

На правах рукописи

ШИШОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ

ПОСТРОЕНИЕ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ ФОБОСА ДЛЯ НАВИГАЦИОННОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЕКТА ФОБОС-ГРУНТ

Специальность 01.02.01- теоретическая механика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2008

Работа выполнена в Институте прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН.

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор Аким Эфраим Лазаревич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Голубев Юрий Филиппович,
кафедра теоретической механики,
механико-математический факультет
МГУ им. М.В. Ломоносова.

доктор физико-математических наук,
Емельянов Николай Владимирович,
отдел небесной механики ГАИШ
МГУ им. М.В. Ломоносова.

Ведущая организация: Институт космических исследований РАН.

Защита диссертации состоится « 14 октября » 2008 г. в «11» час. на заседании диссертационного совета Д 002.024.01 при Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Автореферат разослан « 11 » сентября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Т.А. Полилова

Общая характеристика работы

Актуальность темы

На 2009 год в России запланирован полёт космического аппарата (КА) Фобос-Грунт с целью доставки на Землю образцов грунта спутника Марса Фобоса. Он будет проходить по следующей схеме: перелёт КА от Земли к Марсу, выход на орбиту спутника Марса, движение вокруг Марса по орбитам наблюдения и квазисинхронной орбите, посадка на Фобос, забор грунта и старт по направлению к Земле. Баллистико-навигационное обеспечение (БНО) этого проекта предусматривает совместное определение параметров орбиты КА и параметров орбиты Фобоса. К точности определения параметров движения КА относительно Фобоса предъявляются высокие требования: ошибка относительного положения не должна превышать 3 км, а ошибка относительной скорости 1 м/сек. Это необходимо для безопасной посадки спускаемого аппарата на выбранное место на Фобосе.

Такие точности относительного движения КА достигаются как путём использования радиотехнических траекторных измерений КА, проводимых с наземных измерительных пунктов, так и наблюдениями поверхности Фобоса с борта КА. К последним относятся телевизионные изображения Фобоса и измерения лазерного дальномера, проводящиеся с орбит наблюдения и квазисинхронной орбиты. Вблизи Фобоса аппарат должен выполнить ряд сложных динамических операций, обеспечивающих переход на орбиту с заданными параметрами перед посадкой. При этом КА будет находиться в сфере действия гравитационных полей Солнца, Марса и Фобоса. Из-за воздействия полей Марса и Фобоса его орбита значительно отличается от эллиптической, что создаёт большие трудности для БНО в плане применения аналитических методик. Они могут быть преодолены только при использовании высокоточной численной модели движения КА. При этом дифференциальные уравнения для Фобоса и КА должны быть совместимыми, интегрироваться одновременно и использовать одинаковые астрономические постоянные, поскольку уточнение параметров орбит КА и Фобоса должно происходить в рамках единой модели.

Учитывая сказанное, тема диссертации, посвящённой построению численной теории движения Фобоса для навигационного обеспечения полёта КА Фобос-Грунт, является актуальной.

Целью работы является:

- Построение эфемериды Фобоса, предназначенной для использования, как в проектных расчётах, так и для навигационного обеспечения полёта КА вблизи Фобоса.
- Оценка точности полученной эфемериды.
- Разработка методики построения и основных элементов программного комплекса, предназначенного для совместного определения орбит КА и

Фобоса.

- Уточнение векового ускорения и массы Фобоса.

Научная новизна работы

- По измерениям, охватывающим протяжённый интервал 128 лет, разработана теория движения Фобоса на основе динамической модели, базирующейся на законах движения материального тела и не содержащей избыточного количества уточняемых параметров. Такой подход обеспечивает расчёт параметров движения КА и Фобоса в рамках единой высокоточной модели движения. Эта модель опирается на использование наиболее достоверных астрономических постоянных. Большая часть теорий разработанных ранее базируется на аналитическом расчёте и содержит избыточное число взаимозависимых уточняемых параметров, что делает невозможным совмещение этих теорий с динамикой движения КА.
- Предложен метод совместного уточнения параметров движения КА и Фобоса по данным наземных оптических измерений Фобоса и измерений, выполненных с борта космических аппаратов. Метод разделяет задачу формирования системы нормальных уравнений на несколько подсистем, каждая из которых представляет собой задачу обработки определённого набора измерений на текущей итерации.
- Предложен метод обработки радиотехнических измерений КА, проводящихся вблизи Фобоса. Эти измерения наиболее чувствительны к изменению положения Фобоса из-за влияния его притяжения на орбиту КА. Учёт этого явления важен при построении теории движения Фобоса и для этой цели применяется впервые.
- Впервые для уточнения орбиты использованы наблюдения прохождений Фобоса по диску Солнца с американских марсоходов, находящихся на поверхности Марса.

Практическая значимость работы

Реализованная методика построения программного комплекса и его основные элементы будут использованы при навигационном обеспечении полёта КА Фобос-Грунт. Эфемерида Фобоса используется в настоящее время для проектных расчётов при моделировании движения КА на различных участках полёта.

Результаты, выносимые на защиту

- Численная теория движения Фобоса, предназначенная для БНО полёта КА Фобос-Грунт, основанная на динамической модели, не содержащей избыточного количества уточняемых параметров на мерном интервале 128 лет.
- Методика построения программного комплекса, предназначенного для совместного определения параметров орбит КА и Фобоса.
- Разработанные методы и алгоритмы моделирования наземных оптических измерений Фобоса, телевизионных измерений, проведённых

с борта КА, лазерных измерений, выполненных КА Mars Global Surveyor.

- Методика использования для уточнения теории движения Фобоса наблюдений прохождения Фобоса по диску Солнца с аппаратов, находящихся на поверхности Марса.
- Метод совместного уточнения параметров движения КА и Фобоса по данным наземных радиотехнических измерений, содержащих информацию о гравитационном влиянии Фобоса на движение КА.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- Семинар ИПМ им. М.В. Келдыша «Солнечная система и смежные проблемы физики и механики» под руководством академика РАН Марова М.Я., член-корр. РАН проф. Акима Э.Л., проф. Колесниченко А.В, дважды в 2006 и 2007 годах.
- Семинар кафедры небесной механики ГАИШ, 2006 г.
- 17-ый международный симпозиум по динамике космического полёта, Россия, Москва, 2003 г.
- 18-ый международный симпозиум по динамике космического полёта, Германия, Мюнхен, 2004 г.
- 20-ый международный симпозиум по динамике космического полёта, США, Аннаполис, 2007 г.

Публикации по теме диссертации приведены в списке работ в конце автореферата.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и библиографического списка из 115 наименований. Работа изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка, 16 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** дан обзор работ выполненных ранее и посвящённых теории движения Фобоса. Указано, что разработанные теории можно разделить на два типа - динамической и кинематической (в терминологии Синклера (Sinclair (1989))). Динамические модели предполагают использование наиболее достоверных астрономических постоянных, которые не входят в число уточняемых параметров, а также необходимых эфемерид тел, возмущающих движение рассматриваемого объекта. К таковым относятся эфемериды и гравитационные постоянные планет и Солнца, параметры гравитационных полей Марса и Фобоса, эфемерида и гравитационная постоянная Деймоса. Все

эти возмущающие факторы влияют на движение КА и Фобоса. Для правильного учёта возмущающего действия полей использованы формулы, рекомендованные Международным астрономическим союзом (МАС). Однако для Фобоса использование этого минимально необходимого набора констант оказывается недостаточным.

Сущность кинематического подхода состоит в том, что в результате упрощения уравнений движения и введения множества параметров, необходимых при этом, получаются уравнения, которые можно решить аналитически последовательными приближениями, сохраняя в правых частях сначала вековые, потом периодические члены. Сами уравнения записываются таким образом, чтобы угловые параметры орбиты Фобоса отсчитывались от специально выбранной плоскости – плоскости Лапласа, в которой большие периодические возмущения от сжатия Марса и от Солнца уничтожают друг друга. Основными опорными плоскостями являются плоскость инерциальной системы координат (экватор эпохи) и плоскость Лапласа. В результате появляется необходимость отслеживания вращения этой плоскости. В итоге возникает избыточное количество уточняемых параметров, которые выступают как параметры согласования той или иной теории с измерениями.

К таковым теориям относятся теории Синклера (Sinclair, 1972) или Якобсона (Jacobson, 1989). Во втором случае число уточняемых параметров составляет 14. Версию теории Синклера от 1989 года сам он называет динамической. В целом с этим можно согласиться, поскольку 17 уточняемых параметров (для Фобоса) включают в себя некоторые физические параметры, относящиеся к полю Марса, его вращению, т.е. параметры динамически увязаны с принятой моделью, их число, по словам Синклера, минимально, не динамический параметр – вековое ускорение. Автор признаёт, что часть параметров известна лучше из других источников, а их уточнение служит в качестве проверки и для оценки достоверности принятой модели.

К подобной теории следует отнести и теорию движения, разработанной коллективом авторов из ГАИШ – Емельянов, Вашковьяк, Насонова (Emelyanov et al, 1993). Была использована оригинальная аналитическая теория движения спутников планет. Эта теория является динамической (исключение - вековое ускорение). В число уточняемых параметров включены 3 коэффициента разложения потенциала Марса по сферическим функциям, гравитационная постоянная Марса, координаты северного полюса и константы его прецессии, параметры, характеризующие ориентацию Солнечной системы относительно системы координат, связанной со звёздами.

Кинематический подход реализован в работах Шора (Shor, 1975, Шор, 1988), Морли (Morley, 1990), Шапрон-Тузе (Shapront-Touze, 1988,1990). В этом смысле последняя работа является наиболее продвинутой: она учитывает практически все возмущающие факторы вплоть до влияния гравитационного поля Фобоса на его поступательное движение. В ней прямоугольные координаты Фобоса представлены в виде рядов Фурье с коэффициентами в

виде линейных комбинаций фундаментальных аргументов. В результате уточняются не только 6 средних элементов, но и поправки к средним движениям перицентра и узла, вековое ускорение Фобоса, что характерно для кинематического подхода.

Для описания векового изменения в долготе все авторы вводят дополнительный уточняемый параметр. Явление замедления в движении Фобоса открыл Шарплесс в 1945 году (Veverka, 1980). Оно свидетельствует о потере энергии Фобоса вследствие приливного эффекта внутри Марса. Учёт этого явления в данной работе осуществляется в рамках традиционного аналитического подхода изменением долготы Фобоса, а не путём включения в уравнения движения Фобоса наряду с другими возмущающими факторами, что даёт вычислительную эффективность и возможность прямого сравнения с результатами ранее сделанных работ.

Создание численной теории движения космического объекта с использованием разного типа измерений предполагает моделирование движения с учётом разнообразных возмущающих факторов, моделирование этих измерений с учётом их влияния на формирование орбиты, создание алгоритмов уточнения параметров движения, прогнозирование движения объекта и оценку точности орбиты в необходимом интервале времени. Все перечисленные этапы осуществляются в рамках принятых моделей времени и систем координат. Поэтому в первой главе описаны используемые в работе шкалы времени и системы координат. Разные типы возмущений удобно описывать и вычислять в разных системах координат. Например, возмущения от гравитационного поля планеты вычисляются в системе координат, связанной с фигурой этой планеты, которая совершает вращательное движение. Сами же уравнения движения описываются в инерциальной системе координат. Значит, возмущающие ускорения необходимо переводить из одной системы в другую. Сами измерения могут быть приписаны к разнообразным инерциальным системам, т.е. необходимо при переходе от системы к системе выполнять редуцирующие вычисления и т.д. Необходимый материал по установлению связей между использованными системами координат содержится в главе 1.

Глава 2 посвящена описанию модели движения Фобоса. Модель учитывает возмущающие ускорения, вызванные нецентральностью поля тяготения Марса, гравитационное влияние Солнца, Деймоса, планет, вековое ускорение Фобоса, возникающее из-за воздействия приливных сил, а также влияние гравитационного поля Фобоса на его поступательное движение вокруг Марса.

Расчет кинематических параметров Фобоса осуществляется численным интегрированием уравнений его движения в элементах, чем достигается увеличение скорости интегрирования по сравнению с интегрированием в прямоугольных координатах. Уравнения учитывают все упомянутые выше возмущения, за исключением воздействия приливных сил. В настоящей работе

вековое смещение Фобоса вдоль своей траектории производится изменением момента времени t_{Ω}^i прохождения ближайшего к текущему моменту времени t узла орбиты, на величину $\Delta t = v_{\tau}(t - t_0)^2 / 2$, где t_0 начальный момент измерения времени (начальная эпоха). Такой подход полностью эквивалентен традиционному изменению долготы, но больше соответствует используемой форме записи уравнений движения и набору орбитальных элементов. Коэффициент v_{τ} связан с вековым ускорением в долготе формулой $v_L = nv_{\tau} / 2$.

Модифицированное представление возмущающей функции от поля Марса позволяет его использование в окрестности полюсов, что важно с вычислительной точки зрения для орбиты КА. Кроме того, используются ненормализованные коэффициенты, что повышает скорость вычислений. Для вычисления возмущений от Солнца и планет используются таблицы эфемерид DE405. Они были переписаны с сайта с адресом horizons@ssd.jpl.nasa.gov на интервале 1800-2100 гг. в формате, который поставляет источник эфемерид и преобразованы в полиномы Чебышева для каждой планеты и Луны, для чего использовались специально написанные программы.

Влияние измерений $\bar{\psi}_o$ на процесс уточнения параметров движения \bar{q}_0 объекта осуществляется через производные от расчётных значений $\bar{\psi}_c(\bar{X}(\bar{q}(\bar{q}_0, t)))$ измерений по уточняемым параметрам. Здесь $\bar{X}(\bar{q}(\bar{q}_0, t))$

вектор состояния $\bar{X} = \begin{Bmatrix} \bar{r} \\ \bar{v} \end{Bmatrix}$ из вектора прямоугольных координат \bar{r} и вектора

скорости \bar{v} . Получение уравнений в вариациях для элементов $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial \bar{q}_0} \right) = \bar{G}(t, \bar{q})$ трудная задача. Проще, исходя из уравнений движения в

прямоугольных координатах $\frac{d\bar{X}}{dt} = \bar{F}(\bar{X})$, написать уравнения в вариациях в

прямоугольных координатах $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{X}_0} \right) = \frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{X}} \frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{X}_0}$ и воспользоваться

соотношением $\frac{\partial \bar{\psi}_c(t_c)}{\partial \bar{q}_0(t_0)} = \frac{\partial \bar{\psi}_c(t_c)}{\partial \bar{X}(t_c)} \frac{\partial \bar{X}(t_c)}{\partial \bar{X}_0(t_0)} \frac{\partial \bar{X}_0(t_0)}{\partial \bar{q}_0(t_0)}$. Итак, для получения

производных от вычисленного вектора измерений на момент измерения по уточняемым параметрам необходимо интегрировать уравнения в вариациях в

форме для прямоугольных координат, вычислять градиенты $\frac{\partial \bar{\psi}_c(t_c)}{\partial \bar{X}(t_c)}$ и иметь

на момент начальных условий матрицу производных $\frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{q}}$. Эта матрица

выписана в явном виде, градиенты выписаны для каждого типа измерений. Поскольку к точности вычисления производных высокие требования не предъявляются (они применяются в итерационном сходящемся процессе), то и в правых частях уравнений в вариациях возмущения учитываются в упрощённом виде: от Солнца и планет, от поля Марса используется возмущение только от сжатия.

По радиотехническим измерениям КА с Земли при условии, что КА близко подходит к Фобосу (гравитационные измерения), можно поставить задачу уточнения μ_{Ph} . Для этого надо знать значения $\frac{\partial \bar{X}_{КА}}{\partial \mu_{Ph}}$ на момент

измерения ($\bar{X}_{КА}$ вектор состояния КА), что также достигается интегрированием шести уравнений в вариациях

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \bar{X}_{КА}}{\partial \mu_{Ph}} \right) = \frac{\partial \bar{F}_1}{\partial \mu_{Ph}} + \frac{\partial \bar{F}_2}{\partial \bar{X}_{КА}} \frac{\partial \bar{X}_{КА}}{\partial \mu_{Ph}}, \text{ где } \bar{F}_1 = \mu_{Ph} \left(\frac{\bar{r} - \bar{r}_{КА}}{|\bar{r} - \bar{r}_{КА}|^3} - \frac{\bar{r}}{|\bar{r}|^3} \right),$$

а \bar{F}_2 представляет собой сумму возмущений от Марса, поля Марса, Солнца, планет и Фобоса.

Для уточнения векового ускорения Фобоса ν необходимо знать его влияние на текущее значение вектора $\bar{\psi}_c(t)$, соответствующее вектору измерения $\bar{\psi}_o(t)$, т.е. производную $\frac{\partial \bar{\psi}_c}{\partial \nu}$. Для её вычисления необходимо

после исправления времени прохождения узла $t_\Omega = t_\Omega + \nu(t - t_0)^2 / 2$, где t_0 начальная эпоха, определить матрицу $\frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{q}}$ и сделать умножение

$$\frac{\partial \bar{\psi}_c}{\partial \nu} = \frac{\partial \bar{\psi}_c}{\partial \bar{X}} \frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{q}} \frac{\partial \bar{q}}{\partial \nu}, \text{ где } \left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial \nu} \right)^T = \{0, 0, 0, 0, 0, (t - t_0)^2 / 2\}.$$

В этой же главе приведены значения гравитационных постоянных планет и Солнца, полей Марса и Фобоса.

Глава 3 посвящена описанию всех типов измерений и методикам их вычислений вместе с градиентами. При построении теории использованы оптические измерения на интервале времени 1877-1989 годы, телевизионные измерения Фобоса с борта КА Mariner-9 (1971-1972 годы), Viking (1976-1978 годы), Фобос-2 (1989 год), Mars Express (2005 год), измерения лазерного дальномера (MOLA) с борта Mars Global Surveyor (MGS) (1998год), измерения углового расстояния между центром Фобоса и центром солнечного диска при

наблюдениях с находящихся на поверхности Марса американских роверов Spirit и Opportunity (2004 год). Траекторные измерения КА, находящегося вблизи Фобоса, содержат важную информацию о его гравитационной постоянной. Такие измерения были использованы для КА Фобос-2 и MGS, поскольку они сближались с Фобосом и под воздействием его гравитации меняли траекторию. Виды измерений показаны на рис. 1. Здесь же пунктиром показано место будущего КА Фобос-Грунт и виды измерений, которые будут проводиться с его борта и со станций слежения на Земле.

Оптические измерения начали проводить в 19 веке и продолжались весь 20 век на нескольких обсерваториях. В следующих таблицах 1-3 представлены сведения о типах измерений, мерных интервалах, количестве измерений, а также их качестве через значение среднеквадратической ошибки (СКО) рассогласований измеренных значений от расчётных, полученных после окончательной обработки всех измерений. Измерения состоят из пар (S, P) , (dx, dy) , (da, dd) , образующих три типа, и являются дифференциальными, т.е. они сделаны относительно центра Марса в картинной плоскости телескопа.



Рис.1. Виды измерений Фобоса.

Сама экваториальная система, с которой соотнесены измерения, может быть привязана либо к дате измерения, либо фиксируется на одну из стандартных эпох. Возможны разнообразные комбинации, при этом для получения расчётного значения необходимо переходить из системы координат, в которой

получаются прямоугольные координаты объекта и Марса (J2000) в эпоху измерений. Такая же трансформация необходима для измерительного пункта на Земле. Вычисленные градиенты из эпохи измерений переводятся в эпоху J2000. Вектора определяются с учётом времени распространения света.

Наблюдения Фобоса с космических аппаратов проводятся с 1971 года. Впервые это сделал Mariner-9. Состав измерений представлен в Таблице 4. С американских аппаратов Mariner-9, Viking были получены изображения Фобоса на фоне звёздного неба, они были преобразованы в координаты центра фигуры Фобоса – прямое восхождение и склонение α, δ в инерциальной геоэквиаториальной системе координат B1950. с центром в КА. На телевизионных снимках с КА Фобос-2 не удалось получить изображения опорных звёзд, и привязка к инерциальной системе осуществлялась с использованием данных системы ориентации КА, что приводит к ухудшению точности координат Фобоса. Для европейского КА Mars Express координаты Фобоса α, δ даются в той же системе координат, но эпохи J2000. Координаты КА $x_{КА}, y_{КА}, z_{КА}$ считаем известными в той же системе. Поскольку пара углов α, δ получается в результате обработки одного снимка, эти измерения не являются независимыми наблюдениями, они должны рассматриваться как векторное измерение и сопровождаться ковариационной матрицей ошибок. Для описания телевизионных измерений проводится следующее построение: угловые координаты α, δ преобразуются в координаты единичного вектора, направленного от КА к центру Фобоса. Вычисляются координаты этого вектора-измерения в системе J2000. Вычисляется весовая матрица из предположения одинаковой точности по разным направлениям от линии визирования. Формируется пакет измерений, в который входят также координаты КА. В процессе интегрирования по достижении времени из пакета вычисляется тот же самый вектор и производные от его компонент по координатам и компонентам скорости Фобоса. Эти производные и рассогласования компонент векторов задействованы в процессе определения орбит (см. главу 4). Для КА Mariner-9, Viking, Фобос-2, Mars Express координаты считаются известными, они определялись в ходе полётов этих КА. В предстоящей миссии Фобос-Грунт координаты КА будут определяться в ходе совместного уточнения орбит как Фобоса, так и КА, в том числе и по угловым измерениям Фобоса. Следовательно, необходимо знать производные по координатам и скоростям КА в эпохе J2000. Формулы приводятся.

Результаты лазерной локации (MOLA) поверхности Фобоса взяты с сайта <ftp://tftp.gsfc.nasa.gov/projects/tharsis/MOLA/PHOBOS/>. Для использования этих измерений необходимо знать вектор Марс-Фобос \bar{r}_{MPh} и вектор Марс-КА \bar{r}_{MKA} . Сайт информационной системы NAIF для получения

Таблица 1. Измерения углового расстояния Фобоса от Марса S и позиционного угла P (Тип 0).

Международный номер обсерватории, её название, мерный интервал	Угловое расстояние S		Позиционный угол P	
	Количество измерений	СКО "	Количество измерений	СКО °
(001) Crowborough 1909	9	0.96	44	2.00
(084) Пулково 1886-1988	25	0.56	25	1.09
(503)Cambridge 1894	54	0.60	26	2.29
(522) Strasbourg 1896-1909	7	0.60	7	3.26
(662) Lick 1888-1924	607	0.31	335	1.03
(689) Flagstaff 1969-1986	5	0.15	5	0.17
(742) Drake 1877-1879	13	1.29	14	2.92
(786) USNO 1894-1988	133	0.59	145	0.97
(787) USNO 1877-1892	113	0.79	112	1.20
(802) Harvard 1877-1879	20	1.25	96	1.83
(950) LaPalma 1988	88	0.15	88	0.23

Таблица 2. Измерения положения Фобоса относительно центра Марса в прямоугольных координатах dx, dy (Тип 1).

Международный номер обсерватории, её название, мерный интервал	Координата dx		Координата dy	
	Количество измерений	СКО "	Количество измерений	СКО "
(084) Пулково 1956-1988	44	0.76	44	0.59
(085) Киев 1971-1988	113	1.15	114	0.83
(094)Крым Симеиз 1988	3	0.60	3	0.84
(114) Engelhardt 1988	6	0.44	6	0.63
(119)Abastumany 1971-1988	104	0.71	103	0.66
(129)Ordubad 1986-1988	334	0.67	335	0.70
(188)Shokin Majdanak 1988	179	0.88	183	0.48
(662)Lick 1924	4	0.75	4	0.28
(689)Flagstaff 1982-1986	71	0.42	71	0.45
(754)Yerkes 1909	7	0.27	7	0.31
(771)Boyeos Havana 1988	23	0.63	23	0.42
(786)USNO 1907-1988	149	0.32	154	0.36
(820)Tarija 1988	48	2.27	49	0.72

данных по КА MGS <ftp://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/MGS/> предоставляет средства генерации векторов MGS $\bar{r}_{MKA} = \{x_{MKA}, y_{MKA}, z_{MKA}\}$ на любой момент

Таблица 3. Измерения положения Фобоса относительно центра Марса в прямоугольных координатах повернутой системы da, dd (Тип 2).

Международный номер обсерватории, её название, мерный интервал	Координата da		Координата dd	
	Количество измерений	СКО "	Количество измерений	СКО "
(084) Пулковое 1894-1896	44	0.25	33	0.19
(662) Lick 1909-1924	38	0.33	38	0.28
(786) USNO 1911-1929	46	0.34	49	0.29

Таблица 4. Наблюдения Фобоса с космических аппаратов.

Название КА	Интервал наблюдений	Количество измерений	Примечание
Mariner-9	1971/11/27-1972/03/03	48	Астрометрия
Viking	1976/07/24-1980/07/06	164	Астрометрия
Фобос-2	1989/02/21-1989/03/25	37	Астрометрия
MGS	1998/09/12 (~ 1 минута)	628	Локация
Opportunity	2004/03/07	1	Затмение
	2004/03/10	1	
	2004/03/12	1	
Spirit	2004/04/18	1	Затмение
MEX	2004/05/18-2004/12/30	22	Астрометрия

времени в виде программ на языке Фортран. Поскольку указываются координаты точки на поверхности Фобоса S , от которой отражается сигнал, в виде расстояния от центра масс d_s , широты φ_s , долготы λ_s , то в моделировании измерений можно учесть рельеф, что уменьшает методологическую ошибку. Данные системы NAIF о координатах КА MGS использовались в качестве начального приближения и уточнялись в процессе определения орбит КА и Фобоса. Тот же процесс будет происходить в ходе оперативного уточнения орбит Фобоса и КА Фобос–Грунт. Соответствующие формулы для градиентов получены.

В 2004 году с поверхности Марса американскими марсоходами Spirit и Opportunity были проведены 4 наблюдения прохождения Фобоса по диску Солнца (Bell et al, 2005). Результаты этих наблюдений после обработки, которая проводилась с использованием американской эфемериды Фобоса, представлены в таблице 6. В первом столбце этой таблицы для каждой даты проведения сеанса измерения указано время прохождения минимального

расстояния α_o между центром видимого диска Солнца и центром фигуры Фобоса. Значение α_o приводится в третьем столбце таблицы. Мы соотносим время прохождения минимального расстояния с серединой интервала наблюдений.

После определения направлений из точки S , где находится марсоход, на Фобос $\bar{e}_{SPh} \equiv \{e_{SPhx}, e_{SPhy}, e_{SPhz}\} = \frac{\bar{r}_{SPh}}{r_{SPh}}$ и на центр Солнца (с учётом

распространения света от Солнца до Марса) $\bar{e}_{SSun} \equiv \{e_{SSunx}, e_{SSuny}, e_{SSunz}\} = \frac{\bar{r}_{SSun}}{r_{SSun}}$

определяется угол $\alpha_c = \arccos(e_{SSunx}e_{SPhx} + e_{SSuny}e_{SPhy} + e_{SSunz}e_{SPhz})$ и вычисляются компоненты градиента

$$\frac{\partial \alpha_c}{\partial x_{Ph}} = -\frac{1}{r_{SPh}^3 \sqrt{1 - (\bar{e}_{SSun} \bar{e}_{SPh})^2}} [e_{xSSun} ((y_{Ph} - y_S)^2 + (z_{Ph} - z_S)^2) -$$

$$e_{ySSun} ((y_{Ph} - y_S)(x_{Ph} - x_S)) - e_{zSSun} (z_{Ph} - z_S)(x_{Ph} - x_S)]$$

$$\frac{\partial \alpha_c}{\partial y_{Ph}} = -\frac{1}{r_{SPh}^3 \sqrt{1 - (\bar{e}_{SSun} \bar{e}_{SPh})^2}} [e_{ySSun} ((x_{Ph} - x_S)^2 + (z_{Ph} - z_S)^2) -$$

$$e_{xSSun} ((x_{Ph} - x_S)(y_{Ph} - y_S)) - e_{zSSun} (z_{Ph} - z_S)(y_{Ph} - y_S)]$$

$$\frac{\partial \alpha_c}{\partial z_{Ph}} = -\frac{1}{r_{SPh}^3 \sqrt{1 - (\bar{e}_{SSun} \bar{e}_{SPh})^2}} [e_{zSSun} ((y_{Ph} - y_S)^2 + (x_{Ph} - x_S)^2) -$$

$$e_{xSSun} ((x_{Ph} - x_S)(z_{Ph} - z_S)) - e_{ySSun} (y_{Ph} - y_S)(z_{Ph} - z_S)]$$

$$\frac{\partial \alpha_c}{\partial v_{xPh}} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_c}{\partial v_{yPh}} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_c}{\partial v_{zPh}} = 0$$

Под гравитационными измерениями будем понимать радиоизмерения за движением КА вблизи Фобоса, проводимые со станций слежения на Земле. К ним относятся главным образом измерения радиальной скорости. Они наиболее чувствительны к изменению положения Фобоса вследствие влияния его притяжения на орбиту КА. Эти измерения наряду с другими видами информации были использованы для построения теории движения Фобоса. Для этой цели разработаны две задачи совместного уточнения параметров движения КА и Фобоса:

- Фобос \bar{E}_{Ph}^0 , КА Фобос-2 \bar{E}_{SC1}^0 с параметрами манёвров, гравитационная постоянная Фобоса μ , вековое ускорение Фобоса ν ;
- Фобос \bar{E}_{Ph}^0 , КА MGS \bar{E}_{SC2}^0 .

В качестве гравитационных измерений использованы измерения радиальной

скорости КА Фобос-2 и однопутевые доплеровские измерения частоты при излучении с борта КА MGS на Землю. Первичная обработка измерений КА Фобос-2 была проведена в ходе полёта аппарата в 1989 году. Измерения представляют собой двухпутевой доплер, преобразованный в величину радиальной скорости. Моделирование таких измерений делается с учётом эффекта Шапиро.

Навигация КА MGS на участке пролёта Фобоса была обеспечена радиотехническими измерениями с шести станций слежения на Земле. К сожалению, вблизи даты пролёта 1998/09/12 доступны только данные в так называемом «сыром» (raw) виде. Это бинарные файлы телеметрической информации, из которой были сформированы измерения, содержащие небесно-механические параметры. По известным описаниям этих бинарных файлов был выбран файл, покрывающий интервал 1998/09/11-1998/09/13, из которого были получены моменты измерений и радиотехнические параметры однопутевого доплера в X-диапазоне (7 GHz) несущей частоты в том виде как они были записаны аппаратурой станций дальней космической связи DSN.

В главе 4 даётся методика определения параметров. Определение параметров теории \bar{Q} методом максимального правдоподобия требует минимизации функционала (Аким, Энеев, 1963)

$$F(\bar{Q}) = \sum_{i=1}^M \bar{\xi}_i^T(\bar{Q}) P_i \bar{\xi}_i(\bar{Q}), \quad \text{где } \bar{\xi}_i(\bar{Q}) = \bar{\psi}_i^o - \bar{\psi}_i^c(\bar{Q}), \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad \text{и } \bar{\psi}_i^o$$

является i -м вектором-измерением с ковариационной матрицей априорных ошибок K_i и $P_i = K_i^{-1}$, $\bar{\psi}_i^c$ является вычисляемым значением вектора-измерения. Любой из использованных при построении теории типов измерений зависит от своего набора уточняемых параметров \bar{q} , который является подмножеством, но не совпадает с полным набором \bar{Q} . Поэтому общая система линейных уравнений $A_{\Delta} \bar{Q} = B$ для получения всей совокупности \bar{Q} может быть разделена на несколько подсистем:

1. Подсистема Фобос, ν ;
2. Подсистема Фобос-2 (с уточнением манёвров), Фобос, μ, ν ;
3. Подсистема MGS, Фобос.

Каждая i -я подсистема представляет собой задачу обработки определённого набора измерений на текущей итерации. Она начинается подготовкой необходимых данных – измерений, начальных условий \bar{q}_i^0 и др. и заканчивается формированием матрицы A_i и правых частей B_i нормальных уравнений для этой подсистемы $A_i \Delta \bar{q}_i = B_i$, которые войдут в общую систему $A_{\Delta} \bar{Q} = B$ в качестве составных частей. Первая подсистема обеспечивает обработку всех наземных оптических измерений Фобоса и прохождения

Фобоса по диску Солнца. Она производит расчёт параметров движения Фобоса на интервале более 100 лет и обновляет начальные условия для двух других подсистем перед началом каждой следующей итерации. Вторая подсистема проводит обработку траекторных измерений радиальной скорости КА Фобос-2 и бортовых телевизионных измерений Фобоса. Область действия подсистемы распространяется на интервал от начала переходной орбиты, на которую КА вышел после проведения манёвра торможения и перехода на орбиту спутника Марса, и закачивается квазисинхронной орбитой (конец активного существования аппарата. Описание движения КА на всех участках сделано в рамках одной траектории, на которой есть участки пассивного движения и маневрирование. Эту траекторию описывают элементы орбиты КА в начальный момент времени на переходной орбите и параметры манёвров, а также значение гравитационной постоянной Фобоса и его вековое ускорение. Каждый манёвр описывается шестью параметрами, обеспечивающими расчёт приращений вектора состояния при завершении манёвра. В обработку включены априорные значения параметров манёвров с учётом ошибок их исполнения. Эта априорная информация представлена в форме ковариационной матрицы. Третья подсистема предназначена для обработки измерений MGS. Протяжённость интервала измерений взятого в обработку составляет несколько суток, модель движения описывается в рамках пассивного движения.

Схематически формирование общей системы представлено на рис. 2. Каждый элемент общей системы получается суммированием соответствующих элементов подсистем, что показано одинаковым окрасом.

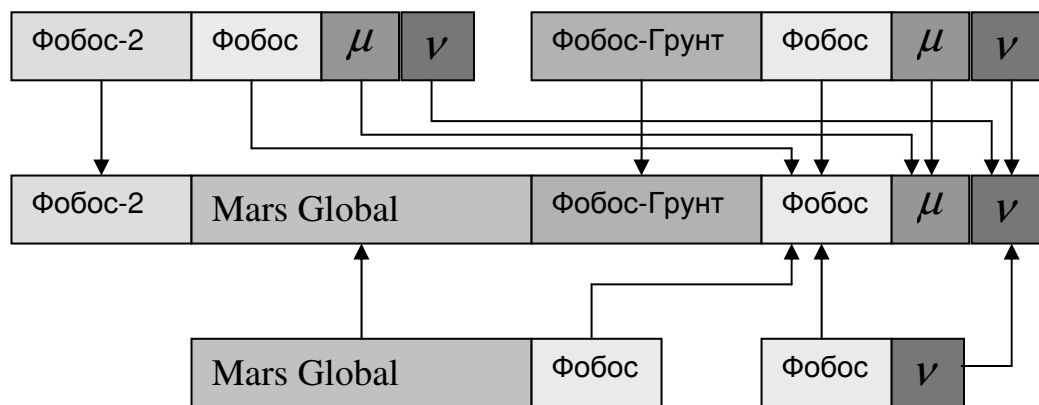


Рис. 2. Формирование правых частей B общей системы нормальных уравнений $A\Delta\bar{Q} = B$.

Кроме того, на рисунке показано место будущей подсистемы КАЗ Фобос-Грунт и параметры для уточнения из этой подсистемы.

Глава 5 посвящена отражению результатов работы. После обработки измерений на интервале 1877-2005 годы получены уточнённые значения элементов орбиты, векового ускорения и гравитационной постоянной Фобоса. В Таблице 5 содержатся уточнённые значения векового ускорения Фобоса и его гравитационной постоянной в сравнении с другими авторами.

Согласование теории с наблюдениями характеризуется отклонениями измеренных значений от вычисленных. В тексте диссертации представлены графики рассогласований. В основном, отклонения не превышают фактической точности измерений. В Таблице 6 отражены результаты сравнения измеренных и вычисленных значений параметров прохождений Фобоса по диску Солнца. В таблице приведены результаты расчётов, выполненные на основе настоящей теории, теорий Якобсона (2006г) и Шапрон-Тузе. Выполнено прямое сравнение координат Фобоса в эпохе J2000 на интервале 1989-2016 годы с данными

Таблица 5. Вековое ускорение Фобоса ν и его гравитационная постоянная μ в сравнении с другими авторами.

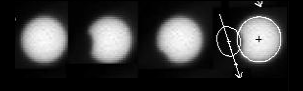
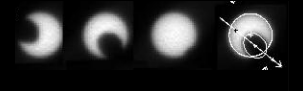


Автор	Год	$\nu_L \text{ град}/(\text{сут})^2 \cdot 10^{-8}$	$\mu (\text{км})^3 / (\text{сек})^2 \cdot 10^{-4}$
ИПМ	2007	0.9443 ± 0.004	7.158 ± 0.005
Коноплив и др.	2006		7.16 ± 0.005
Лейни и др.	2005	0.9422	
Емельянов и др.	1993	0.9666	
Иванов и др.	1990	0.9144	
Шапрон-Тузе	1989	0.9303	
Якобсон и др.	1989	0.9306	
Морли	1988	0.9527	
Синклер	1989	0.9272	
Синклер	1972	0.7195	
Шор	1988	0.984	
Шор	1975	1.01	

этих теорий. На рис. 3-5 приведены расхождения эфемерид Якобсона и нашей для прямоугольных координат. Видно, что расхождения не превышают 15 км, расхождения с Шапрон-Тузе больше.

Выполнена оценка точности координат Фобоса в орбитальной системе координат. Оси этой системы направлены вдоль радиуса-вектора Фобоса, по ортогонали к плоскости орбиты и по направлению движения (что вследствие малости эксцентриситета орбиты почти совпадает с вектором скорости). Самый большой разброс ошибки в километрах по направлению движения (3σ) – на рис. 6.

В главе 6 даются сведения о насчитанной эфемериде Фобоса и приводятся вспомогательные алгоритмы. Результаты теории оформлены на интервале 1989/01/29-2015/11/04 в электронном виде и записаны в файл. С шагом 30 мин. записана юлианская дата эфемеридного времени и далее вектор состояния $X \{x, y, z, v_x, v_y, v_z\}$ в марсоцентрической системе координат эпохи J2000. Единицы координат км, единицы компонент скорости км/сек. Предлагаются программные средства для получения координат из этой эфемериды для проектных расчётов с точностью не хуже 50 метров.

Таблица 6. Результаты рассогласований наблюдений прохождения Фобоса по диску Солнца для трёх теорий

Дата, время (UTC)	Измерение углового расстояния на средний момент	Измерение (град)	Рассогласования (град)		
			Якобсон	Шапрон-Тузе	ИПМ
2004/03/07 02:46:38.0		0.23	0.03	0.02	0.07
2004/03/10 07:36:46.5		0.04	-0.09	-0.10	-0.04
2004/03/12 13:41:14.0		0.02	-0.05	-0.06	-0.01
2004/04/18 21:06:18.0		0.12	-0.02	-0.01	0.01

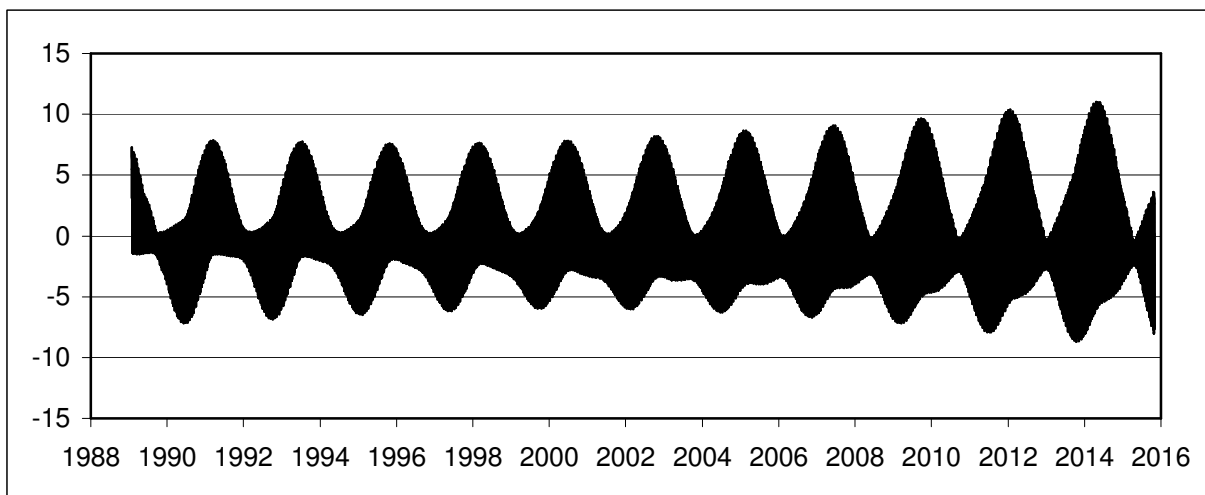


Рис. 3. Рассогласования Якобсон-ИПМ по координате X в км.

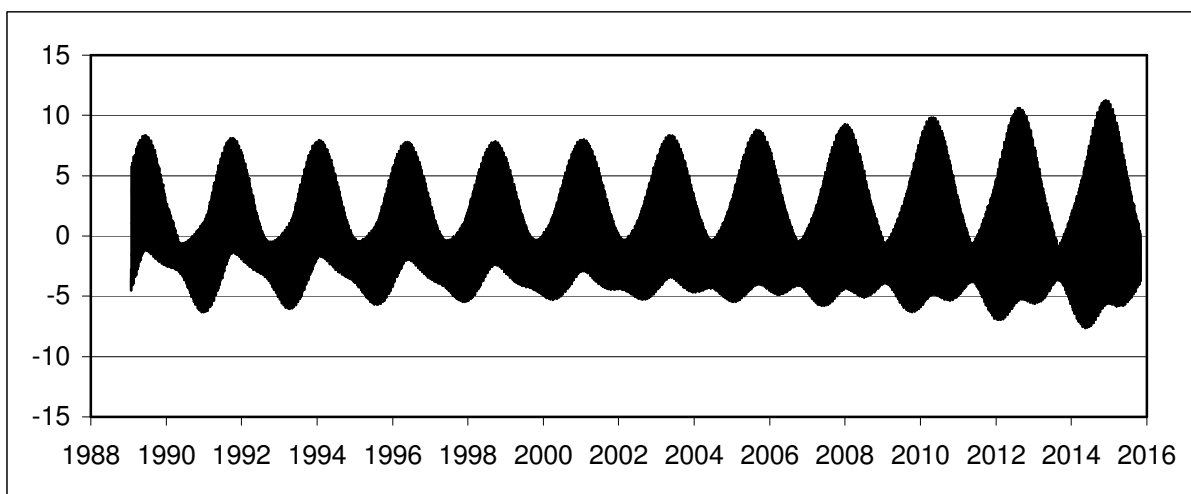


Рис. 4. Рассогласования Якобсон-ИПМ по координате Y в км.

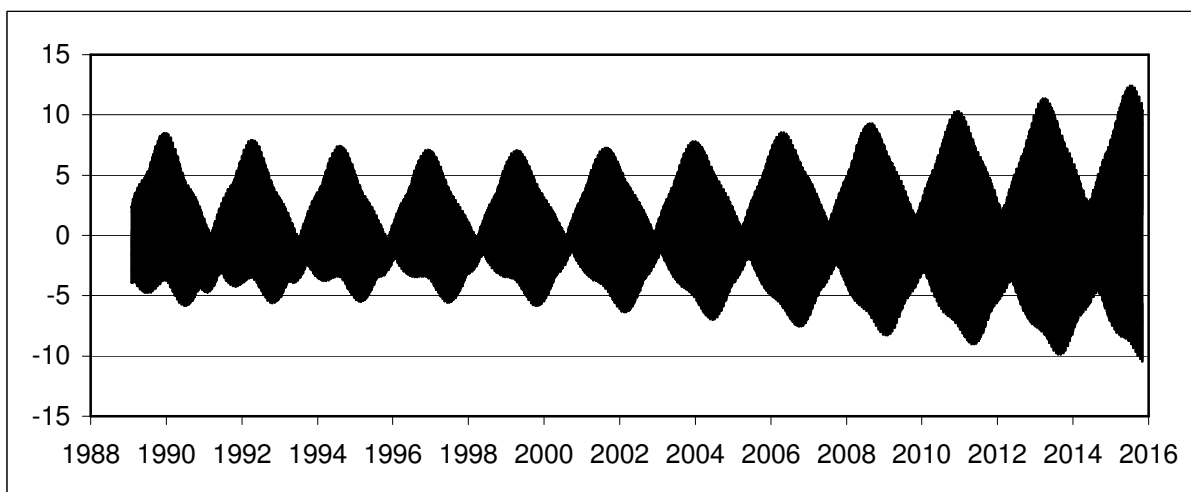


Рис. 5. Рассогласования Якобсон-ИПМ по координате Z в км.

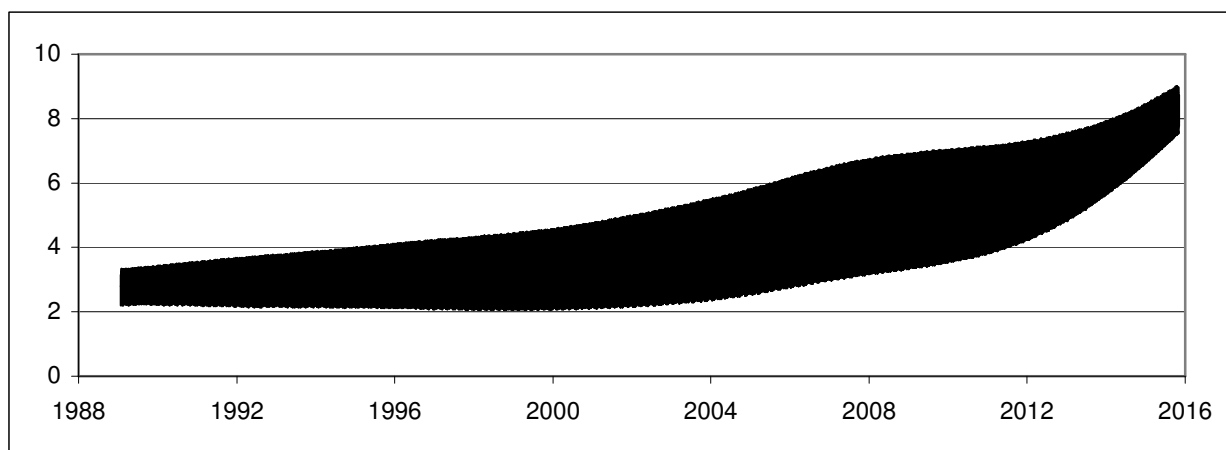


Рис. 6. Разброс среднеквадратической ошибки положения по направлению движения Фобоса в км.

Выводы

1. Построена динамическая численная теория движения Фобоса для навигационного обеспечения предстоящего полёта КА по программе Фобос-Грунт. Модель движения основана на наиболее достоверных константах гравитационного поля Марса, на координатах и скоростях их изменений для полюса Марса, на других астрономических константах. Это обеспечивает совместимость модели движения Фобоса с моделью движения КА вблизи Марса и Фобоса. Интервал времени измерений составляет 128 лет. В состав измерительной базы включены оптические измерения Фобоса с Земли, оптические телевизионные и лазерные измерения с космических аппаратов, оптические измерения с поверхности Марса, радиотехнические измерения с Земли за движением космических аппаратов.
2. Проведено сравнение результатов теории с наблюдениями и с результатами других теорий, что показало довольно хорошее соответствие, в том числе в отношении векового ускорения Фобоса и его гравитационной постоянной.
3. Сделанная оценка точности показывает приемлемую точность эфемериды Фобоса для предстоящего полёта КА Фобос-Грунт.
4. Разработана методика построения программного комплекса и его основных элементов для совместного определения орбит КА и Фобоса по совокупности измерений с борта КА и радиотехнических измерений с наземного измерительного пункта.

Список публикаций по теме диссертации

Публикация в журнале, входящем в список ВАК

Шишов В.А. Определение параметров движения КА и Фобоса в проекте «Фобос-Грунт». // *Астрономический вестник*. 2008. том 42. № 4. С. 341-350.

Прочие публикации по теме диссертации

1. *Шишов В. А.* Модель движения Фобоса и методика уточнения параметров в проекте «Фобос-Грунт». // *Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша*. Москва. 2008. № 10.
2. *Akim E.L., Botkin A.V., Stepaniants V.A., Shishov V.A., Tuchin A.G.* Orbit selection, Navigation and Maneuvers before the Landing on the Phobos Surface for Phobos Sample Return Project // *The Proceedings of the 17th International Symposium on Space Flight Dynamics*, 16-20 June 2003. Moscow. Russia. V.1. P. 291-304.
3. *Akim E.L., Ruzskiy E.G., Stepaniants V.A., Shishov V.A., Tuchin A.G.* // *Ballistics, navigation and motion control of the SC on stages of the Phobos surface approaching and landing* // *The proceedings of the 18th International Symposium on Space Flight Dynamics*, 11-15 October 2004. Munich, Germany, P. 461-466.

Цитируемая литература

1. *Аким Э.Л., Энеев Т.М.* Определение параметров движения космического аппарата по данным траекторных измерений // *Космические исследования*. 1963. 1. Вып. 1. с. 5-50
2. *Шор В.А.* Уточнение орбит Фобоса и Деймоса по наземным и космическим наблюдениям // *Письма в Астрон. журн.* 1988. 14. 12. с. 1123–1130.
3. *Bell J.F., Lemmon M. T., Duxbury T.C. et al.* Solar eclipses of Phobos and Deimos observed from the surface of Mars // *Nature*. 2005. 436. Mars LETTERS. P. 55-57
4. *Chapront-Touze M.* ESAPHO: a semi-analytical theory for the orbital motion of Phobos // *Astronomy and Astrophysics*. 1988. 200. P. 255-268
5. *Chapront-Touze M.* Orbits of the Martian satellites from ESAPHO and ESADE theories // *Astronomy and Astrophysics*. 1990. 240. P. 159-172
6. *Emelyanov N.V., Vashkovyakov S.N. and Nasonova L.P.* The dynamics of Martian satellites from observations // *Astronomy and Astrophysics*. 1993. 267. P. 634-642.
7. *Jacobson R.A., Synnott S.P. and Campbell J.K.* The orbits of the satellites of Mars from spacecraft and Earthbased observations // *Astronomy and*

- Astrophysics. 1989. 225 P. 548-554
8. *Morley T.A.* An improved analytical model for the orbital motion of the Martian satellites // *Astronomy and Astrophysics*. 1990. 228 P. 260-274
 9. *Shor V.A.* The motion of Martian satellites // *Celestial Mechanics*. 1975. 12. P. 61-75
 10. *Sinclair A.T.* The orbits of the satellites of Mars determined from Earth-based and spacecraft observations // *Astronomy and Astrophysics*. 1989. 220. P. 321-328
 11. *Sinclair A.T.* The motions of the satellites of Mars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1972. 155. P. 249-274
 12. *Sinclair A.T.* The orbits of Tethys, Dione, Rhea, Titan and Lapetus // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1977. 180 P. 447-459
 13. *Veverka J., Burns J. A.* The moons of Mars // *Annual review of earth and planetary sciences* 1980. 8. P. 527-558