

**Кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.**

Специальный практикум по небесной механике.

Задача № 7.

Емельянов Н. В.

**СРАВНЕНИЕ ЭФЕМЕРИД ПЛАНЕТ,
ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ РАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ
АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Содержание

- 7.1. Введение.
 - 7.2. Постановка задачи.
 - 7.3. Порядок решения задачи и примеры.
 - 7.4. Методическое указание о формулировке индивидуального задания каждому студенту.
 - 7.5. Форма отчета по индивидуальному заданию практикума.
- Литература.

7.1. Введение

Планеты являются главными объектами при изучении Солнечной системы. Это обосновывается несколькими причинами. Во-первых, планеты движутся по небу относительно звезд. Во-вторых, некоторые из них – Марс, Юпитер и Сатурн принадлежат к самым ярким небесным светилам. В третьих, планеты и их спутники – часть расширяющейся среды обитания людей. Уже сейчас автоматические агенты человека работают на поверхностях тел Солнечной системы. В четвертых, движение планет влияет на движение Луны, которое в свою очередь влияет на вращение Земли. Знание тонкостей вращения Земли необходимо для решения многих научных и практических задач.

Основой всех дел, связанных с планетами, являются модели их движения или эфемериды. Модель движения планет строится на основе общих законов природы. Применяются самые совершенные математические методы и методы вычислений. Модель включает в себя физические параметры, характеризующие планеты и спутники планет. Уточнение параметров делается по всем имеющимся наблюдениям. Эфемериды являются конечным результатом исследований, так как содержат в себе все знания о динамике планет и спутников, включая все имеющиеся результаты астрономических наблюдений. В то же время эфемериды являются средством исследований, так как содержат в себе все знания о динамике планет и спутников.

Постоянное стремление исследователей – уточнение модели движения планет. Прогресс в этом деле определяется главным образом точностью наблюдений, но также интервалом времени наблюдений. Поэтому продолжение наблюдений планет и их спутников даже с прежней точностью всегда актуально.

В былые времена, когда не было в распоряжении исследователей мощных компьютеров, строились аналитические теории движения планет методами небесномеханической теории возмущений. Аналитические теории и сейчас остаются востребованными. Однако для моделирования движения планет и вычисления эфемерид на не очень отдаленное будущее эффективнее работают методы численного интегрирования уравнений движения, хотя они и требуют значительных затрат времени работы компьютеров. Поэтому для вычисления эфемерид по построенной модели движения обычно не возобновляют всякий раз интегрирование дифференциальных уравнений, а пользуются заранее запасенными файлами, хранящими коэффициенты разложения прямоугольных гелиоцентрических координат планет в ря-

ды по полиномам Чебышева на каждом из небольших подинтервалов времени отдельно.

Доступ к эфемеридам может осуществляться несколькими способами. Обычно эфемериды планет используются в какой-нибудь вычислительной программе, решающей ту или иную научную или практическую задачу. К этой программе добавляют некоторый стандартный блок, который вычисляет координаты планет с помощью полиномов Чебышева, постоянно читая для этого файл с коэффициентами разложения координат. В некоторых случаях вычислительная программа пользователя эфемеридами сама обращается за такими вычислениями через интернет на какой-то другой компьютер в мире, на котором имеется необходимая для этого программа и файлы данных.

В процессе научных исследований, связанных с планетами, часто возникает необходимость получения эфемерид в виде таблиц координат на ряд заданных моментов времени. Обычно манипулируют таблицами эфемерид, записанными в виде простых текстовых файлов. Чтобы получить такие таблицы, нет необходимости обладать файлами с коэффициентами разложения координат планет и соответствующими вычислительными программами. Для этой цели в мире служат эфемеридные серверы, разрабатываемые в крупных научных центрах на основе максимума знаний о движении планет. Доступ к услугам таких эфемеридных служб осуществляется через интернет с помощью интернет-навигаторов или "браузеров". Заказ эфемерид делается на странице интернета, а результат получается на компьютере на таких же страницах.

Разработка высокоточных моделей движения планет на основе всех имеющихся в мире наблюдений ведется лишь в нескольких научных центрах, которые и осуществляют доступ к своим эфемеридам через страницы интернета. Это весьма весьма сложное и трудоемкое дело. Между такими научными центрами устанавливается некоторая состязательность. Соревнуются они между собой в основном по количеству и точности используемых наблюдений, но также по полноте учета эффектов, влияющих на движение планет. Труднее всего дается учет притяжения астероидов на движение Марса. Это из-за того, что астероидов очень много, а массы этих блуждающих в Солнечной системе малых тел известны с довольно низкой точностью. Для большинства астероидов массы вообще неизвестны.

Самыми продвинутыми в деле создания высокоточных моделей движения и эфемерид планет являются три научных центра.

Один из них – это Лаборатория реактивного движения (Jet propulsion laboratory, JPL) в Соединенных штатах Америки, работающая под присмотром агентства NASA. Сокращенно этот научный центр обозначают так: JPL. Эфемериды планет и Луны, предоставляемые этим институтом имеют обозначение DEXXX/LEXXX, где XXX означает номер версии эфемерид.

Другой первоисточник эфемерид планет – это парижский Институт небесной механики и вычисления эфемерид (Institut de mecanique celeste et de calcul des ephemerides), сокращенно IMCCE. Этот институт имеет богатую научную историю. Он под названием "Бюро долгот" был основан в 1795 году. В нем работали Лагранж и Лаплас, Пуанкаре и Тиссеран, Леверье и Гайо. Прославился институт Бюро долгот своими достижениями в небесной механике. Аналитическая теория движения планет, созданная Урбеном Леверье, и развивающаяся до настоящего времени в течение полутора веков была единственным источником самых точных эфемерид планет. В последние годы в IMCCE методами численного интегрирования дифференциальных уравнений движения на основе всех имеющихся наблюдений разработана новая, одна из самых точных моделей движения планет. IMCCE предоставляет соответствующие эфемериды, которые имеют обозначение INPOPXX, где XX означает номер версии.

Независимо от американских и французских специалистов разрабатывает высокоточные эфемериды планет русская женщина, сотрудница Института прикладной астрономии РАН (ИПМ РАН) в С.-Петербурге Елена Владимировна Питьева. В последние годы она создала модель движения планет и Луны по точности конкурирующую с американскими и французскими эфемеридами. Свою модель движения планет и Луны Е.В.Питьева назвала ЕРМ-YYYY, где YYY – это год, к которому приписывается очередная версия. В модель движения включены все возмущающие факторы, необходимые для обеспечения наивысшей точности эфемерид. Ею использован обширный наблюдательный материал, включая современные наблюдения, сделанные с помощью межпланетных космических аппаратов.

Каждый из указанных здесь институтов предоставляет свои эфемериды в виде файлов данных с прилагаемой к ним программой, написанной на нескольких самых распространенных языках программирования. Программа может быть вставлена в программу решения задачи пользователя. Для вычисления эфемерид программа по мере необходимости читает файлы данных. Файлы и тексты программ

размещены для свободного заимствования на сайтах институтов.

Кроме предоставления эфемерид планет в виде файла данных и прилагаемой к нему программы некоторые из эфемерид доступны по запросу на страницах интернета.

На сайте JPL для этого служит интерактивная среда HORIZONS Web-Interface. Выйти на нее можно по адресу:

<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

В среде HORIZONS можно получить эфемериды планет, Луны, спутников планет, а также большинства известных астероидов. Запрос эфемерид формулируется заполнением полей ввода на страницах. Моменты эфемерид задаются начальным моментом, конечным моментом и шагом по времени. Имеется возможность ввести до 15 произвольных моментов одновременно и получить для них эфемериды. Предоставляется на выбор множество различных типов координат, шкал времени и форматов выдачи. Что касается версии эфемерид, то всегда доступна только одна, самая последняя версия. В настоящее время это эфемериды DE431/LE431.

Французские эфемериды, сделанные в IMCCE, тоже доступны на страницах интернета путем заказа таблиц координат планет для ряда моментов времени с постоянным шагом. Страница для заказа эфемерид имеет адрес

http://www.imcce.fr/en/ephemerides/formulaire/form_ephepos.php

Можно получить эфемериды любой большой планеты, Луны, некоторых спутников планет, а также большинства известных астероидов. Предоставляются на выбор несколько типов координат, шкал времени и форматов выдачи.

Для эфемерид планет и Луны Е.В.Питьевой (ЕРМ-YYYY) нет соответствующих страниц в интернете на сайте ИПА РАН.

Кроме перечисленных выше средств доступа к эфемеридам существует особый сервер эфемерид, разработанный Н.В. Емельяновым одновременно в парижском институте IMCCE и в Государственном астрономическом институте имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Этот сервер, имеющий название MULTI-SAT, обладает следующими особенностями.

Служба эфемерид MULTI-SAT предназначена для получения эфемерид спутников планет и самих планет, имеющих спутники, то есть Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона. Моменты времени можно задавать начальным моментом, шагом по времени и ко-

личеством моментов с этим заданным шагом. Кроме того, имеется исключительно только в сервере MULTI-SAT возможность вводить целую таблицу результатов наблюдений и получать для этих наблюдений разности наблюденных и вычисленных по эфемеридам значений координат. Моменты наблюдений могут следовать в произвольном порядке, а число наблюдений не ограничено. Вместо наблюдений можно ввести таблицу произвольных моментов времени любой длины, и эфемериды будут вычислены сразу для всей таблицы моментов. Можно заказать разности координат планеты и ее спутника или разности координат двух спутников. Предоставляются на выбор несколько версий американских эфемерид DEXXX, несколько версий французских планетных эфемерид INPOPXX, а также планетные эфемериды EPM-YYYY, разработанные в ИПА РАН Е.В. Питьевой. Благодаря такому выбору можно сравнивать между собой разные планетные эфемериды непосредственно в топоцентрических координатах. Можно получить разности эфемерид из любого внешнего источника и эфемерид, доступных в сервере MULTI-SAT. Для этого эфемериды из внешнего источника следует ввести в форме наблюдений. В сервере MULTI-SAT имеется целый ряд дополнительных возможностей, отсутствующих в других таких средствах. В частности, страницы интернета предоставляются на выбор на одном из трех языков: на английском, на французском или на русском. Адреса сайтов службы эфемерид MULTI-SAT следующие:

на web-сервере ГАИШ МГУ

<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/indexr.htm>

на web-сервере IMCCE

http://www.imcce.fr/hosted_sites/saimirror/nssephe.php

Как уже указывалось выше, эфемериды планет, получаемые из разных источников, различаются между собой. Нельзя сказать, какие из них наиболее точные. Однако, сравнивая эфемериды из разных источников между собой, можно получить некоторую внешнюю оценку их точности.

Задача спецпрактикума состоит в сравнении эфемерид планет, полученных из разных источников, используя возможности службы эфемерид MULTI-SAT. Целью будет научить пользоваться различ-

ными средствами получения эфемерид планет в интернете.

7.2. Постановка задачи

В предлагаемой задаче нет исходных данных. Их требуется получить с помощью служб эфемерид планет и спутников, доступных через интернет. Предлагается использовать службу эфемерид MULTI-SAT (ГАИШ МГУ, IMCCE) и интерактивную среду HORIZONS (JPL). Адреса этих средств указаны выше.

Задача ставится следующим образом. Выберем небесное тело - планету или спутник большой планеты. Зададим интервал времени для эфемерид: начальный момент, конечный момент и шаг таблицы по времени. В некоторых случаях вместо конечного момента времени следует задать количество строк выдачи, то есть количество моментов времени, для которых нужно вычислить эфемериды. Необходимо получить координаты выбранного небесного тела, с помощью двух разных теорий или разных моделей движения и вычислить разности этих координат для каждого момента времени. При этом вычитание координат специально можно не делать, нужно воспользоваться средством вычитания эфемерид, заложенным в службе эфемерид MULTI-SAT.

Примеры небесных тел можно выбирать самостоятельно. Предпочтительно выбирать большие планеты, имеющие спутники или сами спутники планет (кроме Луны).

7.3. Порядок решения задачи и примеры

Рассмотрим несколько задач сравнения эфемерид.

Задача 1. Сравним эфемериды планеты Уран, вычисляемые с помощью одной из последних планетных теорий, разработанных в JPL, с последней версией эфемерид планет, разработанной в IMCCE. Пусть это будут модели DE421 (JPL) и INPOP10 (IMCCE). Для решения задачи нет необходимости получать эфемериды Урана на сайте JPL. Эти эфемериды доступны в службе MULTI-SAT. Будем сравнивать эфемериды в геоцентрических экваториальных координатах - прямом восхождении и склонении. В службе естественных спутников планет MULTI-SAT в разделе "Эфемериды с постоянным шагом по времени" выбираем планету Уран. Далее в списке спутников (в кон-

це списка) выбираем "Центр планеты Уран". Выберем в специальном меню "Относительно геоэкватора и точки весны". Код обсерватории и эпоху экватора и равноденствия оставим так, как это уже стоит по умолчанию: 500 и ICRF, соответственно. В списке версий планетной теории выбираем DE421. Вводим в специальное поле начальный момент в форме "Год месяц день час мин сек с долями например, 2013 12 12 12 12 12

Проверяем, правильно ли выбран формат ввода начального момента. Выбираем из меню "ед. шага" единицу: день. Вводим в специальные поля величину шага, например, 1 и число шагов, например, 20. Нажимаем экранную кнопку "Вычислить". Получаем в отдельном окне заголовочные строки и таблицу вида

```
2013 12 12 12 12 12.00 0 31 58.308674 2 41 23.733353
2013 12 13 12 12 12.00 0 31 57.361481 2 41 20.197449
2013 12 14 12 12 12.00 0 31 56.602276 2 41 17.877171
2013 12 15 12 12 12.00 0 31 56.031403 2 41 16.775036
```

...

Теперь выделяем (мышкой) в окне только строки таблицы и записываем их в папке обмена.

Далее входим в окно службы эфемерид MULTI-SAT "Эфемериды для таблицы моментов и (О-С) для наблюдений". Для этого можно вернуться в окно, где мы заказывали эфемериды Урана, и, держа нажатой кнопку "ctrl", нажать мышкой на слова "Эфемериды для таблицы моментов и (О-С) для наблюдений", находящиеся вверху страницы. Появится новое окно заказа разностей "О-С", в нашем случае разностей эфемерид. На этой странице в списке спутников выбираем "Центр планеты Уран" и оставляем выбранную по умолчанию планетную теорию INPOP10. В окно ввода внизу страницы копируем из папки обмена запомненные там эфемериды. Проверяем выбор остальных параметров на странице (в данном примере все остается выбранным по умолчанию) и нажимаем кнопку "Вычислить". В отдельном окне получаем таблицу вида

```
2013 12 12 12 12 12.00 -0.0829 -0.1184
2013 12 13 12 12 12.00 -0.0828 -0.1183
2013 12 14 12 12 12.00 -0.0828 -0.1182
2013 12 15 12 12 12.00 -0.0827 -0.1181
```

...

Как видно из данного примера, эфемериды двух сравниваемых планетных теорий отличаются по прямому восхождению и склонению

на величины, порядка 0.1 секунды дуги.

Далее можно повторить процедуру для других дат эфемерид. Можно выбрать такую начальную дату:

1950 1 1 1 1 1

В этом случае нужно учитывать следующее обстоятельство. На странице для главных спутников планеты Уран (U1 - U5) по умолчанию отмечена теория V.Lainey. Эта теория дает эфемериды только на интервале времени (1995/01/01.0-2015/04/15.7). Несмотря на то, что мы выбрали не спутник, а центр планеты Уран, сервис не будет выдавать эфемериды, поскольку наша дата (1950 год) не входит в этот интервал. Проблема решается так. Нужно для спутников выбрать версию GUST86, которая работает для любых дат, поскольку это аналитическая теория движения спутников. Далее поступаем аналогично предыдущему примеру. Нужно только не забыть на странице сравнения эфемерид также отметить версию GUST86 для спутников Урана. Получим таблицу вида

1950 1 1 1 1 1.00 -0.0361 -0.0278

1950 1 2 1 1 1.00 -0.0361 -0.0278

1950 1 3 1 1 1.00 -0.0361 -0.0277

1950 1 4 1 1 1.00 -0.0360 -0.0277

...

Как видно из полученной таблицы для 1950 года различия эфемерид по сравниваемым теориям оказываются существенно меньшими, чем для 2013 года.

Задача 2. Сравним эфемериды Галилеева спутника Юпитера Ио, получаемые с помощью сервера эфемерид HORIZONS JPL, с эфемеридами этого спутника, разработанными V.Lainey в IMCCE (версия V2.0). Для этого выдадим таблицу эфемерид с помощью HORIZONS, введем ее в качестве наблюдений в MULTI-SAT и получим разности эфемерид как разности "О-С".

На сервере HORIZONS нужно выбрать в качестве объекта (Target Body) спутник Юпитера Ио. Следует задать на страницах HORIZONS: Ephemeris Type: OBSERVER

Observer Location: Geocentric [500]

Time Span: Start=2013-1-1, Stop=2014-1-20, Step=1 d

Table Settings: QUANTITIES=1; date/time format=JD;
extra precision=YES

Полученную таблицу эфемерид вида

2456293.500000000 04 23 34.7371 +20 52 29.580

2456294.500000000 04 23 16.1117 +20 51 46.136
2456295.500000000 04 22 55.7040 +20 51 26.126

...

следует запомнить в папке обмена и ввести ее затем в соответствующее окно в сервере MULTI-SAT.

В сервере MULTI-SAT нужно вызвать страницу “Ephemerides and (O-C) for a file of dates and positions” для главных и близких спутников Юпитера. На этой странице все установки можно взять по умолчанию, за исключением поля

Choose planet theory version:

для которого нужно выбрать вариант DE431

и поля choose format of the moment

для которого нужно выбрать вариант JD (Julian Day).

Далее можно нажать экранную кнопку Calculate и получить в новом окне на экране компьютера таблицу вида

2456293.500000 0.0014 -0.0002
2456294.500000 -0.0083 0.0002
2456295.500000 0.0038 -0.0027

Вторая и третья колонки этой таблицы показывают разности эфемерид в экваториальных геоцентрических координатах (прямое восхождение и склонение), выраженные в секундах дуги.

Заметим, что в эфемеридном сервере HORIZONS в настоящее время используется планетная эфемерида DE431. В сервере MULTI-SAT мы также выбрали эту планетную эфемериду. Следовательно, полученные разности эфемерид обусловлены только различиями в теориях движения спутника Юпитера Ио в двух службах эфемерид.

7.4. Методическое указание о формулировке индивидуальных заданий каждому студенту

К началу выполнения работы по данной задаче практикума студенты должны уметь оперировать средствами меню и полей ввода на страницах интернета. Необходимо иметь представление о составе тел Солнечной системы. Нужно знать основы астрометрии, в частности, шкалы времени и эпохи систем экваториальных координат.

В качестве примеров можно выбирать большие планеты и спутники из тех, которые показаны в сервере MULTI-SAT.

Формулировка задания для каждого студента заключается в задании небесного тела, начальной даты эфемерид, шага по времени и

числа строчек таблицы эфемерид. Можно варьировать шкалы времени (UTC, TT), выбирать топоцентр в разных обсерваториях, демонстрируя влияние суточного параллакса на значения вычисляемых топоцентрических координат небесных тел. Можно показать, насколько различаются эфемериды, вычисленные в разных системах координат.

7.5. Форма отчета по индивидуальному заданию практикума

Каждому студенту предлагается один вариант исходных данных. После решения задачи студент должен подготовить письменный отчет по следующему плану:

1. Введение (О чем идет речь? Зачем это нужно?).
2. Постановка задачи (Цель исследования).
3. Описание последовательности использования окон при работе в интернете.
4. Задание начальных дат и шага по времени для эфемерид.
5. Полученные результаты с указанием всех использованных параметров эфемерид.

В целом такой отчет может иметь объем 2-3 страницы.

Литература

1. Emel'yanov N. V., Arlot J.-E. The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT. *Astronomy and Astrophysics*. 2008. V. 487. P. 759–765.