

Н.В.Емельянов

**ДИНАМИКА ЕСТЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ
НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ**

ГАИШ МГУ - 2019

СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ

Резюме

В этой главе мы рассматриваем следующие аспекты научно-организационной деятельности. Как и зачем создаются новые версии и варианты моделей движения спутников? Ясно, что модели движения естественных спутников планет, создаваемые на основе наблюдений, являются одновременно и результатом и средством исследований. Поскольку они создаются для каких-то потенциальных пользователей, важно знать, как обеспечивается доступ потребителей к создаваемым средствам исследований. Это рассматривается в следующих разделах книги.

Какие существуют в настоящее время общедоступные базы данных и средства вычисления эфемерид естественных спутников планет? Основные из них перечисляются ниже. Дается описание средства вычисления эфемерид MULTI-SAT, разработанного автором настоящей книги. Объясняется, какие типы координат спутника может выдавать сервер эфемерид MULTI-SAT. В специальном разделе рассказывается, какие конкретно модели движения заложены в MULTI-SAT и кто их разработал. Приводятся также источники и авторы моделей движения спутников, заложенные в службу эфемерид HIRIZONS американского института Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology.

В конце главы упоминается понятие виртуальной обсерватории.

12.1. Варианты и смена версий теорий движения и эфемерид спутников планет

История разработки теорий движения спутников больших планет Солнечной системы весьма обширна. Попытки моделировать движение спутников начались с момента их открытия. В прошлые века такие теории опирались на модели кеплеровского движения. В процессе развития теории к модели кеплеровского движения добавлялись возмущения от различных факторов. Весьма широко применялась и до сих пор применяется модель прецессирующего эллипса. В попытках построить наиболее точную аналитическую теорию движения спутника планеты исследователи выводили чрезвычайно объемные формулы. Такие аналитические модели одновременно служили как для вычисления эфемерид, так и для описания эволюции орбит.

С появлением быстродействующих вычислительных машин общая задача моделирования движения спутников планет разделилась на две методически различные проблемы в соответствии с поставленными целями.

Первая и ближайшая цель — получение эфемерид на ближайшее время для проведения новых наблюдений и для осуществления космических миссий. Интервал времени, на котором моделировалось движение спутника, в этом случае относительно невелик. Поэтому весьма эффективным оказалось выполнение численного интегрирования дифференциальных уравнений движения на быстродействующих компьютерах. Простота реализации методов, когда нужно запрограммировать лишь вычисление правых частей уравнений движения, повела по этому пути многих исследователей.

Несколько более сложная проблема появляется при попытках уточнять параметры движения из наблюдений, когда нужно вычислять еще и частные производные от измеряемых величин по уточняемым параметрам. Здесь прибавляется трудность, связанная с тем, что в этой задаче моделировать движение спутника нужно на всем интервале времени наблюдений. Для некоторых спутников этот интервал уже достигает 300 лет. Но и эти проблемы в основном решаются методами численного интегрирования.

Другая цель моделирования движения спутников планет — описать эволюцию орбит на максимально возможном интервале времени. Это необходимо для выяснения истории образования планет и

спутников, а также для выяснения их судьбы в будущем. В такой постановке решение методами численного интегрирования весьма затруднено, а при некоторых вариантах задачи просто невозможно. Здесь препятствиями становятся непомерно большие затраты времени вычислений, невозможность достоверной оценки точности решения и, вообще, ограниченность точности. При этих обстоятельствах мы вынуждены прибегать к попыткам построения аналитического решения дифференциальных уравнений движения. За исключением нескольких простейших механических моделей точное аналитическое решение общей задачи получить невозможно. К тому же никакое приближенное аналитическое решение не будет справедливо на бесконечном интервале времени. Все же аналитические методы дают возможность строить модели эволюции орбит на весьма больших интервалах времени.

Проблемы эволюции орбит спутников планет рассмотрены выше в специальной Главе 10. Здесь же рассказ будет посвящен теориям и моделям движения, которые строились с целью вычисления наиболее точных эфемерид спутников планет. Путь, на котором здесь достигается прогресс, состоит в следующем. В какой-то текущий момент уже существует модель движения, основанная на всех имеющихся на этот момент наблюдениях. Наблюдатели продолжают наблюдать, получают новые астрометрические данные и публикуют их в доступных научных изданиях. Наступает время, когда появляется возможность построить новую версию модели движения и эфемерид конкретной группы спутников. Исследователи, которые занимаются этим систематически, пользуясь ситуацией, создают новую модель. Обычно она реализуется в виде доступных средств вычислений эфемерид и оказывается в распоряжении всех желающих этим воспользоваться. Иногда наблюдатели в своей работе кооперируются с коллегами, умеющими строить теории движения, и совместно публикуют новую модель движения. В этих случаях «владельцы» наблюдений обладают преимуществом по сравнению со своими не менее способными коллегами. При смене версий то время, в которое модель движения остается самой точной и лучшей в мире, бывает весьма различным. Некоторые теории сменяются новыми через год-два, а некоторые «живут» и по 20 лет.

В этой смене версий моделей движения спутников весьма важны два обстоятельства. Во-первых, правильным положением дел является одновременное наличие двух-трех независимо построенных

моделей. Это позволяет проверить и оценить точность средств вычисления эфемерид. Если существуют три модели, две из которых дают близкие между собой результаты, а результаты третьей модели существенно отличаются от результатов первых двух, становятся сомнительными достоинства этой третьей модели. Во-вторых, необходимо оставлять в доступе предшествующие модели движения спутников. Многие новые научные результаты, полученные на основе какой-то теории движения спутника, иногда нуждаются в воспроизведении и проверке. Чтобы вычисления получились согласованными, нужно применять те средства, которые уже использовались ранее.

Некоторые конструкторы моделей движения время от времени совершенствуют свои произведения чаще всего за счет расширения наблюдательной базы. Тогда появляются новые версии той же самой модели. В некоторые периоды времени могут существовать две или более совершенных моделей движения спутников, построенных разными авторами. Тогда мы говорим не о версиях, а о различных вариантах моделей.

Что касается набора учитываемых возмущающих факторов и точности применяемых методов, то нужно отслеживать, чтобы применяемые допущения теории и приближенность методов вычислений не ухудшали модель более, чем ошибки наблюдений. При этом не достаточно оценивать точность определяемых параметров. Для каждого отброшенного возмущающего фактора нужно выяснить его влияние на точность эфемерид. Обычно конструкторы моделей движения добиваются, чтобы теория была заведомо точнее наблюдений.

Теперь ясно, что как только возникает необходимость применить для исследований или для практических нужд теорию движения или средства вычислений эфемерид конкретного спутника, нужно выяснять, какая версия в настоящее время наиболее точная, достоверная и, вообще, самая подходящая. Критериев выбора здесь несколько. Достоверность определяется набором использованных наблюдений и интервалом времени наблюдений. Нужно выяснить, насколько удобна реализация модели для применения, какая модель лучше всего подходит для решения поставленной задачи. Нужно знать, как организован доступ к той или иной модели движения спутника. Этой последней проблеме посвящен следующий раздел нашей книги.

12.2. Средства обеспечения доступа к базам данных, моделям движения и эфемеридам спутников планет

В современную эпоху информационных технологий возможности использования плодов труда конструкторов моделей движения спутников планет весьма разнообразны и велики. Естественным образом происходит техническое слияние баз данных, средств решения задач и представления получаемых результатов. Рассмотрим, как это реализуется на деле.

Сначала укажем на три основных приема решения задач, связанных с базами данных и средствами вычисления эфемерид. В исходном состоянии эти средства состоят из двух элементов: файлы данных и компьютерные программы, обеспечивающие использование этих данных. Приемы работы пользователя иллюстрируются на рис. 12.1.

Первый прием заключается в том, что пользователь копирует в свой компьютер все необходимые файлы и вставляет в свою программу решения задачи те подпрограммы, которые обеспечивают доступ к данным. Программа пользователя решает задачу и по мере надобности сама обращается к подпрограммам за данными. Все происходит внутри одной программы решения задачи. Хорошим примером таких средств является система программ и данных SPICE развитой в американском институте Jet Propulsion Laboratory (Acton et al., 2015). Ее можно найти в Интернете по адресу <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html>

Второй прием состоит в том, что база данных размещена всего на одном компьютере в мире. Там же находится вычислительная программа, обеспечивающая доступ к данным через интернет. Обычно это так называемый Web-сервер. Пользователь, сидя за своим компьютером, запускает в работу один из Web-браузеров (не нахожу подходящего русскоязычного термина) и общается с соответствующим Web-сервером через страницы интернета. Программа Web-браузера (Internet Explorer, Microsoft Edge, ...) позволяет пользователю сформировать запрос и получить интересующие его данные в виде файлов. Затем пользователь может запустить программу решения своей задачи, которая будет использовать полученные таким образом файлы. В мире существует несколько таких средств и они описаны ниже.

Третий прием — это, когда вычислительная программа пользователя в процессе своей работы сама обращается через интернет к базе данных, расположенной в другом компьютере или даже в другой стране, сама берет из удаленного компьютера необходимые данные и продолжает вычисления. Для этого на удаленном компьютере должна функционировать программа, которая называется Web-сервис. Этот прием применяют в основном пользователи высокой компьютерной компетенции.

Отметим, что описанные три метода применяются как для выборки из баз данных, так и для вычисления эфемерид спутников планет.

Теперь охарактеризуем отдельно элементы информационных технологий научного процесса изучения динамики спутников планет на основе наблюдений.

Исходным элементом являются базы данных. В нашем случае это в основном базы данных наблюдений спутников. Здесь одновременно существуют два подхода. Первый из них — стремление автоматизировать процесс использования результатов наблюдений. Это неизбежно приводит к необходимости унификации формы представления результатов. Унификация связана с некоторой предварительной обработкой данных на основе тех или иных методов и моделей систем координат и шкал времени. В результате данные оказываются зависимыми от моделей. При уточнении модели данные наблюдений будут уже другими. Это приводит к трудностям, а иногда и к недоразумениям. Например, при переводе исходных координат спутников, полученных с помощью старого звездного каталога в системе экваториальных координат эпохи B1950, в систему координат эпохи J2000 могут использоваться различные модели прецессии. Если координаты помещены в базу данных уже исправленными за прецессию, то не будет возможности переобработать их с другой моделью прецессии. Еще хуже бывают ситуации, когда неизвестно, какие редукции были сделаны, перед тем как результаты были помещены в базу данных. По этим причинам применяется и другой подход — помещать в базу данных результаты наблюдений спутников планет в том составе и в той форме, как это было дано наблюдателями. Данные должны сопровождаться объяснениями, взятыми из того же источника.

В настоящее время имеется не много баз данных наблюдений спутников планет, доступных через интернет. Не вдаваясь в подроб-

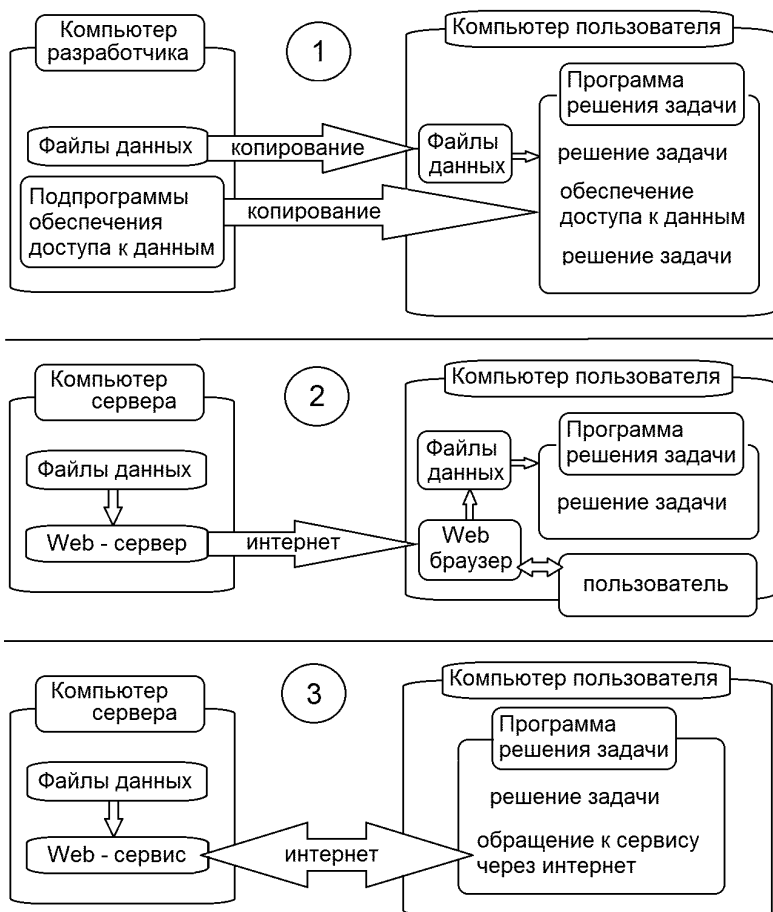


Рис. 12.1. Три приема работы пользователя с базами данных и службами эфемерид спутников планет. Смотрите объяснения в тексте.

ности состава данных, перечислим общедоступные в Интернете базы данных наблюдений.

Прежде всего это база данных, создаваемая при сотрудничестве Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (ГАИШ МГУ) и Института небесной механики и вычис-

ления эфемерид (Institut de Mécanique céleste et de calcul des éphémérides — ИМССЕ), Париж, Франция. Она имеет аббревиатуру NSDB — Natural Satellites Database. Адрес доступа к этой базе данных такой: <http://www.sai.msu.ru/neb/nss/html/obspos/index.html> — на сайте ГАИШ МГУ и <http://nsdb.imcce.fr/obspos/obsindhr.htm>

— на сайте ИМССЕ. Заметим, что страницы этой базы данных в Интернете составлены на трех языках: русском, английском и французском. Объявление о создании базы данных NSDB и краткое ее описание опубликовано в работе (Arlot, Emelyanov, 2009). База данных наблюдений состоит из двух частей. Первая, условно обозначаемая как NSDB1, составляется уже давно. Используется принцип размещения данных наблюдений точно в том составе и виде, как они были опубликованы. Фактически это цифровые копии таблиц данных, которые взяты из публикаций. Они сопровождаются необходимыми для использования описаниями, взятыми также из публикаций. Вторая часть — Standard astrometric data содержит те же данные, что и NSDB1, но данные имеют стандартизованную форму. В этой базе данных предлагаются средства для выборки данных из базы. Адрес доступа к этой базе данных такой:

<http://nsdb.imcce.fr/nsdb/home.html>

В базе данных NSDB собраны все опубликованные наблюдения всех известных спутников планет. Еще подробнее NSDB описана ниже.

Другая база данных наблюдений содержится на сайте Центра малых планет (Minor planet center — MPC). Эта база данных ограничивается наблюдениями только далеких спутников планет. Туда помещаются результаты, публикуемые в циркулярах MPC. Формат данных наблюдений в этой базе стандартный. Он примерно такой же, как и для публикации наблюдений малых планет. Описание формата данных можно найти на сайте MPC. Адреса страниц на этом сайте иногда изменяются, поэтому приведем здесь сначала адрес общего доступа к сайту MPC:

<http://minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>

Файл с наблюдениями далеких спутников больших планет можно скопировать со страницы по адресу

<http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCAT-OBS/MPCAT-OBS.html>

Для этого нужно пойти по ссылке

Natural outer irregular satellites of the giant planets.

Некоторые обсерватории имеют свои базы данных наблюдений спутников планет. Пример такой базы — это База данных наблюдений планет и их спутников Пулковской обсерватории (Pulkovo Database of Observations of Planets and Their Satellites). Адрес в Интернете <http://pulddb.ru/db/sdb.php>

Более общая база данных наблюдений тел Солнечной системы Пулковской обсерватории имеет адрес <http://pulddb.ru/db/index.php>

Страницы доступа к этой базе данных позволяют выбрать наблюдения конкретного спутника на заданные годы наблюдений или за все годы.

Морская обсерватория Соединенных штатов Америки (United States Naval Observatory — USNO) Flagstaff имеет свою базу данных наблюдений планет и спутников. На странице по адресу <http://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/solsys/fastt-plansat>

можно получить доступ к наблюдениям, выполненным на телескопе, который называется Flagstaff Astrometric Scanning Transit Telescope. Доступ должен осуществляться по ссылкам, обозначающим годы. Заметим, что доступ к этим страницам с наблюдениями открыт только с компьютеров, расположенных вне территории России.

Результаты астрометрических наблюдений планет и спутников, выполняемых на обсерватории Table Mountain, Калифорния, США, доступны в Интернете на странице <https://ssd.jpl.nasa.gov/dat/planets/ccd1.tmo.html>.

Кроме баз данных наблюдений спутников планет могут быть полезными базы данных физических параметров спутников. Таких баз данных также немного в доступе через интернет. Укажем только некоторые из них. В рамках базы данных NSDB (ГАИШ МГУ — ИМССЕ) имеются страницы «Параметры и константы». Для доступа туда нужно сначала войти в NSDB по указанным выше адресам, а затем пройти по ссылкам: Базы данных — Параметры и константы. Далее можно попасть на страницы:

- Массы спутников,
- Размеры спутников,
- Фотометрические свойства спутников,
- Параметры вращения спутников.

Другой источник данных о физических свойствах спутников планет — это справочно-информационная система Динамика Сол-

нечной системы лаборатории Jet Propulsion Laboratory Калифорнийского технологического института, США. Она доступна в Интернете по адресу <https://ssd.jpl.nasa.gov/>.

Имеется единственная специализированная библиографическая база данных по естественным спутникам планет, созданная в рамках NSDB (ГАИШ МГУ - IMCCE). Чтобы попасть туда через Интернет, нужно войти сначала в NSDB по одному из адресов, указанных выше, а затем пройти по ссылкам: Базы данных — Библиография.

Конечно, всю библиографию по исследованиям естественных спутников планет охватывает библиографическая база данных по астрономии The SAO/NASA Astrophysics Data System Abstract Service. Доступ для поиска библиографии осуществляется по адресу http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html

Теперь рассмотрим имеющиеся средства вычисления эфемерид естественных спутников планет, доступные через интернет. Отметим, что такие средства называют еще службами эфемерид или просто эфемеридами.

Одним из наиболее развитых средств вычисления эфемерид спутников планет является сервер MULTI-SAT. Он создан, поддерживается и сопровождается совместно: Институтом небесной механики и вычисления эфемерид (IMCCE), Париж, Франция и Отделом небесной механики ГАИШ МГУ. Объявление о создании службы MULTI-SAT и краткое ее описание содержится в публикации (Emel'yanov, Arlot, 2008). Адреса доступа к службе MULTI-SAT следующие:

<http://nsdb.imcce.fr/multisat/> — на сайте IMCCE

<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/html/multisat/> — на сайте ГАИШ МГУ.

Более подробно это средство рассмотрено ниже.

Другим развитым средством вычисления эфемерид спутников планет является сервер эфемерид HORIZONS JPL NASA, США (Giorgini et al., 1996), предоставляющий доступ к эфемеридам через Web-страницы Интернета. Адрес страницы запроса эфемерид:

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

Это средство вычисления эфемерид не только естественных спутников планет, но также почти всех тел Солнечной системы.

На страницах Интернета Minor Planet Center (MPC) имеется служба вычисления эфемерид далеких спутников планет. Доступ

туда осуществляется по адресу
<http://www.minorplanetcenter.net/iau/NatSats/NaturalSatellites.html>

В Институте прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН), Санкт-Петербург, Россия разработаны оригинальные модели движения главных спутников планет (Космодамианский, 2009; Порошина, 2013).

Значительным достижением в моделировании движения планет на основе наблюдений является серия работ ЕРМ, выполняемая в ИПА РАН. Эфемериды ЕРМ (Ephemeris of Planets and Moon) включают высокоточные орбиты планет Солнечной системы, Солнца, Луны, трёх крупнейших астероидов (Церера, Паллада, Веста) и четырёх транснептуновых объектов (Эрида, Макемаке, Хаумея, Седна). Кроме того, в ЕРМ включена эфемерида физической либрации Луны и разность динамического и земного времени ТТ-TDB. Эфемериды ЕРМ охватывают интервал времени более 400 лет (1787–2214). Детальное описание эфемерид ЕРМ содержится на сайте <http://iaaras.ru/dept/ephemeris/epm/>.

В ИПА РАН был создан интерактивный сайт для расчёта эфемерид планет и естественных спутников. Адрес сайта:
<http://iaaras.ru/dept/ephemeris/online/>.

Поддерживаются разные наборы величин для выбора вычисляемых величин: даты наблюдений и вычисленные величины в разных форматах, начальная дата и шаг, координаты геоцентрические и топоцентрические для различных пунктов на Земле и т.д. Для расчёта эфемерид планет и естественных спутников Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна используются модели, основанные на численном интегрировании дифференциальных уравнений движения, разработанные в ИПА РАН, кроме того в целях сравнения теорий также доступны теории разных других авторов для соответствующих спутников, а также версии разных вариантов эфемерид планет DE и INPOP (указаны в «ссылках» в конце интерактивного сайта).

Отметим, что формы запроса эфемерид на страницах серверов эфемерид MULTI-SAT, HORIZONS, MPC и ИПА существенно различаются. Важным различием является число значащих цифр, которые выдаются при вычислении эфемерид. Сервер MPC выдает топоцентрические координаты спутников с точностью до единиц секунд дуги, сервер HORIZONS — с точностью до 0.001 секунд дуги, а серверы MULTI-SAT и ИПА — 6 значащих цифр после запятой в секундах дуги. Эти свойства не отражают соотношение точ-

ностей эфемерид, выдаваемых разными службами. Это только их технические возможности и ограничения.

12.3. Возможности сервера эфемерид MULTI-SAT

Одно из наиболее развитых средств, предоставляющих эфемериды спутников планет, является сервер эфемерид MULTI-SAT. Он создавался и развивался, начиная с 2002 года, на основе эфемеридных средств, которые разрабатывались в Государственном астрономическом институте имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (ГАИШ МГУ). При сотрудничестве с Институтом небесной механики и вычисления эфемерид (Institut de Mécanique céleste et de calcul des éphémérides — IMCCE), Париж, Франция эта служба эфемерид спутников планет постоянно поддерживается и развивается. При открытии новых спутников, их эфемериды добавляются в сервер. При появлении новых, более совершенных моделей движения, они вносятся в инструментарий службы. Сообщение о создании сервера эфемерид MULTI-SAT опубликовано в работе (Emel'yanov, Arlot, 2008).

Важным свойством сервера MULTI-SAT является то, что он позволяет вычислять эфемериды не только спутников, но также эфемериды всех больших планет от Меркурия до Плутона, а также эфемериды Солнца и Луны.

В мире существуют различные службы эфемерид спутников планет. Сервер эфемерид MULTI-SAT имеет особенности и преимущества по сравнению с другими аналогами. Перечислим здесь главные из них.

1. Эфемериды вычисляются для всех естественных спутников Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона, для которых имеются кем-нибудь разработанные модели движения на основе наблюдений.

2. Запрос эфемерид осуществляется со страниц интернета в удобной форме с большим разнообразием выбора систем координат, шкал времени, типов выдаваемых величин.

3. Имеется возможность вводить таблицу результатов наблюдений спутников и мгновенно получать разности «О – С» — результат сравнения наблюдений с теорией. Число наблюдений не ограничено.

4. Имеется возможность графического показа видимого расположения спутников относительно планеты.

5. Можно получать прямоугольные планетоцентрические координаты спутников, элементы оскулирующих кеплеровских орбит и их средние значения.

6. Вычисляются не только координаты спутников, но также астрометрические координаты планет.

7. Можно выбрать одну из десяти современных планетных теорий, разработанных в IMCCE, JPL NASA, Институте прикладной астрономии РАН (Питьева, 2013; Pitjeva, Pavlov, 2017).

8. Вычисляются эфемериды взаимных затмений спутников. При этом выдаются гелиоцентрические относительные координаты спутников при специальном способе вычисления светового времени.

9. Можно получить эфемериды и обстоятельства всех взаимных покрытий и затмений спутников, а также затмений спутников планеты.

10. Выдаются различные величины, сопутствующие эфемеридам спутников: видимые звездные величины спутников, планетоцентрические угловые координаты спутников, Земли и Солнца, солнечная фаза, видимые размеры планеты, горизонтальные координаты спутников в месте наблюдения.

Рассмотрим теперь подробнее возможности выбора вариантов шкал времени и систем координат.

Время может быть заданным в шкале UTC или в шкале TT.

В меню выбора эпохи экватора и равноденствия геоэквиаториальной небесной системы координат предлагаются следующие разделы:

J2000 — система координат определяется выбором планетной теории. Для теорий, разработанных в JPL (DE405/LE405, DE406/LE406, ...), IMCCE (INPOP) или ИПА РАН (EPM-2015) это система ICRF. Если выбрана планетная теория VSOP87 или DE200, то система координат будет соответствующей этим теориям.

ICRF — все исходные координаты переводятся в эту систему. Если выбрана планетная теория DE200/LE200 или VSOP87, то координаты спутников или планеты переводятся сначала в систему FK5 так, как описано в работе (Standish, 1982), а затем в систему ICRF,

используя формулы перехода, описанные в работе (Feissel, Mignard, 1998).

FK5 — делается преобразование к этой системе согласно предписанию в работах, указанных в предыдущем пункте.

Mean of the date (IAU76) — сначала координаты преобразуются к системе FK5, а затем к системе экватора и равноденствия эпохи даты по формулам прецессии, предписанным постановлением IAU в 1976 году.

True of the date (IAU76, IAU80) — сначала координаты преобразуются к среднему экватору и равноденствию эпохи даты, как описано в предыдущем пункте, а затем — к истинному экватору и равноденствию путем учета нутации по алгоритму, предписанному постановлением IAU 1980 (Seidelmann, 1982).

Apparent (IAU76, IAU80) — это такое же преобразование к истинному экватору и равноденствию, как описано в предыдущем пункте, однако координаты будут уже не астрометрическими, а видимыми. Как получаются видимые координаты, описано в справочниках (Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac, 1992; Introduction aux éphémérides Astronomiques, 1997). Следует учесть, что в сервере MULTI-SAT при включении учета нутации по стандарту IAU80 на самом деле используются более точные данные о вращении Земли. Как это делается, описано в конце Главы 5.

B1950 — координаты преобразуются к системе, основанной на звездном каталоге FK4. Для этого используются формулы и алгоритм, рекомендованные резолюцией MAC и описанные в работе (Aoki S., Soma M., Kinoshita H., Inoue, 1983). Это преобразование принимает во внимание E-член в выражении для абберрации и зависит от времени наблюдения или эфемериды.

B1900 — аналогично предыдущему пункту, только после преобразования координат в системе FK4 они дополнительно переводятся в систему среднего экватора и равноденствия эпохи B1900 по формулам прецессии Ньюкома.

Имеются еще пункты меню, дающие преобразования, аналогичные предыдущим пунктам, но с моделью прецессии по Ньюкому и нутации согласно резолюции MAC 1948 года. Это следующие пункты: **Mean of Date (Newcomb)**, **Mean of Jan 1 of the**

year (Newcomb), True of Date (Newcomb, IAU1948), Apparent (Newcomb, IAU1948).

Следует учесть, что в сервере MULTI-SAT все эфемериды в системе видимых координат вычисляются без учета искривления луча света, вызванного гравитацией Солнца.

Заметим, что другие системы координат, кроме ICRF, в последнее время уже не используются. Однако сервер MULTI-SAT дает возможность преобразовать эфемериды к системам, которые использовались в прошлые века. Это делается для того, чтобы можно было сравнивать с эфемеридами результаты старых наблюдений, опубликованных в статьях прошлых веков.

В сервере эфемерид спутников планет MULTI-SAT на заданные моменты времени выдаются либо прямые восхождения и склонения выбранного спутника или планеты, либо разности координат двух тел (спутника и планеты или двух спутников), называемые относительными координатами. При этом относительные координаты могут быть *дифференциальными* или *тангенциальными*, как описано в Главе 5.

В специальном меню сервера MULTI-SAT предлагаются на выбор следующие варианты типов выдаваемых данных.

Alpha, Delta (h, m, s.decimals) — на заданные момент времени выдаются прямые восхождения и склонения.

Delta(Alpha), Delta(Delta) (arcsec) — на заданные моменты времени выдаются разности прямых восхождений и склонений двух тел.

Diff. X, Y (arcsec) — на заданные моменты времени выдаются относительные дифференциальные координаты $X = \Delta\alpha \cos \delta$, $Y = \Delta\delta$, где $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ — разности прямых восхождений и склонений двух тел, а δ — склонение тела, относительно которого определены относительные координаты.

Diff. S(arcsec), Position angle (degrees) — аналогично предыдущему пункту, однако вместо X, Y выдается дифференциальное взаимное угловое расстояние и позиционный угол.

Diff. Inclination (deg), A, B (arcsec) — выдаются дифференциальные относительные координаты в небесной относительной системе координат A, B , повернутой на позиционный угол полюса планеты I , так что связь координат дается формулами $X = A \cdot \cos I + B \cdot \sin I$,

$Y = -A \cdot \sin I + B \cdot \cos I$. Позиционный угол полюса планеты I выдается перед координатами A, B .

Tang. X, Y (arcsec),

Tang. S(arcsec), Position angle (degrees),

Tang. Inclination (deg), A, B (arcsec) — аналогично предыдущим пунктам, но координаты выдаются тангенциальные (см. объяснение в Главе 5).

Pseudo-heliocentric X, Y

Pseudo-heliocentric S, Position angle — аналогично предыдущим пунктам, но координаты выдаются гелиоцентрические при специальном порядке определения светового времени для моделирования взаимных затмений двух спутников. Объяснение таких координат дано в Главе 5.

x, y, z, Vx, Vy, Vz Geo-equatorial — выдаются прямоугольные координаты и компоненты скорости выбранного спутника относительно центра планеты или относительно другого выбранного спутника. Оси координат взаимно параллельны осям геоэкваториальной системы координат.

x, y, z, Vx, Vy, Vz Geo-ecliptic — аналогично предыдущему пункту, но оси координат соответствуют геоэклиптике.

x, y, z, Vx, Vy, Vz Geo-planetocentric — аналогично предыдущему пункту, но оси координат соответствуют плоскости экватора планеты. В этой системе ось x направлена в восходящий узел экватора планеты на геоэкваторе.

Kepler osculat. orbit(geo-equat.) — выдаются элементы кеплеровской оскулирующей орбиты с моментом оскуляции соответствующим заданному моменту времени. Элементы относятся к геоэкваториальной системе координат. В конце таблицы выдаются минимальное, среднее и максимальное значение среднего движения, большой полуоси, эксцентриситета и наклона орбиты.

Kepler osculat. orbit(geo-eclipt.) — аналогично предыдущему пункту, однако система координат геоэклиптическая.

Kepler osculat. orbit(planeto-equat.) — аналогично предыдущему пункту, однако система координат планетоэкваториальная.

R, Alpha, Delta Geo-planetocentric — планетоцентрические расстояние (в км), прямое восхождение и склонение (в градусах) в геоэквиаториальной системе координат.

Plan-equat.lat.,long.,sideral of sat. — сидерические широта и долгота спутника относительно планетного экватора. Долгота отсчитывается от восходящего узла экватора планеты на плоскости земного экватора.

Plan-equat.lat.Earth.,lat.long.synodic of sat. — планетоцентрические широта Земли относительно экватора планеты, синодические планетоцентрические широта и долгота спутника в планетоэквиаториальной системе координат. Долгота спутника отсчитывается относительно проекции радиус-вектора Земли на экватор планеты.

Plan-equat.lat.Sun,lat.long.heliocentr.of sat. — планетоцентрические широта Солнца относительно экватора планеты, планетоцентрические широта и долгота спутника в планетоэквиаториальной системе координат. Долгота спутника отсчитывается относительно проекции радиус-вектора Солнца на экватор планеты.

Топос.alt.,azim.of sat.,alt.,azim.of the Sun — топоцентрические угловые координаты спутника: высота над горизонтом, азимут, часовой угол. Топоцентрические угловая высота и азимут Солнца. Фаза Луны (0.0 — для новолуния, 1.0 — для полнолуния). Если в качестве точки наблюдений выбран геоцентр, то для координат выдаются нулевые значения. Следует учесть, что при переводе координат в горизонтальную систему для заданного наземного пункта учитывается только прецессия оси вращения Земли. Атмосферная рефракция не учитывается. Гравитационное искривление луча света также не учитывается.

Dist.Sun.-Plan.,app.plan.R,Phase,magn.of sat. — геоцентрическое угловое расстояние между планетой и Солнцем, видимый уловый радиус планеты, звездная величина выбранного спутника.

Сделаем несколько важных замечаний относительно типов различных данных, которые выдаются сервером эфемерид спутников планет MULTI-SAT.

1. Планетоцентрические планетоэквиаториальные координаты Земли и Солнца позволяют предвычислять периоды возможных взаимных покрытий и затмений главных спутников больших пла-

нет. Поскольку орбиты этих спутников лежат вблизи плоскости экватора планеты, то взаимные явления происходят именно в те периоды времени, когда широты Земли и Солнца близки к нулю.

2. Синодическая планетоцентрическая долгота спутника (отсчитываемая относительно направления на Землю) в случае синхронного вращения спутника позволяет сразу определить, какой стороной повернут спутник к наблюдателю. Фактически центральный видимый меридиан на спутнике имеет в любой момент времени спутникографическую долготу, равную выдаваемой синодической планетоцентрической долготы спутника плюс 180 градусов. Спутникографическая долгота синхронного спутника отсчитывается на теле спутника от направления на планету в сторону, противоположную вращению спутника. Проще говоря, если синодическая планетоцентрическая долгота спутника равна нулю, то для наземного наблюдателя спутник расположен перед планетой. Если эта долгота равна 180 градусов, то спутник находится позади планеты.

3. Если мы хотим определить ориентацию оси вращения планеты по отношению к наземному наблюдателю, это можно сделать по двум выдаваемым углам. Перед координатами A, B (см. выше) выдается позиционный угол полюса планеты I . Наклон оси вращения планеты к картинной плоскости равен планетоцентрической планетоэкваториальной широте Земли (см. выше). Если этот угол положительный, это означает, что северный полюс планеты отклонен к наблюдателю. В частности, так можно определить видимую с Земли ориентацию колец Сатурна.

4. Для проведения наблюдений спутников важно знать угол солнечной фазы и фазы Луны и звездную величину спутника. Эти величины выдаются при соответствующем выборе пункта меню (см. выше).

12.4. Теории и модели в сервере эфемерид MULTI-SAT

Создатели теорий и моделей движения естественных спутников планет постоянно трудятся над разработкой все новых версий. Прогресс в этом деле обеспечивается в основном появлением новых результатов наблюдений. Естественно стремление исследователей использовать самые последние версии. Однако при сравнении результатов различных работ приходится иногда использовать также

предшествующие версии моделей движения спутников планет. Поэтому в службе эфемерид MULTI-SAT (ГАИШ МГУ – ИМССЕ) оставлена возможность вычисления эфемерид с помощью некоторых предшествующих версий.

Современные и самые совершенные модели движения спутников планет применяются в службах эфемерид MULTI-SAT (ГАИШ МГУ – ИМССЕ) (Emel'yanov, Arlot, 2008) и HORIZONS JPL NASA, США (Giorgini et al., 1996).

На страницах службы эфемерид MULTI-SAT имеется таблица, в которой дается список всех возможных для использования моделей движения спутников. Разумеется, по умолчанию в службе включены самые последние и совершенные версии для каждого спутника. Наиболее значимыми характеристиками моделей движения являются следующие:

- период времени и типы использованных наблюдений,
- период времени представления эфемерид,
- тип модели.

Здесь тип модели может быть одним из следующих: численное интегрирование уравнений движения, аналитическая теория движения, аналитическое представление результатов численного интегрирования, прецессирующий эллипс или более сложная комбинация методов.

Приведем здесь описание только тех моделей, которые в службе эфемерид MULTI-SAT предлагаются по умолчанию, как самые совершенные. В некоторых случаях рассматриваются также альтернативные модели. Некоторые модели построены сразу для ряда спутников в некоторых группах. Последовательность будет соответствовать планетам (от Юпитера до Плутона) и типам спутников: главные, близкие, далекие. В обозначениях некоторых моделей будет указан выбор в меню в службе эфемерид MULTI-SAT. Авторы указаны здесь ниже в описаниях моделей. Далее календарные даты приводим в форме ГГГ/ММ/ДД (год, месяц, день).

Спутники Марса Фобос и Деймос.

Выбор из меню Lainey et al. (2015). Модель построена французским исследователем Валери Ленеем (Valery Lainey) в ИМССЕ, Париж, Франция. Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. Использовались все наземные наблюдения на интервале времени 1877–2014 гг., а также на-

блюдения с космических аппаратов (КА), включая последние данные с КА Mars Explorer (МЭХ). Период времени представления эфемерид с 1869/12/31 по 2123/07/03. Сообщение о создании модели опубликовано в статье (Arlot et al., 2017). Эта модель отличается от той, которая опубликована в работе (Laineу, Dehant, Patzold, 2007), только составом используемых наблюдений.

Галилеевы спутники Юпитера.

Выбор из меню J1-J4 Laineу 2009, V2.0. Модель построена французским исследователем Валери Ленеем в ИМССЕ, Париж, Франция. Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. Использовались все наземные фотографические наблюдения и наблюдения на меридианном круге на интервале времени 1891–2007, астрометрические результаты фотометрических наблюдений спутников во время их взаимных покрытий и затмений 1973–2003 гг (каждые 6 лет). Период времени представления эфемерид с 1903/06/01 по 2043/02/13. Сообщение о создании модели опубликовано в работе (Laineу et al., 2009).

Ближкие спутники Юпитера.

Выбор из меню J5, J14–J16 Adjusted on (Jacobson, 2009). Модель построена автором в работе (Емельянов, 2015) путем уточнения параметров прецессирующего эллипса на основе эфемерид этих спутников, вычисленных по теории из публикации (Jacobson, 2013). Интервал времени эфемерид спутников ограничен только интервалом времени планетных эфемерид.

Далекie спутники Юпитера. Восемь далеких спутников Юпитера (J6–J13). Модель опубликована в работе (Emelyanov, 2005). Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. После публикации модель неоднократно переуточнялась на основе более широких рядов наблюдений. Для настоящей версии эфемерид использовались наземные наблюдения 1905–2016 гг. Интервал времени представления эфемерид с 1905 по 2049 год.

Новые далекие спутники Юпитера. Модель опубликована в работе (Емельянов, Кантер, 2005). Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. После публикации модель неоднократно переуточнялась на основе более широких рядов наблюдений. Использовались наземные наблюде-

ния на разных интервалах времени для разных спутников (от 30 сут. до 12 лет). Последние использованные наблюдения выполнены в 2018 году. Интервал времени представления эфемерид для большинства этих спутников с 1974 по 2049 год. Для некоторых спутников интервал меньше.

Главные спутники Сатурна.

Выбор из меню S1–S8 by Lainey et al. (2015). Модель построена французским исследователем Валери Ленеом в ИМССЕ, Париж, Франция. Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. Использовались все наземные наблюдения на интервале времени с 1885 по 2009 год, астрометрические результаты фотометрических наблюдений взаимных явлений в 1995 и в 2009 г, наблюдения с КА Cassini 2004–2012 гг. Сообщение о создании модели опубликовано в работе (Arlot et al., 2017). Период времени представления эфемерид с 1950/01/01 по 2048/01/01.

Спутники Сатурна, соорбитальные главным. Елена S12, Телесто S13, Калипсо S14, Полидевк S34.

Выбор из меню Lainey et al. (2015). Автор V. Lainey (см. выше). Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. Использовались наземные наблюдения 1980–1996 гг. и наблюдения с КА Cassini 2004–2012 гг. Период времени представления эфемерид с 1950/01/01 по 2049/05/16. Сообщение о создании модели опубликовано в работе (Arlot et al., 2017).

Ближние соорбитальные спутники Сатурна. Выбор из меню для S10, S11 by Nicholson et al. (1992). Спутники S10 Janus, S11 Epimetheus. Аналитическая теория. Интервал времени эфемерид спутников ограничен только интервалом времени планетных эфемерид. Опубликована в работе (Nicholson et al., 1992).

Ближние спутники Сатурна Выбор из меню для S15–S18 Jacobson et al. (2008). Спутники Атлас S15, Прометей S16, Пандора S17, Пан S18, Метона S32, Паллена S33, Дафнис S35. Модель прецессирующего эллипса. Основана на наблюдениях с КА Cassini 2004–2012 гг. Интервал времени эфемерид спутников ограничен только интервалом времени планетных эфемерид. Опубликована в работе (Jacobson et al., 2008).

Далекий спутник Сатурна Феба. Дифференциальные уравне-

ния движения решались методом численного интегрирования. Использовались наземные наблюдения 1898–2012 гг. и наблюдения с КА Cassini 2004–2012 гг. Период времени представления эфемерид с 1875/07/01 по 2022/06/30. Сообщение о создании модели опубликовано в работе (Desmars et al., 2013).

Новые далекие спутники Сатурна. Модель опубликована в работе (Емельянов, Кантер, 2005). Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. Использовались наземные наблюдения на разных интервалах времени для разных спутников (от 30 сут. до 12 лет). После публикации модели неоднократно переуточнялась на основе более широких рядов наблюдений. Период времени представления эфемерид для большинства этих спутников с 1974 по 2049. Для некоторых спутников интервал меньше.

Главные спутники Урана. Выбор из меню Lainey et al. (2015). Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. Использовались наземные наблюдения 1874–2012 гг., наблюдения с КА Voyager 2 и астрометрические результаты фотометрических наблюдений взаимных явлений 2007–2008 гг. Период времени представления эфемерид с 1847/01/00 по 2145/01/02. Первая версия модели опубликована в работе (Lainey, 2008). Переуточненная модель на основе более широкого ряда наблюдений опубликована в работе (Arlot et al., 2017).

Главные спутники Урана. Альтернативная модель. Выбор из меню Emelyanov, Nikonchuk 2013. Модель опубликована в работе (Emelyanov, Nikonchuk, 2013). Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. Использовались наземные наблюдения 1787–2008 гг., наблюдения с КА Voyager 2 и астрометрические результаты фотометрических наблюдений взаимных явлений 2007–2008 гг. Период времени представления эфемерид с 1787/02/12 по 2032/01/09.

Ближние спутники Урана. Модель прецессирующего эллипса. Параметры опубликованы в работах (Jacobson, 1998; Pascu et al., 1998). Модель построена на основе наблюдений с космического телескопа HST в 1994 г и наблюдений КА Voyager-2 в 1985–1986 гг. Представление эфемерид ограничено по времени только планетными эфемеридами.

Новые далекие спутники Урана. Модель опубликована в работе (Емельянов, Кантер, 2005). Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. Использовались наземные наблюдения для разных спутников на разных интервалах времени. После публикации модели могли переуточняться на основе более широких рядов наблюдений. Последний год наблюдений 2016. Период времени представления эфемерид для спутников U16, U17 с 1974 по 2049 год, для остальных с 1974 по 2026 год.

Спутник Нептуна Тритон. Выбор из меню Emelyanov et al. (2015). Аналитическая теория спутника построена на основе всех наземных наблюдений, выполненных с 1847 по 2012 г., и наблюдений с КА Voyager-2. Представление эфемерид ограничено по времени только планетными эфемеридами. Опубликовано в работе (Emelyanov, Samorodov, 2015).

Далекий спутник Нептуна Нереида. Модель опубликована в работе (Emelyanov, Arlot, 2011). Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. Модель после публикации переуточнялась. Использовались наземные наблюдения с 1949 по 2017 г. и наблюдения с КА Voyager-2. Период времени представления эфемерид с 1920 по 2049 год.

Ближние спутники Нептуна. Модель прецессирующего эллипса. Параметры опубликованы в работах (Owen, Vaughan, Synnott, 1991; Pascu et al., 2004; Jacobson, 2009). Модель построена на основе наблюдений с космического телескопа HST в 1997 г. и наблюдений КА Voyager-2. Представление эфемерид ограничено по времени только планетными эфемеридами.

Спутники Плутона. Модель опубликована в работе (Beauvalet et al., 2013). Дифференциальные уравнения движения решались методом численного интегрирования. Использовались наблюдения с наземного телескопа VLT-UT4 и космического телескопа HST спутника Харон на интервале времени 1992–2010 гг., а для спутников Никта и Гидра на интервале 2002–2006 гг. Период времени представления эфемерид с 1950/01/01 по 2029/12/31.

12.5. Теории и модели в сервере эфемерид JPL

Современные и самые совершенные модели движения спутников планет применяются в сервере эфемерид тел Солнечной систе-

мы HORIZONS, разработанном в JPL NASA, США (Giorgini et al., 1996). Список всех публикаций, в которых описаны модели движения, приведен в Интернете на странице https://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_ephem
Сделаем краткий обзор этих моделей.

Модели построены на основе всех имеющихся наземных наблюдений и наблюдений с помощью космических аппаратов. Для большей части моделей, созданных Jacobson R. A. и Brozovic M., ссылки на публикации не приводятся. Даны только идентификаторы моделей для отождествления эфемерид.

Для спутников Марса Фобос и Деймос используется теория, описанная в работе (Jacobson, Lainey, 2014) и основанная на всех имеющихся наземных наблюдений и наблюдений с помощью космических аппаратов. Уравнения движения решаются методами численного интегрирования.

Для Галилеевых и близких спутников Юпитера применяется модель JUP310. Ссылка на публикацию не приводится.

Модель движения далеких спутников Юпитера описана в работе (Brozovic, Jacobson, 2017). Уравнения движения решаются методами численного интегрирования.

Для главных, близких и далеких спутников Сатурна применяются оригинальные модели SAT389, SAT393 и SAT368. Ссылки на публикации не приводятся.

Модель движения главных спутников Урана опубликована в работе (Jacobson, 2014). Уравнения движения решаются методами численного интегрирования.

Для близких спутников Урана построена модель URA091, для далеких — модель URA112. Ссылки на публикации не приводятся.

Модель движения спутников Нептуна Тритон, Протей и Нереида опубликована в работе (Jacobson, 2009).

Для внутренних спутников Нептуна используется оригинальная модель NEP088. Ссылка на публикацию не приводится.

Модель движения далеких спутников Нептуна опубликована в работе (Brozovic, Jacobson, Sheppard, 2011).

На основе данных, полученных с КА New Horizons, построены новые модели движения спутников Плутона (Jacobson, Brozovic, Buie, Porter, et al., 2015).

12.6. Спутники планет в виртуальных обсерваториях

В мире разрабатываются так называемые Виртуальные обсерватории (ВО). Пока еще нет четко устоявшегося понимания этого термина. Чаще всего виртуальной обсерваторией называют набор инструментов для работы с ресурсами астрономических данных. Данные создают сами астрономы — эксперты в соответствующих областях. Виртуальная обсерватория аккумулирует сведения об этих ресурсах, описывает их, классифицирует и разрабатывает методы доступа к ним: форматы, стандарты и т.п.

Попытки найти виртуальную обсерваторию, содержащую спутники планет, дают единственный результат — это Виртуальная обсерватория Института небесной механики и вычисления эфемерид (Institut de Mécanique céleste et de calcul des éphémérides — IMCCE), Париж, Франция. Доступ в эту виртуальную обсерваторию осуществляется по адресу <http://vo.imcce.fr/>.

Большая часть компонент этой ВО находится в стадии разработки. Попытки найти здесь средства, касающиеся спутников планет, приводят только к возможности вычисления эфемерид спутников планет в табличном виде. Адрес этого средства

<http://vo.imcce.fr/webservices/skybot/?forms=resolver>.

Набор спутников в этой виртуальной обсерватории весьма ограничен. Это спутники Марса (2), Галилеевы спутники Юпитера (4), главные спутники Сатурна (8), главные спутники Урана (5), спутники Нептуна Тритон и Нереида, некоторые близкие спутники Урана (3), близкие спутники Нептуна (6). Эти 30 объектов составляют небольшую часть от всех известных 189 спутников планет.

12.7. Стандарты фундаментальной астрономии

Научная деятельность в области динамики Солнечной системы развивается и практикуется во многих крупных научных центрах и в отдельных лабораториях мира. Современная технология научных исследований состоит из следующих основных практических действий:

- производство наблюдений,
- накопление и сопровождение баз данных,
- составление вычислительных программ для обработки данных.

Каждое из этих действий осуществляется в огромной сети больших и малых коллективов исследователей. Устанавливаются отно-

шения сотрудничества с сопутствующим соперничеством. Основные мотивации две: материальное обеспечение и удовлетворение амбиций. Условием оптимального ведения дел в мировом масштабе является гибкая координация научных исследований. Для этого чаще целенаправленно, а иногда и стихийно создаются средства координации: международные Центры, Советы и Союзы. Одной из функций таких центров является разработка стандартов. Стандарты необходимы для согласованности научных исследований, сопоставления результатов. Часто стандарты диктуются каким-нибудь наиболее сильным и доминирующим научным центром. Иногда стандарты устанавливаются в результате создания крупного комплекса динамических моделей небесных тел, основанных на большой базе данных наблюдений.

Перечислим наиболее крупные научные предприятия в области динамики тел Солнечной системы.

Международный астрономический союз (МАС) — International astronomical union (IAU) на своих регулярных ассамблеях утверждает предложения астрономических стандартов. Адрес в Интернете: <https://www.iau.org/>

Центр малых планет — Minor planet center (MPC) содержит и сопровождает базу данных всех наблюдений малых тел — астероидов, карликовых планет, комет, далеких спутников планет. MPC собирает данные, обеспечивает моделирование движения малых тел, а также предоставляет мировому сообществу целый ряд средств исследований: эфемеридные вычислительные программы и средства анализа данных. Как доминирующее научное предприятие MPC оказывается источником и проводником стандартов в своей области. Адрес MPC в Интернете:

<https://minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>

В частности, MPC устанавливает стандартный формат представления результатов наблюдений малых тел и стандарт назначения кодов обсерваторий. Об этих стандартах можно узнать в Интернете по адресам:

<https://minorplanetcenter.net/iau/info/ObsFormat.html>

<https://minorplanetcenter.net/iau/lists/ObsCodesF.html>

Навигационно-вспомогательный информационный фонд — Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF) Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства Соединенных штатов Америки — National Aeronautics and

Space Administration (NASA) был создан в Лаборатории реактивного движения - Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology для руководства разработкой и внедрением информационной системы "SPICE" (The SPICE Toolkit). SPICE используется в течение всего жизненного цикла планетарных научных миссий НАСА, чтобы помочь ученым и инженерам разрабатывать миссии, планировать научные наблюдения, анализировать научные данные и выполнять различные инженерные функции, связанные с полетными проектами. Команда NAIF занимается вопросами производства высокоточной, четко задокументированной и легко используемой информации, необходимой ученым и инженерам. Это основные задачи команды NAIF.

Пакет средств SPICE является системой баз данных и вычислительных программ для решения задач фундаментальной астрономии.

Адрес NAIF в Интернете: <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/about.html>

Адрес SPICE в Интернете:

<https://naif.jpl.nasa.gov/naif/aboutspice.html>

Совершенно естественно, что в системе NAIF-SPICE устанавливаются совершенно четкие и строгие стандарты баз данных и программных средств вычислений. Эти стандарты обеспечивают функционирование всех частей системы. Программы, предоставляемые в системе SPICE, записаны в нескольких вариантах в соответствии с языками программирования Фортран, Си и некоторых других. Естественно, что исследователи всего мира, использующие эти предоставляемые средства, вынуждены следовать стандартам NAIF-SPICE.

Стандарты фундаментальной астрономии - Standards of Fundamental Astronomy (SOFA) Это служба с задачей установить и поддерживать доступный и авторитетный набор алгоритмов и процедур, реализующих стандартные модели, используемые в фундаментальной астрономии. Служба управляется международной комиссией, Советом SOFA, назначенной Отделом А Фундаментальная астрономия Международного астрономического союза (МАС) – IAU Division A – Fundamental Astronomy. SOFA также тесно сотрудничает с Международной службой вращения Земли и систем отсчета (IERS). Алгоритмы и программы в службе SOFA записаны на языках программирования Фортран и Си (ANSI C).

Адрес SOFA в Интернете: <http://www.iausofa.org/>

Международная служба вращения Земли и систем отсчета — International Earth Rotation and Reference System Service (IERS).

Основными задачами IERS являются обслуживание астрономических, геодезических и геофизических сообществ путем предоставления данных и стандартов, касающихся вращения Земли и систем отсчета. Адрес IERS в Интернете:

https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html

Литература к Главе 12

Емельянов Н. В., Кантер А. А. Орбиты новых внешних спутников планет на основе наблюдений. *Астрономический вестник.* 2005. Т. 39. № 2. Р. 128–140.

Емельянов Н. В. Возмущенное движение при малых эксцентриситетах. *Астрономический вестник.* 2015. Т. 49. № 5. С. 380–394.

Космодамианский Г. А. Численная теория движения Галилеевых спутников Юпитера. *Астрономический вестник.* 2009. Т. 43. № 6. С. 483–492.

Путьева Е. В. EPM2011 — обновленные планетные эфемериды ИПА РАН и их использование для научных исследований. *Астрономический вестник.* 2013. Т. 47. С. 419–435.

Порошина А. Л. Численные теории движения Тритона и Нереиды. Письма в *Астрономический журнал.* 2013. Т. 39. № 12. С. 969–974.

Acton C., Bachman N., Folkner W. M., Hilton J. SPICE as an IAU recommendation for planetary ephemerides. IAU General Assembly. 2015. Meeting #29. #2240327.

Aoki S., Soma M., Kinoshita H., Inoue K. Conversion matrix of epoch B 1950.0 FK 4-based positions of stars to epoch J 2000.0 positions in accordance with the new IAU resolutions. *Astronomy and Astrophysics.* 1983. V. 128. P. 263–267.

Arlot J.-E., Emelyanov N. V. The NSDB natural satellites astrometric database. *Astronomy and Astrophysics.* 2009. V. 503. P. 631–638.

- Arlot J.E., Cooper N., Emelyanov N., Lainey V., Meunier L. E., Murray C., Oberst J., Pascu D., Pasewaldt A., Robert V., Tajeddine R., Willner K.* Natural satellites astrometric data from either space probes and ground-based observatories produced by the European consortium «ESPaCE». Notes scientifiques et techniques de l'Institut de Mécanique céleste et de calcul des éphémérides. S105. 2017.
- Beauvalet L., Robert V., Lainey V., Arlot J.-E., Colas, F.* ODIN: a new model and ephemeris for the Pluto system. *Astronomy and Astrophysics*. 2013. V. 553, id.A14, 22 pp.
- Brozovic M., Jacobson R. A., Sheppard S. S.* The Orbits of Neptune's Outer Satellites. *Astronomical Journal*. 2011. V. 141. Issue 4. Article id. 135, 9 pp.
- Brozovic M., Jacobson R. A.* The Orbits of Jupiter's Irregular Satellites. *Astronomical Journal*. 2017. V. 153. Issue 4. article id. 147, 10 pp.
- Desmars J., Li S. N., Tajeddine R., Peng Q. Y., Tang Z. H.* Phoebe's orbit from Наземные and space-based observations. *Astronomy and Astrophysics*. 2013. V. 553. id. A36. 10 pp.
- Emelyanov N. V.* Ephemerides of the outer Jovian satellites. *Astronomy and Astrophysics*. 2005. V. 435, p. 1173–1179.
- Emel'yanov N. V., Arlot J.-E.* The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT. *Astronomy and Astrophysics*. 2008. V. 487. P. 759–765.
- Emelyanov N. V., Arlot J.-E.* The orbit of Nereid based on observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2011. V. 417. Issue 1. P. 458–463.
- Emelyanov N. V., Nikonchuk D. V.* Ephemerides of the main Uranian satellites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2013. V. 436. P. 3668–3679.
- Emelyanov N. V., Samorodov M. Yu.* Analytical theory of motion and new ephemeris of Triton from observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2015. V. 454. P. 2205–2215.
- Explanatory Supplement to the *Astronomical Almanac*. Edited by P.K. Seidelmann. University Science Books. Mill Valley. California. 1992.

- Feissel M., Mignard F.* The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences. *Astronomy and Astrophysics*. 1998. V. 331. P. L33–L36.
- Giorgini J. D., Yeomans D. K., Chamberlin A. B., Chodas P. W., Jacobson R. A., Keesey M. S., Lieske J. H., Ostro S. J., Standish E. M., Wimberly R. N.* JPL's On-Line Solar System Data Service. *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1996. V. 28. P. 1158–1158.
- Introduction aux éphémérides Astronomiques. Supplément explicatif à la connaissance des temps. (eds. Simon J.-L., Chapront-Touzé M., Morando B., Thuillot W.). Bureau des Longitudes. Paris. Publisher: Les éditions de physique, France. 1997. 450 pp.
- Jacobson R. A.* The Orbits of the Inner Uranian Satellites from Hubble Space Telescope and Voyager 2 Observations. *Astronomical Journal*. 1998. V. 115. Issue 3. P. 1195–1199.
- Jacobson R. A., Spitale J., Porco C. C., Beurle K., Cooper N. J., Evans M. W., Murray C. D.* Revised orbits of Saturn's small inner satellites. *Astronomical Journal*. 2008. V. 135. P. 261–263
- Jacobson R. A.* The orbits of the neptunian satellites and the orientation of the pole of Neptune. *Astronomical Journal*. 2009. V. 137. P. 4322–4329.
- Jacobson R. A.* The orbits of the regular Jovian satellites, their masses, and the gravity field of Jupiter. American Astronomical Society, DDA Meeting, #44, #402.04, 2013.
- Jacobson, R. A.* The Orbits of the Uranian Satellites and Rings, the Gravity Field of the Uranian System, and the Orientation of the Pole of Uranus. *Astronomical Journal*. 2014. V. 148. Issue 5. Article id. 76, 13 pp.
- Jacobson R. A., Lainey V.* Martian satellite Orbits and Ephemerides. *Planetary and Space Science*. 2014. V. 102. P. 35–44.
- Jacobson R. A., Brozovic M., Buie M., Porter S., Showalter M., Spencer J., Stern S. A., Weaver H., Young L., Ennico K., Olkin C.* The Orbits and Masses of Pluto's Satellites after New Horizons. American Astronomical Society. 2015. DPS meeting #47. id. 102.08.
- Lainey V., Dehant V., Patzold M.* First numerical ephemerides of the

- Martian moons. *Astronomy and Astrophysics*. 2007. V. 465. p. 1075–1084.
- Lainey V.* A new dynamical model for the Uranian satellites. *Planetary and Space Science*. 2008. V. 56. P. 1766–1772.
- Lainey V., Arlot J.-E., Karatekin O., van Hoolst T.* Strong tidal dissipation in Io and Jupiter from astrometric observations. *Nature*. 2009. V. 459. Issue 7249. P. 957–959.
- Nicholson P. D., Hamilton D. P., Matthews K., Yoder C. F.* New observations of Saturn's coorbital satellites. *Icarus*. 1992. V. 100. P. 464–484.
- Owen W. M., Vaughan R. M., Synnott S. P.* Orbits of the six new satellites of Neptune. *Astronomical Journal*. 1991. V. 101. P. 1511–1515.
- Pascu D., Rohde J. R., Seidelmann P. K., Wells E. N., Kowal C. T., Zellner B. H., Storrs A. D., Currie D. G., Dowling D. M.* Hubble Space Telescope Astrometric Observations and Orbital Mean Motion Corrections for the Inner Uranian Satellites. *Astronomical Journal*. 1998. V. 115. Issue 3. P. 1190–1194.
- Pascu D., Rohde J. R., Seidelmann P. K., Wells E. N., Hershey John L., Storrs A. D., Zellner B. H., Bosh A. S., Currie D. G.* Hubble Space Telescope Astrometric Observations and Orbital Mean Motion Corrections for the Inner Satellites of Neptune. *Astronomical Journal*. 2004. V. 127. N. 5. P. 2988–2996.
- Pitjeva E. V., Pavlov D. A.* EPM2017 and EPM2017H 2017. <http://iaaras.ru/en/dept/ephemeris/epm/2017/>. Accessed 7 Nov 2017.
- Seidelmann P. K.* 1980 IAU theory of nutation – The final report of the IAU Working Group on Nutation. *Celestial Mechanics*. 1982. V. 27. P. 79–106.
- Standish, E. M., Jr.* Orientation of the JPL Ephemerides, DE200/LE200, to the dynamical equinox of J2000. *Astronomy Astrophysics*. 1982. V. 114. P. 297–302.