка метода Гаусса позволила получить совокупность оценок, характеризующих условия сходимости и скорость сходимости рассматриваемых итерационных процессов. Полученная совокупность оценок позволила достаточно просто сравнивать и объяснять изменение свойств метода Гаусса в зависимости от точности определения частных производных от наблюдаемых параметров по оцениваемым (коэффициенты условных уравнений), распределения моментов измерений на временном интервале, выбора момента времени, на который находятся значения определяемых параметров, состава измеряемых и оцениваемых параметров, точности начального приближения.

В связи с тем, что при улучшении орбит начальные приближения определяемых параметров могут находиться вне области сходимости метода Гаусса, была рассмотрена возможность комбинирования его с симплексным методом [5]. На модельных примерах было показано, что последний может быть использован в процессе улучшения орбит небесных тел для получения достаточно хороших начальных приближений с последующим уточнением значений определяемых параметров методом Гаусса. Было показано также, что симплексный метод может быть использован при улучшении орбит небесных тел по выборке измерений нарастающего объема.

Наиболее тщательному исследованию подверглись VI и VII спутники Юпитера.

На основе собранного наблюдательного материала Т. В. Бордовицыной и Л. Е. Быковой [1] были построены численные теории движения VI и VII спутников Юпитера, определены системы начальных параметров, представляющие наблюдения VI спутника со средней квадратической ошибкой  $2''$ , VII —  $2'',5$ , и вычислены эфемериды этих спутников до 2000 г.

Новые системы элементов орбит VI и VII спутников Юпитера, а также выведенные П. Хергетом системы элементов VIII—IX спутников были использованы Л. Е. Быковой, Л. Д. Андреевой и В. А. Юрга [6, 7, 9] для решения задачи совместного определения из наблюдений системы начальных параметров спутников и поправок к массе Юпитера.

Предварительно было исследовано влияние возмущений в значении массы Юпитера на представление наблюдений каждого спутника исходными системами параметров орбит. При этом обратное значение массы планеты варьировалось в пределах  $1047,3 \div 1047,4$ . Полученные результаты показывают, что вариация обратного значения массы Юпитера порядка 0,01 оказывает ощутимое влияние на величину разностей наблюдаемых и вычисленных положений спутника.

Основная трудность, которая возникает при решении задачи совместного определения параметров орбит спутника и значения поправки к массе Юпитера методом Гаусса,— плохая обусловленность систем условных уравнений, определяющих искомые поправки и, следовательно, неустойчивость получаемого решения относительно исходных данных. Поэтому был изменен традиционный подход к решению данной задачи и применен метод, разработанный Гавуриным для решения плохо обусловленных систем линейных уравнений. Метод состоит в выделении устойчивой проекции решения, соответствующей группе «больших» собственных значений нормальной матрицы. В процессе последовательных приближений определения исходных параметров устойчивая проекция принимается за очередное приближение искомого поправки к исправляемым параметрам. Исследование такой обобщенной итерационной схемы, выполненное А. М. Черницовым, Л. Е. Быковой [8, 9], показало, что сходимости данного итерационного процесса к той или иной точке, минимизирующей исходный функционал, зависит от выбора начального приближения. При этом малым вариациям исходных данных соответствуют малые изменения решения. Кроме того, обобщенный итерационный процесс оказался сходящимся в достаточно большой области пространства определяемых параметров в отличие от метода Гаусса, который расходится при любом начальном приближении.

В результате применения к данной задаче описанного выше метода были получены следующие величины обратного значения массы Юпитера [9]:

VI  
1047,369  
IX  
1047,371

VII  
1047,367  
X  
1047,357

VIII  
1047,363  
XI  
1047,366

и соответствующие им системы элементов орбит спутников.

Приведенные величины обратного значения массы достаточно хорошо согласуются с определениями, полученными другими методами.

Для выполнения исследований группой сотрудников лаборатории под руководством Л. Е. Быковой было разработано программное обеспечение, реализующее на ЭВМ совместное численное интегрирование дифференциальных уравнений движения и уравнений в вариациях. Существуют два варианта указанного математического обеспечения. Для ЭВМ М-222 программы написаны в кодах машины и используют в качестве метода интегрирования метод Коуэлла 8-го порядка. Для ЭВМ БЭСМ-6 программы написаны на языке ФОРТРАН, реализованы в мониторной системе «ДУБНА» и используют в качестве метода интегрирования неявный одношаговый метод Батчера — Эверхарта.

Перечисленные программы используют для вычисления возмущений от больших планет фонд координат больших планет ИТА АН СССР (построенный в соответствии с *Astrophysical Papers*, vol. 13): Л. Е. Быковой и В. А. Тамаровым [10] подготовлено программное обеспечение для создания фонда координат больших планет, представленных в виде полиномов Чебышева.

Параллельно с численным исследованием движения внешних спутников Юпитера Т. С. Бороненко выполнялись работы [11, 12] по созданию аналитических теорий движения этих спутников. В работах Т. С. Бороненко в качестве исходной системы дифференциальных уравнений была взята система уравнений Лагранжа, а не каноническая система уравнений, как это делается обычно. Соответственно был разработан алгоритм метода Ли в кеплеровых элементах и показано, что для любых задач использование кеплеровых элементов не выводит за рамки теории Ли для канонических систем.

За основной малый параметр создаваемой теории был принят постоянный параметр, являющийся средним движением Солнца, вместо применяемого другими авторами (Делоне, Депри и др.) переменного параметра, представляющего собой отношение средних движений Солнца и спутника. Использование постоянного параметра позволило применить для

построения контактных преобразований ряды Ли, что заметно упростило алгоритм.

Для создания аналитической теории движения был разработан комплекс процедур РП (ряды Пуассона), позволяющий выполнять на ЭВМ операции над рядами Пуассона, комплекс процедур ПУ (программа усреднения), реализующий отдельные этапы алгоритма, и комплекс программ АЭ (аналитическая эфемерида), позволяющий вычислять эфемериду конкретного объекта с помощью полученных буквенных разложений. Комплексы программ написаны на языке АЛЬФА-6 для ЭВМ БЭСМ-6,

Конечным результатом проделанной работы являются прямые и обратные преобразования элементов, записанные в виде рядов Пуассона и устанавливающие связь постоянных аналитической теории и оскулирующих элементов орбиты. Причем прямые и обратные преобразования элементов получены с точностью до 6-го порядка относительно малого параметра. Разложение по эксцентриситетам и наклонам также выполнено до шестого порядка. Средние движения долготы и долготы узла найдены с точностью до 9-го порядка относительно малого параметра, среднее движение перицентра — до 15-го порядка.

Полученные разложения применены к созданию аналитических теорий движения VI, VII и X спутников Юпитера.

В качестве исходных систем начальных параметров использованы системы, полученные численно для VI спутника — Л. Е. Быковой, VII спутника — автором и X спутника — П. Хергетом. Для указанных объектов точность вычисления постоянных теории по формулам обратного перехода составляет  $0'', 1-0'', 5$ . Расхождение аналитической и численной эфемерид на интервале времени в 50 лет составляет для VI и X спутников  $1''$ , для VII спутника  $2''-3''$ . Результаты численных и аналитических исследований движения внешних спутников Юпитера изложены в обзорной работе [13]. Л. А. Московкиной была предпринята попытка построения аналитической теории движения VII спутника Юпитера методом Хилла-Брауна, используя для проведения буквенных операций на ЭВМ систему программирования Авто-Аналитик. Была построена аналитическая теория движения VII спутника Юпитера третьего порядка [14]. Эта работа показала, что непосредственное использование универсальной системы Авто-Аналитик не рационально в задачах небесной механики. В связи с этим Ю. Б. Шмидтом [15] была разработана специальная система буквенных операций над рядами в Авто-Ана-



литике (БОРА), учитывающая особенности математического аппарата небесной механики.

Работа по созданию аналитических теорий движения внешних спутников Юпитера в лаборатории продолжается. Л. Е. Быковой, В. В. Шихалевым и В. А. Юрга [16] в настоящее время начаты работы по созданию теории движения внешних спутников Сатурна. Т. В. Бордовицкой, Л. Е. Сухоплюевой, Н. А. Шарковским [17—19] и Ю. А. Федяевым ведутся работы по созданию высокоточных численных алгоритмов прогнозирования пространственных положений небесных тел. Т. В. Бордовицкой, В. А. Шефером, Б. Т. Хариним [20] выполняются исследования движения группы особых малых планет. А. М. Черницовым и С. С. Краевым продолжают работы по применению нетрадиционных методов в задаче улучшения орбит небесных тел.

В течение всего периода существования лаборатории большой группой сотрудников под руководством Т. В. Бордовицкой и Л. Е. Быковой ведутся работы по исследованию движения искусственных спутников Земли. Создана численная модель движения ИСЗ, позволяющая исследовать особенности движения ИСЗ различных классов орбит. Разрабатываются аналитические и полуаналитические алгоритмы прогнозирования движения ИСЗ. Многие результаты нашли применение в практике. Совместно с кафедрой небесной механики ЛГУ начата работа по исследованию эволюции Солнечной системы.

По материалам исследований защищено пять кандидатских диссертаций, опубликовано две монографии и более ста печатных работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бордовицкая Т. В., Быкова Л. Е. Теория движения и эфемериды VI и VII спутников Юпитера на 1979—2000 гг.—Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1978.—120 с.
2. Бордовицкая Т. В. О влиянии вековых возмущений на коэффициенты условных уравнений VII спутника Юпитера.—Астрономия и геодезия. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1973, вып. 2, с. 37—45.
3. Черницов А. М. Анализ некоторых упрощенных схем определения оценок параметров движения небесных тел.—Астрономия и геодезия. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1975, вып. 5, с. 6—19.
4. Бордовицкая Т. В., Черницов А. М. Применение модификаций метода Ньютона к задаче определения параметров движения космических аппаратов.—В кн.: Труды XI чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. М., 1978, с. 71—76.

5. Черницов А. М., Быкова Л. Е. Применение симплексного метода и обобщенного итерационного процесса Ньютона при определении оценок параметров движения космических объектов по данным измерений.— Динамика движения ИСЗ. М., 1978, с. 23.

6. Андреева Л. Д., Быкова Л. Е. Определение массы Юпитера из анализа наблюдений его IX и X спутников.— Труды Томск. ун-та. Астрономия и геодезия. 1973, т. 251, вып. 44, с. 84—92.

7. Быкова Л. Е., Юрга В. А. Об определении массы Юпитера из наблюдений его VII и VIII спутников.— Астрономия и геодезия. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1977, вып. 6, с. 42—46.

8. Черницов А. М. О применении одного обобщенного итерационного метода при оценивании параметров движения небесных тел.— Астрономия и геодезия. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1977, вып. 6, с. 47—55.

9. Быкова Л. Е. Об определении массы Юпитера по движению его внешних спутников.— Бюллетень ИТА, 1979, том. 14, вып. 7, с. 402—406.

10. Быкова Л. Е., Тамаров В. А. Полиномиальное представление прямоугольных гелиоцентрических координат больших планет на 1800—2000 годы.— Астрономия и геодезия. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1981, вып. 9, с. 40—47.

11. Бороненко Т. С. Алгоритм для реализации в системе Авто-Аналитик метода усреднения уравнений возмущенного движения в кеплеровых элементах, основанного на преобразованиях Ли.— Астрономия и геодезия. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1975, вып. 5, с. 27—45.

12. Бороненко Т. С. Применение преобразований Ли к решению задачи Делоне до третьего порядка.— Астрономия и геодезия. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1977, вып. 6, с. 18—25.

13. Бордовицына Т. В., Бороненко Т. С., Быкова Л. Е., Черницов А. М. Численные и аналитические теории движения внешних спутников Юпитера.— Труды IV научных чтений по космонавтике, посвященных памяти выдающихся советских ученых—пионеров освоения космического пространства. Прикладная небесная механика и управление движением. М., 1980, с. 191—197.

14. Московкина Л. А. Алгоритм решения в системе Авто-Аналитик ограниченной задачи трех тел методом Хилла-Брауна.— Астрономия и геодезия. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1975, вып. 5, с. 46—52.

15. Шмидт Ю. Б. Система БОРА проведение буквенных операций над рядами Пуассона.— Астрономия и геодезия. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1981, вып. 9, с. 27—30.

16. Быкова Л. Е., Шихалев В. В., Юрга В. А. Построение численной теории движения IX спутника Сатурна Фебы (настоящий сборник).

17. Бордовицына Т. В., Сухоплюева Л. Е. Исследование численных алгоритмов, использующих стабилизирующие преобразования.— Бюллетень ИТА, 1980, т. 14, № 10, с. 591—596.

18. Бордовицына Т. В. Современные численные методы в задачах небесной механики.— М.: Наука, 1984.— 137 с.

19. Бордовицына Т. В., Шарковский Н. А., Федяев Ю. А. Современные численные методы в задачах прогнозирования движения ИСЗ.— В кн.: Определение и моделирование движения ИСЗ и гравитационного поля. Новосибирск, 1980, с. 24—44.

20. Бордовицына Т. В., Шефер В. А., Харин Б. Т. Исследование движения особых малых планет.— В кн.: Определения координат небесных тел. Рига, 1981, с. 77—85.

Поступила в редакцию в ноябре 1980 г.