

ЭФЕМЕРИДНЫЕ ТЕОРИИ JPL DE, INPOP И EPM

© 2024 г. Ю. А. Моисеев^{1,*}, Н. В. Емельянов^{2,**}

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, Москва, Россия

*E-mail: lxyniti@gmail.com

**E-mail: emelia@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 10.06.2024 г.

После доработки 09.08.2024 г.

Принята в печать 15.08.2024 г.

Приведен обзор и описание трех ведущих источников эфемерид планет: эфемерид Лаборатории реактивного движения (JPL) и разрабатываемой ими эфемеридной теории DE; эфемерид Института небесной механики и Эфемеридных вычислений IMCCE и разрабатываемой ими теории (INPOP); разрабатываемой в ИПА РАН эфемеридной теории (EPM). Описаны используемые при построении каждой из теорий методы и наборы наблюдательных данных. Произведено сравнение эфемерид, вычисленных в рамках этих теорий, на примере будущих космических миссий. Показано, что различия в вычисленных положениях не несут систематического характера и представляют скорее случайное расхождение, вызванное различиями динамических моделей и учтенных наблюдательных данных. Общий вывод из сравнения эфемерид таков: ни один из рассмотренных вариантов JPL DE, EPM и INPOP не обладает преимуществом по точности. Все три варианта равноценны. Любой из трех вариантов эфемерид может использоваться на практике.

Ключевые слова: планеты, эфемериды

DOI: 10.31857/S0004629924110075 EDN: JKXDNY

1. ВВЕДЕНИЕ

Современная эфемеридная астрономия является важным инструментом для предсказания положения планет и других небесных объектов в определенные моменты времени. Она позволяет определить точные координаты планет и спутников, что необходимо для навигации в космическом пространстве, планирования космических миссий и астрономических наблюдений, а также поиска новых небесных тел [1]. Создание планетных эфемерид требует сбора и обработки большого объема данных, полученных из наблюдений, и вычислений. Основным источником данных — это наблюдения с космических и наземных телескопов, которые фиксируют положение планет на небесной сфере. Затем эти данные анализируются и используются для составления точных эфемеридных таблиц.

Трудности вычисления планетных эфемерид также связаны с точностью исходных данных. Даже небольшая ошибка в измерениях или неточность моделей гравитационного взаимодействия может привести к значительным отклонениям в результирующих эфе-

меридах. Поэтому необходимо постоянно улучшать методы наблюдений и вычислений, чтобы достичь максимальной точности.

Современная эфемеридная астрономия имеет огромное значение для практических приложений в космической навигации и астрономических исследованиях. Благодаря имеющимся эфемеридам небесных тел можно планировать космические миссии с высокой точностью, определять моменты прохождения планет мимо друг друга для проведения научных наблюдений и изучения гравитационных явлений в Солнечной системе. В целом, современная эфемеридная астрономия является основой для многих космических исследований и обеспечивает точность и надежность во многих областях, связанных с изучением и использованием космического пространства. Она позволяет улучшить навигацию, планирование и астрономические исследования, а также изучение гравитационных явлений и эволюцию орбит планет.

Численно определяемые планетные и лунные эфемериды, играющие важную роль в развитии совре-

менной астрономии, непрерывно улучшаются: увеличивается количество наблюдательных данных, уточняются используемые математические модели. Основу любой эфемеридной теории составляют наблюдательная информация и математические модели, а также методы обработки данных. Лидирующими эфемеридными теориями на сегодняшний день являются разрабатываемая в России с 1970-х годов EPM, французская теория INPOP (начиная с 2000-х гг.), а также разрабатываемая в американской Лаборатории реактивного движения (JPL) теория DE, работа над которой ведется с 1960-х гг.

EPM (Ephemerides of Planets and the Moon — эфемериды планет и Луны) — эфемеридная теория, разрабатываемая с 1970-х гг. в российском Институте теоретической астрономии, а затем в Институте прикладной астрономии РАН (ИПА РАН). Реализуемая динамическая модель данной теории включает в себя Солнце, все восемь больших планет Солнечной системы, Плутон, Луну, а также астероидный пояс между Марсом и Юпитером (в форме выделенных 180 материальных точек), кольцо из транснептуновых объектов (ТНО) в виде 160 материальных точек и 30 выделенных транснептуновых тел, имеющих хорошо определенные значения масс. Последней версией данной теории является (сменившая EPM2017) версия EPM2021 [2], дополненная новыми наблюдениями, в том числе Пулковской, Юннаньской и Шанхайской обсерваторий, а также данными Марсианского разведывательного спутника (Mars Reconnaissance Orbiter), спутника Марс Одиссей (Mars Odyssey) и исследующего Юпитер аппарата Юнона (Juno) вплоть до 2017 г.

Эфемериды INPOP (d'Integrateur numerique planetaire de l'Observatoire de Paris — планетное численное интегрирование Парижской обсерватории) разрабатываются в Институте небесной механики и эфемеридных вычислений (IMCCE), заменившем Бюро долгот во Франции. Реализуемая динамическая модель включает в себя большие планеты, Луну, Плутон и 14 000 астероидов. Одна из последних опубликованных версий теории, INPOP19a [3], сменившая INPOP17a [4], включила в себя наблюдения и измерения спутников Марс Экспресс (MEX — Mars Express), Юнона (Juno), а также данные со спутника Кассини (Cassini). Орбиты астероидов уточнялись с использованием второго выпуска данных космической обсерватории Gaia DR2.

Планетные и лунные эфемериды JPL DE (Jet Propulsion Laboratory Development Ephemeris — Разработка эфемерид Лаборатории реактивного движения) разрабатываются в США в Калифорнийском

технологическом институте. Динамическая модель, используемая для определения положений небесных тел, включает в себя положение Солнца, барицентров систем восьми крупных планет, Луны и барицентра системы Плутона. Рассматриваются и предвычисляются также углы либрации Луны и соответствующие скорости их изменения. На смену эфемеридной теории DE430 [5], опубликованной в 2014 г., пришли ее обновленные версии — эфемеридные теории DE440 и DE441 [6]: в них добавлен учет возмущений от 30 отдельных объектов пояса Койпера (сам пояс Койпера моделируется в виде 36 материальных точек на удалении от Солнца в 44 а. е.); обновлены наблюдательные данные — радиодальномерные наблюдения спутников Юнона (Juno) и Кассини (Cassini), что позволило значительно уточнить орбиты Юпитера и Сатурна. Общий рост точности при переходе к DE440 и DE441 обуславливается добавлением наблюдательных данных за 7 лет.

Разрабатываемые теории учитывают большие объемы наблюдательных и экспериментальных данных. Подбор оптимальных параметров в них основывается на численном интегрировании уравнений движения большого числа взаимодействующих тел. Регулярно производятся попытки уточнить динамические характеристики используемых моделей, учесть факторы и взаимодействия больших порядков малости.

Ввиду того, что разные эфемеридные теории используют разные ряды наблюдений, реализуют расчеты движения различного набора тел с использованием в том числе различных методов численного интегрирования и обработки данных, получаемые в результате эфемериды небесных тел не совпадают между собой. Таким образом, сравнение получаемых различными теориями значений, может служить некоторой оценкой границы достоверности данных, но не дает принципиального ответа на вопрос о точности той или иной эфемеридной теории: используемые данные и методы в каждом случае достаточно достоверны сами по себе, чтобы не отвергать результаты одной модели на основании вычислений другой.

Сравнение пространственных положений объектов в различных теориях, однако, представляет собой интерес именно в контексте оценки точности эфемеридных данных. Систематическое отклонение значений, получаемых в рамках одной теории, от результатов вычислений положения небесных тел в рамках двух других моделей может стать косвенным свидетельством отклонений в точности используемой теории. В настоящей статье мы приводим подробные

сведения о каждой из трех эфемеридных теорий на примере последних их опубликованных версий (DE441, INPOP19a и INPOP21a [7], EPM2021), а затем рассмотрим различия в прогнозируемых ими положениях небесных тел на интервалах времени актуальных планирующихся миссий.

2. ЭФЕМЕРИДНЫЕ ТЕОРИИ

2.1. Эфемериды EPM и реализация EPM2021

2.1.1. Общие сведения

EPM (Ephemerides of Planets and the Moon — эфемериды планет и Луны) — это эфемеридная теория, разрабатываемая с 1970-х гг. в Институте прикладной астрономии РАН в России [8, 9, 10]. Она представляет собой математическую модель, используемую для расчета и прогнозирования движения небесных тел, таких как планеты, спутники и кометы, с высокой точностью. Динамическая модель теории EPM многопараметрическая и использует сложные математические уравнения, учитывающие различные возмущающие факторы помимо основного гравитационного взаимодействия между небесными телами, в том числе эффекты теории относительности и геометрическую форму входящих в состав солнечной системы тел.

История развития EPM началась в 1970-х годах. Теория разрабатывалась с целью улучшения точности эфемеридных данных, используемых в астрономии и космической навигации. Используемые методы и подходы постоянно развивались: так, методика вычислений изменилась от использования одношагового интегратора при расчетах в версии EPM2017 до разработанного к 2020 г. интегратора ABDM, основанного на схеме Адамса-Башфорта-Мултона, что значительно улучшило производительность и ускорило вычисления. В ходе разработки EPM было проведено обширное исследование и анализ астрономических данных, собранных различными обсерваториями и космическими аппаратами. Были учтены и скомпенсированы различные факторы, влияющие на движение небесных тел;

На сегодняшний день EPM предоставляет пользователям высокоточные эфемериды объектов солнечной системы и является одной из лидирующих среди публично доступных эфемеридных теорий, результаты ее вычислений используются в астрономии и космической навигации. Она играет важную роль в планировании и выполнении космических миссий, а также в изучении и понимании небесных тел и их движения [11, 12, 13, 14, 15].

EPM основана на обширных наблюдательных данных, полученных как с помощью оптических

наблюдений, так и с использованием радиоастрономических методов. EPM постоянно обновляется и совершенствуется с учетом новых наблюдений. Последняя версия модели EPM2021 покрывает движение тел во временном разрезе более 400 лет, с 1787 по 2214 гг. Наряду с EPM2021 также опубликована версия EPM2021H, покрывающая временной интервал с 13 199 года до н.э. по 17 191 год н.э., в пределах 400-летней шкалы времени EPM2021, не имеющего значительных отличий в движении небесных тел. Подобный временной масштаб дает значительную информацию об эволюции нашей планетной системы.

2.1.2. Динамическая модель

Динамическая модель эфемеридной теории EPM включает в себя 8 больших планет, Луну, Солнце, пояс астероидов с некоторыми выделенными объектами, а также пояс транснептуновых объектов с отдельным учетом некоторых крупнейших из них. Основой модели является параметризованная пост-ньютоновская метрика N тел в барицентрической системе координат (BCRS) в барицентрической шкале времени (TDB). При этом 16 основных тел:

- Солнце,
- Луна,
- 8 крупных планет,
- Плутон,

а также астероиды:

- Церера,
- Паллада,
- Веста,
- Ирида,
- Бамберга.

подчиняются уравнениям движения Эйнштейна-Инфельда-Гофмана [16]; остальные тела, в угоду производительности, моделируются в качестве не взаимодействующих друг с другом, но притягивающихся в Ньютоновском выражении к выделенным шестнадцати объектам.

Помимо крупных тел динамическая модель EPM учитывает также:

- возмущения от 277 астероидов из пояса астероидов между Марсом и Юпитером и 30 крупнейших транснептуновых объектов;
- возмущения от двух колец: кольца астероидов и кольца ТНО;

- возмущения от динамического сжатия Солнца;
- релятивистские эффекты (прецессия Ленза-Тирринга).

Луна в динамической модели рассматривается в виде эластичного тела с вращающимся жидким ядром, в связи с чем в модель включены следующие уравнения:

- возмущения орбиты Луны в гравитационном поле Земли;
- возмущения орбиты Луны от лунных и солнечных приливов на Земле;
- вращательного искажения фигуры Луны и ее изменение благодаря земному тяготению;
- вращательного момента, возникающего в результате взаимодействия лунной коры и жидкого ядра.

Значимым улучшением модели EPM2021 относительно EPM2017 также стал учет троянских астероидов Юпитера в виде двух точечных масс, помещенных в точках Лагранжа L4 и L5 Юпитерианской орбиты.

2.1.3. Астероиды в динамической модели EPM

Предыдущая версия эфемеридной теории EPM2017 включала в рассмотрение 301 крупный астероид в виде точечных масс. В новой версии EPM2021 число вошедших в динамическую модель астероидов составило 277. Для составления итогового списка учитываемых объектов были собраны 343 объекта из модели DE430, а также 287 объектов из работы [17], авторы которой брали для рассмотрения модель твердого кольца для моделирования возмущений от пояса астероидов. Эти 287 тел представляют собой динамически не вписывающийся в модель кольца остаток, влияние которого на внутренние планеты не может быть описано в рамках рассмотренной теории. Итоговый список объектов, после исключения дублирующих друг друга, состоял из 379 тел, которые затем подверглись процедуре оценки масс.

Определение массы астероидов само по себе представляет интересную задачу для многих исследователей [18, 19, 20]. На сегодняшний день существует два надежных способа определения массы таких объектов. Точное определение масс возможно:

- в двойных системах ((243) Ида, (22) Каллиопа, (90) Антиопа и др.);

- в случае астероидов, исследованных космическими аппаратами, вышедшими на их орбиту ((4) Веста, Церера).

Массы некоторых объектов могут быть оценены через их влияние на орбиты соседних астероидов ((7) Ирида), но точность подобных оценок может различаться, а результаты не всегда хорошо воспроизводятся в разных работах.

Для большинства астероидов единственным реализуемым методом оценки массы являются приближенные вычисления с использованием инфракрасных наблюдений, позволяющих получить оценку формы и размера объекта; масса затем определяется исходя из предположений о химическом составе астероида на основе его класса.

Одной из основных классификаций астероидов является предложенная в 1984 г. классификация Толена [21]. На основании широкополосной спектроскопии в инфракрасном диапазоне выделяются 14 типов астероидов, разделенных на 3 группы: C (углеродные), S (кремниевые) и X (железные) астероиды. Группы в свою очередь делятся на классы (M, E, A, D...), некоторым астероидам присваивается смешанный класс на основании особенностей их спектральных и иных характеристик.

Внешний и внутренний состав небольших тел считается одинаковым, так как внутренняя дифференциация для них ввиду размера не характерна, и такие тела полагаются однородными. Поэтому спектроскопические данные о составе поверхности служат относительно достоверным источником информации о составе объекта в целом, что при известной из наблюдательных данных форме и, как следствие, объеме объекта дает приближенную оценку его массы.

В версии EPM2017 массы 30 астероидов определялись чисто динамически исходя из возмущений, оказываемых ими на внутренние планеты, массы остальных задавались исходя из средних значений плотности, соответствующих их спектральным классам. В обновленной версии модели EPM2021 для оценки масс астероидов, входящих в рассмотрение, все ранее определенные массы использовались в качестве априорной информации в регуляризирующем алгоритме Тихонова, обобщающем и расширяющем метод наименьших квадратов. Из изначально определенных 379 масс, 102 оказались отрицательными (все в пределах статистической погрешности), поэтому для окончательного построения динамической модели использовались только 277 оставшихся объектов.

Гравитационное влияние объектов пояса астероидов, не вошедших в выделенные 277, моделировалось в виде однородного кольца из 180 материальных точек известной массы. Аналогичным образом в рамках динамической модели выделены 30 транснептуновых объектов и 160-точечное однородное транснептуновое кольцо.

2.1.4. Параметры динамической модели

При реализации описанной выше динамической модели определяется набор из более чем 400 параметров:

- кеплеровские элементы орбит планет;
- кеплеровские элементы орбит 18 спутников внешних планет;
- гелиоцентрическая гравитационная постоянная;
- отношение масс Земли и Луны;
- углы ориентации планетных эфемерид относительно ICRF2;
- параметры вращения Марса;
- массы 277 астероидов;
- масса астероидного кольца (пояс астероидов);
- масса кольца транснептуновых объектов;
- коэффициент в модели электронной плотности солнечной короны;
- эффекты фазы внешних планет (отличия динамического барицентра систем от оптического центра света).

Как сообщают сами авторы модели, в решении ЕРМ используются априорные значения масс 17 (из 277) астероидов, известные с хорошей точностью благодаря наблюдениям КА, а также массы двойных астероидов; наряду с ними в качестве априорных используются массы 30 ТНО. Параметры электронной плотности короны Солнца, а именно нормировочный множитель в выражении для ее плотности, влияют на временную задержку для световых сигналов, тем самым искажая фактические положения объектов при наблюдениях вблизи солнечного диска.

2.1.5. Наблюдательные данные

Наблюдательные данные для построения и определения параметров динамической модели обширны и получены в ходе различных космических миссий и наземных наблюдений.

Для определения орбиты Луны основным источником информации служит лазерная локация. Дальнометрия с помощью установленных на Луне угол-

ковых отражателей позволяет определить расстояние от наблюдательной станции до естественного спутника Земли с точностью до 2–3 см. Для определения орбит внешних планет используются радиолокационные наблюдения искусственных спутников на их орбитах, а также радиолокация и доплеровские наблюдения марсианских роверов. Дальномерные наблюдения внешних планет совершались в намного меньших количествах, поэтому при построении теории использовались оптические наблюдения планет и их спутников.

Наблюдательную основу старых версий эфемеридной теории ЕРМ составили более 200 000 различного рода наблюдений с 1913 по 2018 гг. (в том числе Пулковской обсерватории), данные лазерной локации Луны и спутниковые измерения, в том числе меркурианского аппарата Мессенджер (MESSENGER), аппаратов Кассини (Cassini), Венеры Экспресс (Venus Express, VEX) и Марс Экспресс (Mars Express, MEX).

Версию модели ЕРМ2021 расширили наземные оптические наблюдения из Пулковской обсерватории, Юннаньской и Шанхайской (наблюдения крупнейшего спутника Нептуна — Тритона, полученные в период с 2003 по 2009 гг.) обсерваторий. Также в ЕРМ2021 вошли следующие наблюдения:

- 4 нормальных точки аппарата Юнона (в 2016–2017 гг.);
- 780 нормальных точек Марсианского Разведывательного Спутника (полученных с 2014 по 2017 гг.);
- 3226 наблюдений аппарата Марс Одиссей (также с 2014 по 2017 гг.);
- 1211 расстояний до Луны, полученных в обсерватории Апачи-Пойнт, с помощью лазерной локации в 2016–2020 гг.;
- 3789 нормальных точек лунной лазерной локации, полученных с использованием 1024 нм ИК-лазера во Франции в Обсерватории Лазурного берега (Observatoire de la Cote d'Azur) с сентября 2017 по июль 2021 г.;
- 261 нормальная точка лунной лазерной локации от Лазерной обсерватории Матеры (Италия) с 2017 по 2021 г.;
- 101 нормальная точка лунной лазерной локации от Геодезической обсерватории Ветцеля (Германия) с 2018 г.;

Используемые в ЕРМ наблюдательные данные приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Наблюдательные данные эфемеридной теории EPM

Планета	Тип наблюдения	Аппарат/обсерватория	Даты	<i>N</i>
Луна	Лазерная локация	McDonald	1969–1985	3554
		Nauchny	1982–1984	25
		Haleakala	1984–1990	747
		Matera	2003–2021	358
		MLRS1/MLRS2	1983–2013	3865
		Wettzell	2018–2020	101
		Apache Point	2006–2020	3782
		Grasse	1984–2021	17 565
Меркурий	Радиолокация		1964–1997	746
		MESSENGER	2011–2014	1141
Венера	Радиолокация		1961–1995	1354
	Расстояния АМС	MAGELLAN	1992–1994	165
		Cassini	1998–1999	2
		Venus Express	2006–2009	1288
	РСДБ	MAGELLAN, Venus Express	1990–2007	22
Марс	Радиолокация		1965–1995	403
	Расстояния АМС	Mars Express	2005–2016	1174
		Mars Global Surveyor	1998–2006	7342
		Mars Odyssey	2002–2007	5257
			2014–2017	3226
		Mars Reconnaissance Orbiter	2006–2007	380
	РСДБ		2014–2017	780
		Viking Lander 1,2	1976–1982	1258
		Mars Pathfinder	1997	90
			1989–2010	136
Юпитер	РСДБ		1996–1997	24
	Расстояния АМС		1973–2000	7
		Juno	2016–2017	4

Таблица 1. Продолжение

Планета	Тип наблюдения	Аппарат/обсерватория	Даты	<i>N</i>
Сатурн	Расстояния АМС	Cassini	1979–2006	33
			2004–2014	161
Уран	3D АМС	Voyager–2	1986	1
	Наземные наблюдения		1924–2013	35 145
Нептун	3D АМС	Voyager–2	1989	1
	Наземные наблюдения		1924–2007	5254
Плутон	Наземные наблюдения		1931–2013	

Примечание. *N* — количество наблюдений.

Таблица 2. Наземные наблюдения в эфемеридной теории ЕРМ по 2018 г.

Планета	Станция
Юпитер и 4 его спутника,	Usno, Tabmount, Wash26, Wash6, Wash9,
Сатурн и его 8 спутников,	Itajuba, Floirac, Hiparcos, Nikolaev,
Уран и 4 его спутника,	Pulkovo 26 (P26d refract.),
Нептун и его спутник Тритон	Pulkovo NA (Normak astrograph)
Уран и 4 его спутника,	Yunnan, Sheshan
Нептун и его спутник Тритон	
Плутон	Pico dos Dias, Tabmount, Lowell, Usno, Floirac, Pulkovo NA, Kislovodsk-500, Pulkovo ZA-320, BSch (Schmidt telescope, Latvia)

2.1.6. Доступ к ЕРМ

Доступ к эфемеридам теории ЕРМ может осуществляться различными способами:

- через собственную онлайн-службу эфемерид ИПА РАН;
- через FTP-сервер ИПА РАН с прямым доступом к файлам в форматах SPICE, DE, BIN и TXT, содержащим эфемеридные данные в форме разложений по многочленам Чебышева на равновеликих интервалах времени в системе BCRS.

Для пользователей на сайте ИПА РАН также размещены подробные инструкции и описание различных способов программного доступа к эфемеридам ЕРМ на русском и английском языках; также на сайте собраны и представлены библиотеки для чтения файлов в используемом формате SPICE для различных языков программирования.

2.2. Эфемериды DE и реализации DE440 и DE441

2.2.1. Общие сведения

Теория JPL DE (Jet Propulsion Laboratory Development Ephemeris) представляет собой систему эфемерид, разработанную астрономами и инженерами НАСА (NASA — National Aeronautics and Space Administration — Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства) для точного моделирования траекторий планет, лун, астероидов и комет в Солнечной

системе [6, 5, 22]. JPL DE базируется на использовании численных методов и моделей гравитационного взаимодействия между небесными телами. Она учитывает влияние гравитации Солнца, планет, Луны, а также других крупных небесных тел, точно предсказывая положение планет и других объектов в течение длительного временного интервала. Основной целью разработки эфемеридной теории JPL DE является поддержка межпланетных космических миссий, точные данные о положениях небесных тел при их разработке играют значительную роль. Эфемериды DE используются как в практических, так и в теоретических исследованиях по всему миру [23, 24, 25, 26].

DE эфемериды регулярно обновляются с учетом новых наблюдений и данных, полученных от космических миссий, радиолокации и других источников. Кроме того, улучшение моделей и методов численного интегрирования также способствует постоянному совершенствованию эфемерид для достижения более высокой точности.

JPL DE440 и JPL DE441 являются последними версиями эфемеридных теорий, которые используются для предсказания положения и движения небесных тел в Солнечной системе. Отличие между собой моделей DE440 и DE441 заключается в учете взаимодействия между жидким лунным ядром и эластичной мантией: модель учета демпфирования между ядром и мантией, вошедшая в динамическую модель DE440, не подлежит экстраполяции на большие промежутки времени, поскольку приводит к значительному росту отклонений на масштабах более нескольких сотен лет; для увеличения продолжительности просчитанной эпохи отдельно была выпущена версия модели DE441, не учитывающая трения между лунной мантией и ядром. Модель DE441, хоть и уступает в точности DE440 на временном масштабе текущего века, покрывает значительно больший временной промежуток с 13 200 г. до н.э. по 17 191 г. н.э. (в сравнении с 1550–2650 гг. для DE440).

2.2.2. Динамическая модель

Планетные и лунные эфемериды DE определяются в ходе интегрирования уравнений движения рассматриваемых в динамической модели небесных тел с оптимизацией параметров для соответствия имеющимся наблюдательным данным. В список учитываемых в реализуемой модели тел входят:

- Солнце,
- барицентры систем 8 крупных планет,

- барицентр системы Плутона,
- Луна,
- 343 астероида,

а также учитывает возмущающее действие 30 объектов пояса Койпера и кольца, интерпретирующего малые объекты пояса Койпера, реализованного при моделировании в виде 36 материальных точек равной массы, расположенных в плоскости эклиптики на расстоянии 44 а. е. от Солнца.

Взаимодействие тел, моделируемых в виде материальных точек, определяется параметризованной постньютоновской метрикой n тел, в которой нелинейность, связанная с искривлением пространства-времени вокруг массивных тел, предсказываемая ОТО, определяется параметрами Эддингтона-Робертсона-Шиффа.

Лунная модель включает в себя отдельный учет ориентации жидкого ядра Луны (и соответствующие углы Эйлера, ее фиксирующие и изменяющиеся во времени) и ориентацию считающихся едиными коры и мантии в лунной системе отсчета (углы либрации Луны), преобразуемые в конечных эфемеридах к системе ICRF3, заданной матрицей поворота, также отдельно отмеченной в документации. Данные о лунной ориентации можно получить в том числе из экспериментов по лазерной локации Луны (помимо первостепенной задачи определения положения и расстояния до нее), поэтому полученная динамическая теория (включающая в себя в качестве параметров шесть, в сущности Эйлеровых, углов ориентации: три угла для коры и мантии и три для ядра, а также их производные) подтверждается и уточняется в ходе поиска оптимальных параметров модели при использовании наблюдательных данных.

Для Луны в динамической модели также учитывается дополнительное ускорение, вызываемое земным приливным воздействием, а также в отдельности солнечным приливным потенциалом.

В эфемеридной теории JPL DE также учитывается форма небесных тел, в частности форма Земли, Луны и Солнца. В ходе вычислений определяются: вплоть до зональных гармоник пятого порядка, взаимодействия фигуры Земли с точечными массами Луны, Солнца, Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна; вплоть до шестого порядка производится учет взаимодействия фигуры Луны с точечными массами Земли, Солнца и крупных планет, кроме Урана и Нептуна; моделируется взаимодействие фигуры Солнца (вплоть до зональных гармоник второго порядка) со всеми остальными телами модели. Подобный учет ненулевых размеров небесных

тел позволяет определить дополнительное ускорение, испытываемое материальными телами, сначала во вспомогательной системе отсчета с главной осью, направленной на возмущающее тело, переводимой затем в инерциальную систему отсчета.

Дополнительно в теории DE учитываются прецессия Лензе-Тирринга, связанная с гравитационным влиянием Солнца, а также радиационное давление солнечного света для Земли и Луны.

2.2.3. Наблюдательные данные

При разработке эфемерид JPL DE параметры описанной выше динамической модели определялись и тестировались на широком наборе наблюдательных данных, полученных в ходе различных наземных и космических миссий. Список учтенных наблюдений с указанием типа миссии и охваченного наблюдениями временного промежутка представлен в табл. 3.

Эксперименты по лазерной локации лежат в основе точного определения положения и ориентации Луны. Данные лазерной дальнометрии непрерывно улучшаются в связи с развитием лазерных технологий, в частности, технологий создания коротких высокоэнергетических импульсов лазерного излучения, техник измерения времени приема сигнала. Измерения, полученные с помощью космических аппаратов, базируются на Сети дальней космической связи НАСА (Deep Space Network — DSN NASA), доплеровских и РСДБ наблюдениях искусственных спутников. Наземные наблюдения имеют большое значение, в особенности для моделирования движения ледяных гигантов, поскольку всего один космический аппарат, Вояджер-2, посещал окрестности Урана и Нептуна. В решения DE440 и DE441 внесены по одному наблюдению Вояджера 1986 и 1989 гг.

2.2.4. Доступ к эфемеридам DE

Доступ к данным эфемеридной теории JPL DE возможен с использованием разных сервисов. Основным источником является собственный интерактивный сайт Лаборатории реактивного движения НАСА Horizons [27], предоставляющий разнообразные астрономические данные, включая планетные положения из эфемеридной теории DE441. Также возможен доступ к обработке эфемеридных данных теорий DE440 и DE441 с использованием кроссплатформенного мультязыкового программного сервиса SPICE, описание доступа к которому также представлено на официальной веб-странице Лаборатории реактивного движения НАСА. Также

на этом сайте расположены ссылки на получение доступа к ASCII файлам, эфемериды в них сгруппированы блочно по 20 и более лет. ASCII файлы затем могут быть преобразованы в двоичный или любой другой удобный формат для последующей обработки с использованием различных языков программирования. Существуют также готовые программные модули на языке Fortran, подготовленные в том числе сторонними разработчиками для удобства пользовательского опыта. Доступны разные версии эфемеридной теории: от первой версии DE102, созданной в 1981 г., до опубликованных в июне 2020 г. версий DE440 и DE441.

2.3. Эфемериды INPOP. Реализации INPOP19a и INPOP21a

2.3.1. Общие сведения

Институт небесной механики и Эфемеридных вычислений IMCCE разрабатывает эфемериды INPOP [3, 4, 5, 6, 7]. Основной задачей при создании эфемеридной теории было получение краткосрочных эфемерид, играющих важнейшую роль для наземных и космических миссий и наблюдений. Интерес также представляла попытка построения моделей, способных давать предсказания на интервалах времени порядка миллионов лет, нашедшая бы приложение в палеоисследованиях эволюции Земли и Марса.

Построенная в 2006 г. модель INPOP06 создавалась с использованием 55 000 наблюдений и включала в себя 9 планет (на момент разработки модели Плутон еще не был исключен из списка больших планет Международным астрономическим союзом), Луну, 300 астероидов, и учитывала вращение Земли и либрации Луны. Полученная теория движения тел солнечной системы оказалась сравнима по точности предсказаний с актуальными на тот момент версиями эфемеридных теорий JPL DE и EPM.

Далее и по сей день теория непрерывно развивается, включая как учет новых наблюдений, так и усложнение реализуемой динамической модели: значительно усложнена лунная модель, произведен учет релятивистских эффектов. В предпоследнюю версию INPOP19a, которая заменила INPOP17a, вошли, для сравнения с INPOP06, более 155 000 наблюдений, в ней были учтены наблюдения и измерения спутников Марс Экспресс, Юнона и Кассини. В результате значительно возросла точность полученного решения, в особенности для положения Марса и барицентра системы Юпитера.

Таблица 3. Наблюдательные данные эфемеридной теории JPL DE

Планета	Тип наблюдения	Аппарат/обсерватория	Даты	N
Луна	Лазерная локация	McDonald 2.7 m	1970–1986	3440
		MLRS/saddle	1985–1989	275
		MRLS/Mt Fowlkes	1988–2014	2870
		Haleakala	1984–1991	694
		Observatoire de la Cote d’Azur	1984–2020	16 425
		Matera	2003–2020	248
		Apache Point	2006–2017	2452
Меркурий	Расстояния АМС	Mariner–10	1974–1975	2
		MESSENGER	2011–2016	1353
	3D АМС	MESSENGER	2008–2010	3
Венера	Расстояния АМС	Venus Express	2006–2014	2158
	3D АМС	Cassini	1998–2000	2
	РСДБ	MAGELLAN	1990–1995	18
		Venus Express	2007–2015	64
Марс	Расстояния АМС	Viking Lander–1	1976–1983	1174
		Viking Lander–2	1976–1978	80
		Mars Pathfinder	1997	90
		Mars Express	2005–2020	8751
		Mars Global Surveyor	1999–2007	2130
		Mars Odyssey	2002–2020	10 087
		Mars Reconnaissance Orbiter	2006–2020	2634
	РСДБ	Mars Global Surveyor	2001–2004	15
		Mars Odyssey	2002–2020	169
		Mars Reconnaissance Orbiter	2006–2020	123
	VLBA		2008–2014	9
Юпитер	Расстояния АМС	Juno	2016–2020	15
	3D АМС	Pioneer–10	1973	1
		Pioneer–11	1974	1
		Voyager–1	1979	1
		Voyager–2	1979	1
	3D АМС	Ulysses	1992	1
		Cassini	2000	1
		New Horizons	2007	1
	VLBA	Juno	2016–2019	6
	РСДБ	Galileo	1996–1998	22

Таблица 3. Окончание

Планета	Тип наблюдения	Аппарат/обсерватория	Даты	<i>N</i>
Сатурн	Расстояния АМС	Cassini	2004–2018	147
	VLBA	Cassini	2004–2018	27
	3D АМС	Voyager–1	1980	1
	3D АМС	Voyager–2	1981	1
	Наземные наблюдения	Flagstaff	1998–2016	3152
		Table Mountain	2001–2010	687
		Nikolaev	1973–1998	588
		Yerkes	1910–1922	18
Уран	3D АМС	Voyager–2	1986	1
	Наземные наблюдения	Flagstaff	1995–2016	2362
		Table Mountain	1998–2010	324
		Nikolaev	1961–1999	215
		Yunnan	2014–2017	3332
		Yerkes	1908–1923	21
		Bordeaux	1985–1993	165
		La Palma	1984–1997	1030
		Tokyo	1986–1989	44
		Washington	1926–1993	1783
Нептун	3D АМС	Voyager–2	1989	1
	Наземные наблюдения	Flagstaff	1995–2015	2469
		Table Mountain	1998–2013	416
		Nikolaev	1961–1999	218
		Yunnan	2014–2017	755
		Yerkes	1904–1923	27
		Bordeaux	1985–1993	183
		La Palma	1984–1998	1106
		Washington	1926–1993	1573
Плутон	Наземные наблюдения	Flagstaff	1995–2015	1098
		Table Mountain	2001–2015	549
		Pico dos Dias	1995–2012	5489
		Pulkovo	1930–1992	53
		прочие	1988–2017	23

Примечание. *N* — количество наблюдений.

Особое внимание в INPOP19a было уделено уточнению орбит астероидов. Для этого использовался второй выпуск данных спутника Gaia. Более двух миллионов наблюдений из второго релиза данных миссии Gaia DR2 были учтены, что позволило не только исследовать движение объектов в главном поясе астероидов, но и значительно увеличить точность определения орбиты Марса, в том числе значительно улучшить точность долгосрочных предсказаний его положения.

В модели INPOP21a, помимо обновления наблюдательных данных от аппаратов Юнона и Марс Экспресс, а также некоторых наземных наблюдений, было произведено уточнение модели пояса Койпера. Были в том числе учтены эффекты динамического сжатия Солнца.

Эфемеридные данные различных версий теории INPOP также широко используются в научных исследованиях, включая, но не ограничиваясь, работы по поиску доказательств существования или отсутствия девятой планеты солнечной системы [28], исследования физики элементарных частиц [29, 30] и другие [31, 32, 33].

2.3.2. Динамическая модель

В динамическую модель теории INPOP на сегодняшний день входят:

- Солнце,
- восемь больших планет,
- Луна,
- Плутон,
- 14 000 астероидов.

Движение крупных тел подчиняется уравнениям Эйнштейна-Инфельда-Гофмана, в целом модель построена в постньютоновском приближении. При интегрировании уравнений движения используется метод регуляризации Адамса-Коуэлла.

В динамической модели учитывается сжатие Солнца, а также динамическое искажение метрики пространства-времени — эффект Лензе-Тирринга. Дополнительное ускорение, вносимое этим эффектом, составляет, согласно вычислениям в рассмотренной модели, около 10% от динамического ускорения, возникающего из-за геометрической формы Солнца.

Земля и Луна деформируемы, производится учет лунно-солнечных приливов и их влияние на положение Земли; учитывается приливное воздействие Земли и Солнца на Луну при определении ее положения и ориентации.

2.3.3. Астероиды в эфемеридах INPOP

Пояс Койпера и ТНО. В модели INPOP19a возмущения от объектов пояса Койпера и транснептуновых тел определялись следующим образом: моделировалось воздействие на крупные тела модели трех круглых колец со средними радиусами 39.4, 44.0 и 47.5 а. е. Такая модель, однако, игнорировала эксцентричность орбит астероидов, характерную для внешней солнечной системы (в отличие от орбит астероидов главного пояса), и давала весьма завышенную оценку массы колец, превышающую существующие оценки полной массы всех ТНО.

Для исправления ситуации в версии INPOP21a подход к моделированию ТНО был изменен. Для моделирования были взяты (из базы данных Astorb [34]) 2225 объектов с большой полуосью орбиты, лежащей в пределах от 39.3 до 47.6 а. е. Из них затем были случайно выбраны 500 объектов, использованных для определения возмущающего влияния, а также оценки их массы в ходе уточнения параметров динамической модели.

Массы астероидов и данные Gaia. Как уже отмечалось ранее, задача определения массы астероидов весьма нетривиальна. Основным методом является спектральное определение класса астероида и оценка его размеров исходя из наземных и космических наблюдений. Для определения масс, начиная с версии теории INPOP19a, используется частный случай метода наименьших квадратов, основанный на алгоритме МНК с ограниченными параметрами (BVLS — Bounded Values Least Squares) Лоусона и Хэнсона [35], где нижняя и верхняя граница оцениваемых масс определяется исходя из априорной информации об астероидах, полученной из ранее проведенных исследований.

В 2018 г. были представлены в открытый доступ определенные из более 2 миллионов наблюдений данные с астрометрического спутника Gaia [36] о положениях и скоростях 14 099 объектов Солнечной системы. Большую часть этих объектов составляют астероиды Главного пояса. При интегрировании уравнений движения в INPOP, орбиты астероидов и планет определялись по наблюдательным данным по отдельности, но с использованием нескольких итераций для применения уточненных данных об астероидах, полученных миссией Gaia. При этом движение 14 099 астероидов рассчитывалось в рамках ньютоновского приближения с учетом возмущающего действия Солнца и больших планет, а также незначительного числа крупнейших из объектов Главного пояса [37].

2.3.4. Наблюдательные данные

Используемые наблюдательные данные могут быть, как и в теориях JPL DE и EPM, разделены на три группы: радарные наблюдения планет (возможные для Меркурия, Венеры и Марса), данные от космических аппаратов (радарная дальнометрия, доплеровские наблюдения) и оптические наблюдения (характерные в основном для внешних планет).

В одной из первых версий эфемерид INPOP06 были использованы: радарные наблюдения поверхностей Венеры (737 штук) и Меркурия (444 штуки) с 1964 по 1990 гг. и с 1971 по 1997 гг. соответственно; РСДБ наблюдения искусственного спутника Венеры «Магеллан», разнородные данные наблюдений марсианских искусственных аппаратов Викинг, Патфайндер, Марс Одиссей, Марс Глобал Сервейор (MGS, Mars Global Surveyor):

- Викинг — 1256 точек с 1976 по 1983 гг.;
- Марс Одиссей и MGS — 10 474 радарных наблюдений 1999–2005 гг.;
- Патфайндер — 1519 доплеровских точек 1976–1979 гг.;
- 44 наблюдения юпитерианского аппарата Галилей 1996–1988 гг.;
- 5536 оптических наблюдений Юпитера 1914–2004 гг.;
- 5573 оптических наблюдений Сатурна 1914–2004 гг.;
- 3848 оптических наблюдений Урана 1914–2004 гг.;
- 3898 оптических наблюдений Нептуна 1914–2004 гг.;
- 208 оптических наблюдений Плутона 1989–2004 гг..

С каждой новой версией набор используемых наблюдательных данных расширился. В последней версии INPOP21a наблюдения пополнились:

- данными аппарата Марс Экспресс по 2019.7 включительно;
- данными юпитерианского аппарата Юнона по 2020.56;
- данными лазерной локации Луны вплоть до 2020.06.01 (доведя их число до 27 899).

Также оптические наблюдения Нептуна и Урана были обновлены с использованием новых данных каталога Gaia. Полный список учтенных наблюдений с указанием типа миссии и охваченного наблюдениями временного промежутка представлен в табл. 4.

2.3.5. Доступ к эфемеридам INPOP

Доступ к эфемеридам теории INPOP возможен через сайт Института небесной механики и Эфемеридных вычислений ИМСЕ. Данные на сайте представлены в виде ссылок для доступа к двоичным файлам, текстовым файлам, файлам SPICE, а также специально организованным двоичным файлам, удобным для сопоставления с эфемеридами JPL DE. Помимо самих файлов и ссылок для доступа к ним, на сайте размещены также подробные инструкции по их внутренней организации и рекомендациям по использованию. Также на сайте размещена информация об открыто распространяемой библиотеке CALCEPH, предоставляющей программный интерфейс для обработки эфемеридных данных, совместимый с языками программирования C, Fortran и Python.

3. СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЭФЕМЕРИДНЫХ ТЕОРИЙ

3.1. Космические миссии

Одна из областей, в которых расчет эфемерид является наиболее актуальной задачей, это планирование космических миссий с использованием искусственных аппаратов. При подготовке межпланетных перелетов особо важным оказывается знание точных положений всех небесных тел при расчете будущей орбиты и траектории искусственного спутника. В настоящие дни целый ряд космических проектов находится на этапе планирования и подготовки запуска, и в каждом отдельно взятом случае существенное внимание инженеров и исследователей обращено к проблеме определения будущей траектории запускаемого аппарата. Эфемериды планет в первую очередь необходимы для проведения космических миссий, поэтому далее мы даем обзор планируемых к реализации в ближайшее время проектов.

3.1.1. Исследование системы Юпитера. Europa Clipper

Миссия NASA Europa Clipper [38, 39, 40] наиболее близка к завершению подготовки — запуск ее планируется на конец 2024 г. Целью миссии является изучение одного из наиболее интригующих галилеевых спутников Юпитера — Европы, существование подповерхностного океана жидкой воды на которой представляет собой большой научный интерес, как с точки зрения его физических характеристик и состава, так и с точки зрения возможного существования примитивной биологической жизни под ле-

Таблица 4. Наблюдательные данные эфемеридной теории INPOP

Планета	Тип наблюдения	Аппарат/обсерватория	Даты	<i>N</i>
Луна	Лазерная локация	APOLLO	2006–2016	2588
		Grasse	1984–2020	17091
		Haleakala	1984–1990	737
		Matera	2003–2020	233
		McDonald	1969–1986	3431
		MLRS1/MLRS2	1983–2016	3738
		Wettzell	2018–2020	81
Меркурий	Радиолокация		1971–1997	462
	Расстояния АМС	Mariner-10	1974–1976	2
		MESSENGER	2011–2014	1096
Венера	Радиолокация		1965–1990	489
	РСДБ	MAGELLAN	1990–2013	68
	Расстояния АМС	Venus Express	2006–2011	24 783
Марс	Расстояния АМС	Mars Express	2005–2016	1174
		Mars Global Surveyor	1999–2006	2459
		Mars Odyssey, MRO	2002–2014	20 985
	РСДБ		1989–2013	194
	РСДБ		1996–1997	24
	Расстояния АМС	Juno	2016–2018	23
		Pioneer–11	1974	1
		Voyager–1	1979	1
		Voyager–2	1979	1
		Ulysses	1992	1
		Cassini	2000	1
Сатурн	Наземные наблюдения		1924–2008	7826
	РСДБ/Расстояния АМС	Cassini	2004–2016	1370
Уран	3D АМС	Voyager–2	1986	1
	Наземные наблюдения		1924–2013	35 145
Нептун	3D АМС	Voyager–2	1989	1
	Наземные наблюдения		1924–2007	5254

Примечание. *N* — количество наблюдений.

дяной поверхностью спутника. Еще не объявлен окончательный состав исследовательского оборудования, которое будет установлено на аппарат (вплоть до обсуждения возможности интегрирования в состав миссии спускаемого зонда). Тем не менее при запуске в конце 2024 г. расчетная траектория, включающая в себя два гравитационных маневра у Марса и Земли, приведет аппарат в ближайшие окрестности системы Юпитера к началу 2030 г.

3.1.2. Исследование системы Сатурна. *Dragonfly*

Другой амбициозной миссией во внешнюю Солнечную систему является *Dragonfly*, планируемая к запуску в 2028 г. [41, 42]. Объектом изучения этого аппарата станет крупнейший спутник Сатурна Титан. Предыдущие исследования межпланетной станции и спускаемого аппарата Кассини-Гюйгенс привели к примечательным открытиям, связанным с этим небесным телом. Значительно превосходя по массе и размерам все остальные спутники Сатурна и тем самым уже представляя определенный интерес к исследованию, Титан вдобавок обладает плотной (в четыре раза плотнее земной) азотной (98% азот, 1.6% метан и аргон) атмосферой и имеет на своей поверхности значительные запасы углеводородов в жидкой и твердой форме: спускаемый аппарат Гюйгенс подтвердил наличие метановых морей, которые также были видны на инфракрасных снимках спутника (плотная атмосфера скрывает его поверхность в оптическом диапазоне). Несмотря на низкую температуру поверхности, составляющую около -180 градусов по Цельсию, Титан считается гипотетически пригодным для образования простейших биологических молекул и, возможно, первичных микроорганизмов, поскольку помимо богатого углеводородного супа на поверхности спутника также предполагается наличие редких областей, содержащих воду.

Аппарат *Dragonfly* будет представлять собой винтокрылую платформу с диаметром винтов около одного метра, что позволит ему совершать небольшие полеты в атмосфере Титана, плотная атмосфера которого вкуче с на 15% меньшей, чем на Земле, поверхностной силой тяжести будет способствовать низким затратам энергии при совершении исследовательских полетов. Аппарат будет оснащен необходимыми приборами для химического анализа атмосферы и поверхности спутника, будет производить поиск органических молекул и исследовать физические свойства поверхности и ландшафта Титана. При успешном запуске в 2028 г., ожидается, что *Dragonfly* достигнет системы Сатурна к 2036 г.

3.1.3. Исследования Урана и Нептуна

При всей своей малоизученности, системы Юпитера и Сатурна, тем не менее, относительно хорошо исследованы различными межпланетными станциями, начиная с первых посещений их аппаратами серии Пионер (Пионер–10 посетил Юпитер, Пионер–11 достиг Юпитера и Сатурна), которые совершили разовые посещения систем планет-гигантов по пролетным траекториям, заканчивая крупными автоматическими межпланетными станциями (АМС): АМС Кассини, исследовавшая Сатурн с 2004 по 2017 г., и аппарат Юнона, достигший системы Юпитера в 2016 г.

Иное дело обстоит с ледяными гигантами Ураном и Нептуном, населяющими самые отдаленные рубежи солнечной системы: за всю историю космических исследований всего один космический аппарат, *Вояджер–2*, совершил пролет возле этих планет, достигнув орбиты Урана в январе 1986 г. и Нептуна в августе 1989 г. Из-за значительной удаленности этих планет, запуск к ним исследовательской станции требует более значительных финансовых затрат, чем полет к Юпитеру или Сатурну. Такая миссия сложна и технически, ввиду необходимости поддержания работоспособности аппарата в течение долгого времени в пути до конечной орбиты вокруг ледяного гиганта, а также трудностей, связанных с расчетом траектории до внешних участков Солнечной системы. На сегодняшний день на этапе формирования стратегии исследования и разработки аппарата находится целый ряд миссий к Урану и Нептуну [43, 44].

Одной из разрабатываемых концепций является *Neptune Odyssey* [45], с оптимальным окном запуска в начале 2030-х гг., ставящая целью исследование системы Нептуна и его крупнейшего спутника Тритона. Аппарат планируется к выводу на нестандартную ретроградную (противоположную направлению вращения планеты) орбиту вокруг Нептуна для совместного изучения планеты вместе с Тритоном, который представляет собой отдельный интерес, будучи единственным крупным спутником в Солнечной системе с ретроградным движением по орбите вокруг планеты (вероятнее всего вызванным тем, что Тритон был захвачен Нептуном из пояса Койпера) и имеющим зарегистрированную геологическую активность: на снимках аппарата *Вояджер–2* удалось обнаружить криовулканизм и гейзеры на его поверхности. В составе оборудования *Neptune Odyssey* также планируется

атмосферный зонд для изучения химического состава верхних слоев атмосферы Нептуна (вплоть до глубины, соответствующей давлению 10 бар). При запуске в 2031–2032 гг. по расчетным орбитам аппарат сможет достигнуть Нептуна к 2049 г.

3.1.4. Исследования системы Плутона. Результаты миссии New Horizons

Открытый в 1930 г. Клайдом Томбо Плутон оставался одним из наименее исследованных крупных тел в солнечной системе до его посещения в 2015 г. миссией New Horizons [46, 47]. Система Плутона представляет собой значительный интерес: соотношение масс Плутона и крупнейшего из его пяти спутников Харона составляет приблизительно 1 к 8, в связи с чем некоторые исследователи прибегают к использованию термина «двойная планета» при описании системы Плутон-Харон. Данный факт приводит к значительной сложности динамической эволюции этой удаленной карликовой планеты.

Посещение системы в июле 2015 г. межпланетной станцией «Новые горизонты» (New Horizons) принесло огромное количество новых данных исследователям: первые детальные фотографические изображения поверхности Плутона и Харона, спектроскопическая информация о составе его атмосферы и поверхности; данные о динамике АМС «Новые горизонты» в системе Плутона привели к очередному уточнению массы и гравитационного воздействия Плутона и его спутников. Посещение Плутона автоматической межпланетной станцией привело к уточнению динамических моделей, используемых при расчете эфемерид планет. Гравитационный вклад Плутона играет значительную роль в динамике удаленных областей Солнечной системы, в том числе приводя к возмущениям орбиты Нептуна, как напрямую, так и опосредованно через влияние на структуру пояса Койпера.

Полученные миссией «Новые горизонты» данные привнесли значительный вклад в изучение природы и динамики объектов пояса Койпера, но также поставили новые вопросы перед исследователями: как происходила их динамическая эволюция, каково содержание пыли и каков ее вклад в химический состав и эволюцию объектов, существует ли на Плутоне подповерхностный океан [48]? Одной из разрабатываемых концепций для поиска ответа на эти вопросы является миссия Персефона [49], которая может отправиться в тридцатилетний полет уже в начале 2030-х годов и принести новые более точные данные о системе Плутона.

3.1.5. Исследования планет земной группы. Венера и Марс

Помимо миссий по изучению наименее исследованных уголков солнечной системы, внимание космических агентств и исследовательских групп также обращено к двум наиболее близким к Земле планетам — Марсу и Венере. Будучи планетами земной группы, имеющими твердую поверхность, они представляют собой особый интерес для отправки к ним исследовательских миссий [50], поскольку наименее удалены от Земли и наименее требовательны как к отправляемому оборудованию, так и к используемым для отправки носителям. В далеком будущем эти планеты, в частности Марс, могут быть выбраны в качестве цели для посещения их человеком.

Терраформирование Венеры и Марса пока представляется слишком амбициозной задачей, но их исследование с помощью роботизированного оборудования, космических спутников, посадочных капсул и роверов уже осуществляется человечеством. Опыт, полученный при отправке предыдущих космических миссий к Марсу и Венере, используется при подготовке следующих аппаратов, направленных на изучение поверхности, атмосферы, магнитного поля и сейсмических свойств планет. Предполагается, что подобные исследования могут оказать значительное влияние на наше понимание эволюции планетных экосистем, что поможет нам в прогнозировании будущего собственной планеты, Земли.

Одной из планирующихся миссий по исследованию Венеры является разрабатываемый в Институте Космических Исследований РАН проект Венера-Д [51, 52], задуманный как продолжение исследований Венеры, начатых еще советскими аппаратами серии Венера в 60-е годы прошлого века. В состав космического аппарата должны войти автоматическая орбитальная станция, а также спускаемый модуль, состоящий из посадочного аппарата и аэростатов для изучения атмосферных особенностей планеты. В ходе работы космического аппарата планируется большое количество научных экспериментов, целью которых является попытка ответа на вопросы о том, какие процессы сформировали и продолжают формировать атмосферу и поверхность Венеры, и что мы можем заключить о будущем земного климата на основании венерианских исследований. Запуск аппарата на сегодняшний день отложен на начало 2030-х годов.

Многочисленные исследования Марса продолжаются и по сей день, в том числе с использованием орбитальных аппаратов (8 искусственных спутников,

включая Mars Express, Mars Odyssey и MRO) и марсоходов (Кьюриосити, Персеверанс и другие). Марс из всех планет и спутников солнечной системы, кроме Луны, наиболее близок к посещению человеком: отправка первого человека на поверхность красной планеты ожидается уже в 2040-х годах. Одна из роботизированных миссий, подготовкой которой занимается Роскосмос, отложенная на 2028–2029 г., миссия Exomars-2022 будет нести на себе значительное количество научного оборудования, направленного на поиск возможных следов прошлой или настоящей жизни на Марсе и исследование характеристик водного и геохимического распределения на поверхности планеты.

3.2. Сравнение ожидаемого положения планет в рамках эфемеридных теорий DE, EPM и INPOP

Точность эфемерид тел солнечной системы является самой востребованной характеристикой. Она зависит от методов учета возмущающих факторов, от точности методов вычислений и от точности наблюдений, на которых основаны эфемериды. Однако присутствует необходимость использовать результаты наблюдений, точность которых ограничена имеющейся наблюдательной техникой и условиями наблюдений.

Техника наблюдений совершенствуется. Например, для наземных наблюдений применяется адаптивная оптика и спекл-интерферометрия. Условия наблюдений также улучшаются при выносе телескопов за пределы земной атмосферы: широкую известность в научных кругах имеют Hubble space telescope (HST), WISE. Условия наблюдений резко улучшились с началом эксплуатации космической обсерватории Gaia. При этом впервые ошибки звездного каталога не превысили ошибок регистрации изображений в фотоприемнике, которые в свою очередь на Gaia тоже уменьшились за счет применения методов сканирования.

При построении моделей движения небесных тел и учете возмущающих факторов разработчики эфемерид могут включать в рассмотрение все более тонкие эффекты в движении небесных тел. Совершенствование методов вычислений способствует значительному превышению вычислительной точности над наблюдательной. Поэтому точность эфемерид небесных тел солнечной системы, в том числе и планет, зависит в первую очередь от точности наблюдений.

В рассматриваемых в настоящем обзоре трех вариантах эфемерид планет JPL DE, EPM и INPOP используются схожие наборы наблюдений, однако

различия между ними все же имеются. Все три варианта достоверны и пригодны к использованию, однако эфемериды строились независимо. Таким образом различия эфемерид могут служить некоторым показателем их точности.

Для сравнения и оценки точности рассмотренных ранее эфемеридных теорий JPL DE, EPM и INPOP получим и сравним положения на небе в них Луны, Солнца, Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона, используя для доступа к эфемеридным данным сервис MULTI-SAT [53]. Для определения положения небесных тел получим эфемериды с постоянным шагом по времени в рамках доступных версий планетных теорий DE441, EPM2021 и INPOP19a; будем рассматривать эфемеридные данные на следующих временных диапазонах:

- Венера — 01.01.2030–01.01.2032 (предполагая возможным в это время запуск исследовательского аппарата Венера-Д);
- Марс — 01.01.2030–01.01.2032 (примерные даты прибытия АМС Exomars-2022, в случае успешного продолжения этой программы);
- Юпитер — 01.04.2030–01.04.2032 (два года от предполагаемого момента прибытия в систему Юпитера аппарата Europa Clipper);
- Сатурн — 01.01.2036–01.01.2038 (два года от предполагаемого момента прибытия в систему Сатурна аппарата Dragonfly);
- Уран — 01.01.2045–01.01.2047 (ориентируясь на возможность отправки аппарата в систему Урана в 2030-е);
- Нептун — 01.01.2049–01.01.2051 (ориентируясь на возможность реализации концепции Neptune Odyssey в 2031–2032 гг.);
- Солнце и Плутон — 01.01.2024–01.01.2026;
- Луна — 01.01.2024–02.06.2024.

Выбор временного интервала для Солнца и Плутона, а также Луны, исключительно произволен и несет за собой цель получить представление о текущей точности определения положения этих объектов в рамках рассмотренных планетных теорий.

Данные о положении тела на небесной сфере представляют собой прямое восхождение α и склонение δ , выраженные в часах, минутах и секундах в случае α , и в градусах, минутах и секундах дуги в случае δ . Таким образом мы имеем для каждого из промежутков времени по три набора значений (α_i, δ_i) для каждого момента времени t_i для каждой из эфемеридных теорий.

Составим далее следующие разности положений:

$$\Delta_i^{(1)} = \sqrt{(\alpha_i^a - \alpha_i^b)^2 + (\delta_i^a - \delta_i^b)^2},$$

$$\Delta_i^{(2)} = \sqrt{(\alpha_i^a - \alpha_i^c)^2 + (\delta_i^a - \delta_i^c)^2},$$

$$\Delta_i^{(3)} = \sqrt{(\alpha_i^b - \alpha_i^c)^2 + (\delta_i^b - \delta_i^c)^2},$$

где индекс a обозначает принадлежность координат теории EPM, индекс b — теории INPOP, а индекс c — теории DE.

Построим далее графики изменения $\Delta_i^{(1)}$, $\Delta_i^{(2)}$ и $\Delta_i^{(3)}$ от времени t_i . Полученные зависимости приведены на рис. 1–9.

Как видно из полученных расстояний, вычисленные в рамках рассмотренных эфемеридных теорий положения объектов по-разному отличаются друг от друга: положения Солнца (рис. 1) наиболее близки в теориях EPM и DE, положение Луны — в теориях EPM и INPOP (рис. 2), положения Юпитера — в теориях INPOP и DE (рис. 3). Действительно существенной при этом (немногим больше половины порядка) является только разница положений Сатурна (рис. 4) (отклоняется предсказание теории INPOP) и Нептуна (рис. 5) (отклоняется предсказание теории EPM). Во всех остальных случаях (для Венеры, Марса, Урана и Плутона, см. рис. 6–9) теории либо дают соразмерные результаты

на всем временном интервале, либо, несмотря на колебания относительно предсказаний друг друга, совпадают в определенные моменты времени. Таким образом нельзя с уверенностью утверждать о существенном превосходстве какой-либо из рассмотренных теорий: в различных рассмотренных конфигурациях их предсказания по-разному отличаются друг от друга, не выявляя систематического совпадения между двумя из них, сопряженного со значимым отличием от третьей теории.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эфемеридные теории играют важную роль в астрокосмических проектах и исследованиях. Их разработка сложна и требует решения большого количества сложнейших задач: учета множества физических факторов и взаимодействий при создании динамической модели; имплементации алгоритмов численного интегрирования уравнений движения; фиттирования десятков и сотен тысяч наблюдений для наиболее точного сопоставления модельных вычислений с окружающей действительностью.

Сравнение используемых при разработке рассмотренных эфемеридных теорий математических моделей и наблюдательных данных не дает однозначного ответа на вопрос о возможном превосходстве одной теории над другой. Подходы авторов JPL DE, INPOP и EPM близки: динамические модели включают в себя схожие наборы небесных тел, моделируются аналогичные наборы эффектов (в том

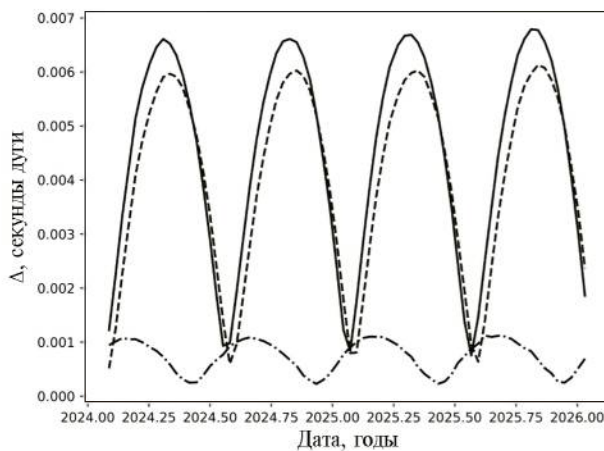


Рис. 1. Расстояние между эфемеридами положения на небе Солнца в теориях INPOP, EPM и JPL DE на интервале времени с 01.01.2024 по 01.01.2026. Сплошной линии соответствует разность EPM–INPOP, штрих-пунктирной линии — разность EPM–DE, штриховой линии — разность DE–INPOP.

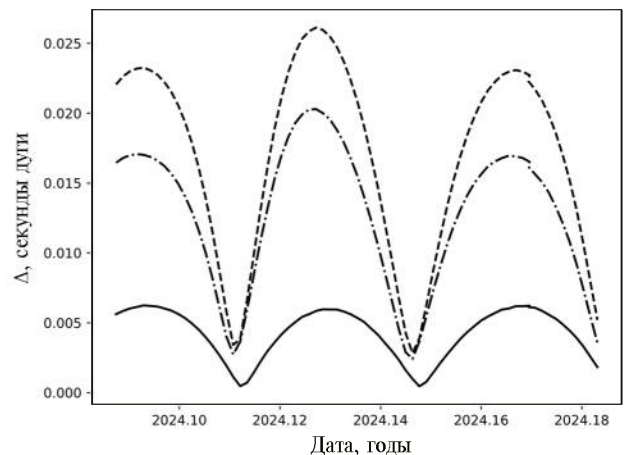


Рис. 2. Расстояние между эфемеридами положения на небе Луны в теориях INPOP, EPM и JPL DE на интервале времени с 01.01.2024 по 02.06.2024. Сплошной линии соответствует разность EPM–INPOP, штрих-пунктирной линии — разность EPM–DE, штриховой линии — разность DE–INPOP.

числе релятивистских) и взаимодействий; используется одинаковый подход к моделированию движения крупных тел: во всех трех теориях оно подчиняется уравнениям Эйнштейна-Инфельда-Гофмана. В многом развитие этих эфемеридных теорий происходит совместно: авторы следят за достижениями своих коллег и перенимают удачные стороны конкурирующих моделей. При этом каждая из

теорий имеет свои сильные и слабые стороны, фокусируется на разработке уникальных для себя моделей, наиболее разнообразных в области учета гравитационного влияния астероидных поясов — Главного пояса и пояса Койпера: от использования байесовской процедуры оценки масс астероидов и замены поясов эквивалентными в гравитационном смысле кольцами до учета наблюдений Gaia. Пари-

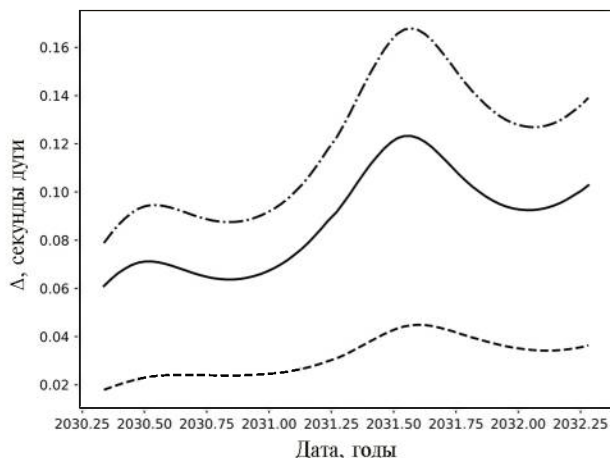


Рис. 3. Расстояние между эфемеридами положения на небе планеты Юпитер в теориях INPOP, EPM и JPL DE на интервале времени с 01.04.2030 по 01.04.2032. Сплошной линии соответствует разность EPM–INPOP, штрих-пунктирной линии — разность EPM–DE, штриховой линии — разность DE–INPOP.

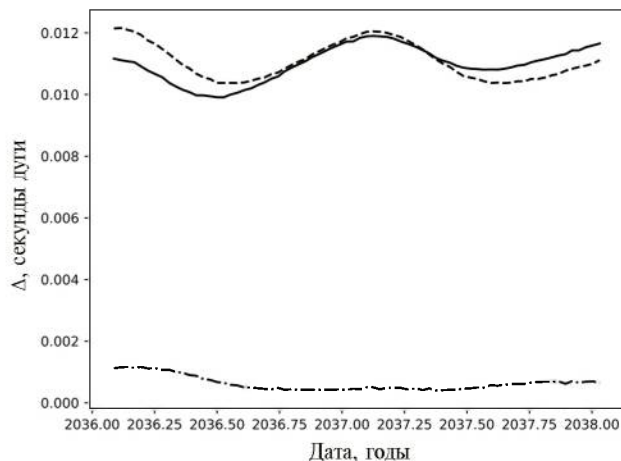


Рис. 4. Расстояние между эфемеридами положения на небе планеты Сатурн в теориях INPOP, EPM и JPL DE на интервале времени с 01.01.2036 по 01.01.2038. Сплошной линии соответствует разность EPM–INPOP, штрих-пунктирной линии — разность EPM–DE, штриховой линии — разность DE–INPOP.

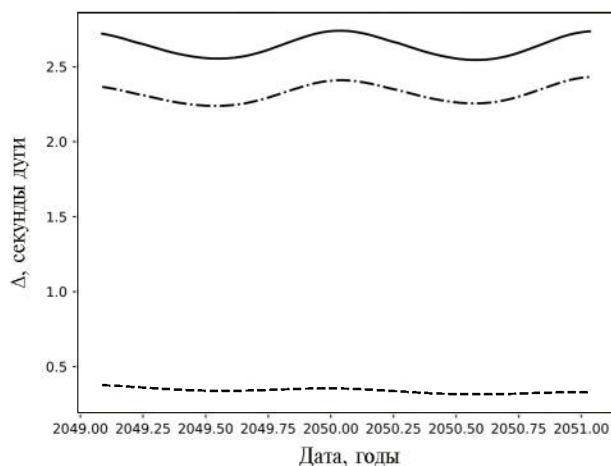


Рис. 5. Расстояние между эфемеридами положения на небе планеты Нептун в теориях INPOP, EPM и JPL DE на интервале времени с 01.01.2049 по 01.01.2051. Сплошной линии соответствует разность EPM–INPOP, штрих-пунктирной линии — разность EPM–DE, штриховой линии — разность DE–INPOP.

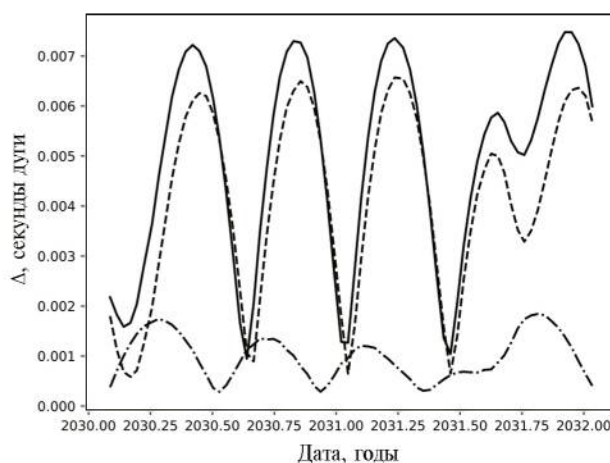


Рис. 6. Расстояние между эфемеридами положения на небе планеты Венера в теориях INPOP, EPM и JPL DE на интервале времени с 01.01.2030 по 01.01.2032. Сплошной линии соответствует разность EPM–INPOP, штрих-пунктирной линии — разность EPM–DE, штриховой линии — разность DE–INPOP.

тет несколько нарушается лишь в области наблюдательных данных: определенное преимущество обеспечивает себе теория JPL DE, поскольку, в отличие от INPOP и EPM, имеет широкий доступ к самым свежим данным космических станций, спутников и роверов NASA (Юнона, Марс Экспресс и др.).

Эфемеридные теории EPM, JPL DE и INPOP предоставляют точные данные о положениях объ-

ектов в Солнечной системе, но точность этих данных варьируется для различных небесных тел: в рассмотренных примерах было показано, что предсказываемое в некоторых конфигурациях положение планеты или спутника в одной из теорий может в большей степени отличаться от двух других, чем те расходятся друг с другом, но подобные различия не несут систематического характера, что требует дальнейшего исследования точности получаемых данных. Тем не менее при определенных условиях возможны существенные отклонения предсказаний одной из теорий, как в случае положения Сатурна и Нептуна, благодаря чему можно заключить, что в некоторых индивидуальных конфигурациях более предпочтительным для исследователей может стать использование одной из двух других теорий планетных эфемерид.

Общий вывод из сравнения эфемерид таков: ни один из рассмотренных вариантов JPL DE, EPM и INPOP не обладает преимуществом по точности: все три варианта равноценны и любой из них может использоваться на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Н. В. Емельянов*, Земля и вселенная 5, 32 (2010).
2. *E. Pitjeva, D. Pavlov, D. Aksim, M. Kan*, Proc. IAU 15, 220 (2019).
3. *A. Fienga, P. Deram, V. Viswanathan, A. Di Ruscio, L. Bernus, D. Durante, M. Gastineau, and J. Laskar*, Notes

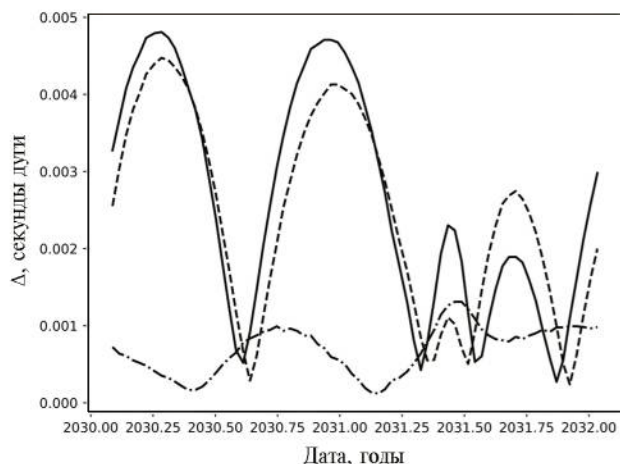


Рис. 7. Расстояние между эфемеридами положения на небе планеты Марс в теориях INPOP, EPM и JPL DE на интервале времени с 01.01.2030 по 01.01.2032. Сплошной линии соответствует разность EPM–INPOP, штрих-пунктирной линии — разность EPM–DE, штриховой линии — разность DE–INPOP.

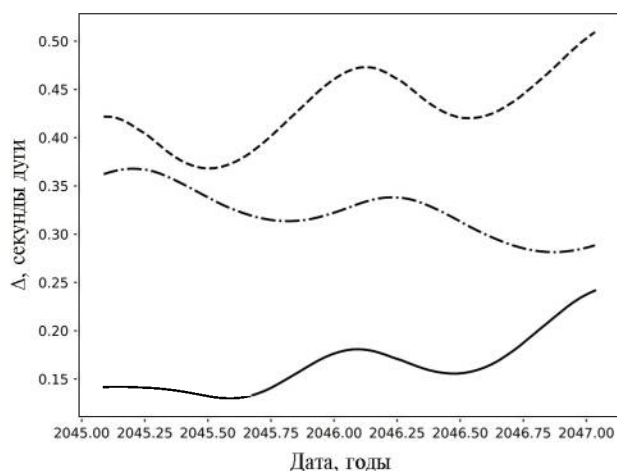


Рис. 8. Расстояние между эфемеридами положения на небе планеты Уран в теориях INPOP, EPM и JPL DE на интервале времени с 01.01.2045 по 01.01.2047. Сплошной линии соответствует разность EPM–INPOP, штрих-пунктирной линии — разность EPM–DE, штриховой линии — разность DE–INPOP.

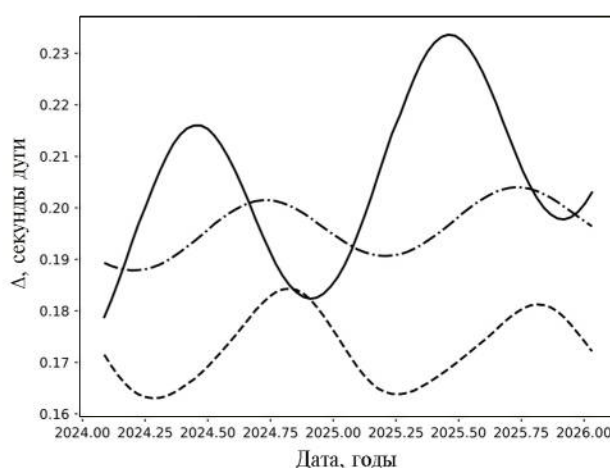


Рис. 9. Расстояние между эфемеридами положения на небе карликовой планеты Плутон в теориях INPOP, EPM и JPL DE на интервале времени с 01.01.2024 по 01.01.2026. Сплошной линии соответствует разность EPM–INPOP, штрих-пунктирной линии — разность EPM–DE, штриховой линии — разность DE–INPOP.

- Scientifiques et Techniques de l'Institut de Mecanique Celeste 109 (2019).
4. *V. Viswanathan, A. Fienga, O. Minazzoli, L. Bernus, J. Laskar, and M. Gastineau*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 476(2), 1877 (2018).
 5. *W. M. Folkner, J. G. Williams, D. H. Boggs, R. S. Park, and P. Kuchynka*, The Interplanetary Network Progress Report 42–196, 1 (2014).
 6. *R. S. Park, W. M. Folkner, J. G. Williams, and D. H. Boggs*, Astron. J. 161(3), id. 105 (2021).
 7. *A. Fienga, P. Deram, A. Di Ruscio, V. Viswanathan, J. I. B. Camargo, L. Bernus, M. Gastineau, and J. Laskar*, Notes Scientifiques et Techniques de l'Institut de Mecanique Celeste 110 (2021).
 8. *E. V. Pitjeva*, Proc. of the Journees 2008 Systemes de reference spatiotemporels, X. Lohrmann-Kolloquium: Astrometry, Geodynamics and Astronomical Reference Systems, TU Dresden, Germany, 22–24 September 2008, edited by M. Soffel and N. Capitaine, Lohrmann-Observatorium and Observatoire de Paris, p. 57 (2009).
 9. *E. V. Pitjeva and N. P. Pitjev*, Celest. Mech. Dyn. Astron. 119(3–4), 237 (2014).
 10. *E. V. Pitjeva*, in Proc. of the Journees 2014 Systemes de reference spatio-temporels, edited by Z. Malkin and N. Capitaine, Pulkovo Observatory (2015), p. 92.
 11. *A. J. S. Capistrano, J. A. M. Penagos, and M. S. Alarcon*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 463(2), 1587 (2016).
 12. *L. Iorio and M. L. Ruggiero*, Intern. J. Modern Physics A 25(29), 5399 (2010).
 13. *L. Iorio*, Astron. J. 157(6), id. 220 (2019).
 14. *L. Iorio*, European Phys. J. C 80(4), id. 338 (2020).
 15. *E. V. Pitjeva*, in Protecting the Earth against Collisions with Asteroids and Comet Nuclei, Proc. of the Intern. Conference Asteroid–Comet Hazard 2009, edited by A. M. Finkelstein, W. F. Huebner, and V. A. Shor (St. Petersburg: Nauka, 2010), p. 237.
 16. *A. Einstein, L. Infeld, and B. Hoffmann*, Ann. Mathematics 39, 65 (1938).
 17. *P. Kuchynka, J. Laskar, A. Fienga, and H. Manche*, Astron. and Astrophys. 514, id. A96 (2010).
 18. *E. V. Pitjeva and N. P. Pitjev*, Astron. Lett. 44(8–9), 554 (2018).
 19. *E. V. Pitjeva and N. P. Pitjev*, Celest. Mech. Dyn. Astron. 130(9), 57 (2018).
 20. *N. V. Emelyanov and A. E. Drozdov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 494, 2410 (2020).
 21. *D. J. Tholen, PH. D.* Thesis The University of Arizona, Dissertation Abstracts International 45–07(B), 2201 (1984).
 22. *W. M. Folkner, J. G. Williams, and D. H. Boggs*, The Interplanetary Network Progress Report 42–178, 1 (2009).
 23. *W. B. Hayes*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 386(1), 295 (2008).
 24. *S. A. Klioner and M. Peip*, Astron. and Astrophys. 410(3), 1063 (2003).
 25. *V. Robert, V. Lainey, D. Pascu, J.-E. Arlot, J.-P. De Cuyper, V. Dehant, and W. Thuillot*, Astron. and Astrophys. 572, id. A104 (2014).
 26. *M. J. Holman, A. Akmal, D. Farnocchia, H. Rein, M. J. Payne, R. Weryk, D. Tamayo, and D. M. Hernandez*, Planetary Sci. J. 4(4), id. 69 (2023).
 27. *J. D. Giorgini, D. K. Yeomans, A. B. Chamberlin, P. W. Chodas, et al.*, Bull. Amer. Astron. Soc. 28, 1158 (1996).
 28. *A. Fienga, J. Laskar, H. Manche, and M. Gastineau*, Astron. and Astrophys. 587, id. L8 (2016).
 29. *V. Mariani, A. Fienga, O. Minazzoli, M. Gastineau, and J. Laskar*, Phys. Rev. D 108(2), id. 024047 (2023).
 30. *L. Bernus, O. Minazzoli, A. Fienga, M. Gastineau, J. Laskar, and P. Deram*, Phys. Rev. Letters 123(16), id. 161103 (2019).
 31. *A. Fienga, J. Laskar, P. Exertier, H. Manche, and M. Gastineau*, Celest. Mech. Dyn. Astron. 123(3), 325 (2015).
 32. *L. Bernus, O. Minazzoli, A. Fienga, A. Hees, M. Gastineau, J. Laskar, P. Deram, and A. Di Ruscio*, Phys. Rev. D 105(4), id. 044057 (2022).
 33. *A. Fienga, C. Avdellidou, and J. Hanu*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 492(1), 589 (2020).
 34. *N. A. Moskovitz, L. Wasserman, B. Burt, R. Schottland, E. Howell, M. Bailen, and M. Granvik*, Astron. and Comput. 41, id. 100661 (2022).
 35. *C. L. Lawson and R. J. Hanson*, Solving Least Squares Problems (Prentice-Hall, 1974).
 36. *F. Spoto, P. Tanga, F. Mignard, J. Berthier, et al.*, Astron. and Astrophys. 616, id. A13 (2018).
 37. *P. Deram, A. Fienga, A. K. Verma, M. Gastineau, and J. Laskar*, Celest. Mech. Dyn. Astron. 134, 32 (2022).
 38. *K. P. Hand, A. E. Murray, J. B. Garvin, W. B. Brinckerhof, et al.*, Report of the Europa Lander Science Definition Team (NASA, 2017).
 39. *L. M. Prockter, E. J. Bunce, and M. N. Choukroun*, 55th Lunar and Planetary Science Conference, held 11–15 March, 2024 at The Woodlands, Texas/Virtual, LPI Contribution №3040, id. 1289 (2024).

40. *G. W. Patterson, R. T. Pappalardo, L. M. Prockter, D. A. Senske, and S. D. Vance*, European Planetary Science Congress 2012, IFEMA-Feria de Madrid, held 23–28 September, 2012 in Madrid, Spain, id. EPSC2012-726 (2012).
41. *J. W. Barnes, E. Turtle, M. Trainer, R. Lorenz, S. Murchie, and S. MacKenzie*, *Bull. Amer. Astron. Soc.* 52(3), 1 (2020).
42. *A. Chatain, A. Le Gall, J.-J. Berthelier, R. D. Lorenz, R. Hassen-Khodja, J.-P. Lebreton, T. Joly-Jehenne, and G. Deprez*, *Icarus* 391, id. 115345 (2023).
43. *W. B. Hubbard*, NASA Ice Giants Decadal Study Revision (2010).
44. *L. N. Fletcher, A. A. Simon, M. D. Hofstadter, C. S. Arridge, I. Cohen, A. Masters, K. Mandt, and A. Coustenis*, *Philosoph. Transactions Roy. Soc. A* 378(2187), id. 20190473 (2020).
45. *A. M. Rymer, K. D. Runyon, B. Clyde, J. I. Nunez, et al.*, *Planetary Sci. J.* 2(5), id. 184 (2021).
46. *G. H. Fountain, D. Y. Kusnierkiewicz, C. B. Hersman, T. S. Herder, et al.*, *Space Sci. Rev.* 140, 23 (2008).
47. *S. A. Stern*, *Space Sci. Rev.* 140, 3 (2008).
48. *A. H. Parker*, *The Pluto System After New Horizons*, edited by S. A. Stern, J. M. Moore, W. M. Grundy, L. A. Young, and R. P. Binzel (Tucson: University of Arizona Press, 2010), p. 545.
49. *C. Howett, S. Robbins, B. J. Holler, A. Hendrix, et al.*, *Planetary Sci. J.* 2, 75 (2021).
50. *J. B. Garvin, S. A. Getty, G. N. Arney, N. M. Johnson, et al.*, *Planetary Sci. J.* 3(5), id. 117 (2022).
51. *L. Zasova, T. Gregg, N. Eismont, T. Economou, et al.*, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, held 15–20 September 2019 in Geneva, Switzerland, id. EPSC-DPS2019-1938 (2019).
52. *N. Eismont, V. Zubko, A. Belyaev, K. Fedyaev, L. Zasova, D. Gorinov, A. Simonov, and R. Nazirov*, *Acta Astronautica* 197, 310 (2022).
53. *N. V. Emel'yanov and J. E. Arlot*, *Astron. and Astrophys.* 487(2), 759 (2008).

EPHEMERIS THEORIES JPL DE, INPOP AND EPM**I. A. Moiseev^{1,*}, N. V. Emelyanov^{2,**}**

¹*Department of Celestial Mechanics, Astrometry and Gravimetry, Faculty of Physics,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

**E-mail: lxyniti@gmail.com*

***E-mail: emelia@sai.msu.ru*

This paper provides an overview and description of three leading sources of planetary ephemerides: the ephemerides from the Jet Propulsion Laboratory (JPL) and their developed ephemeris theory DE; the ephemerides from the Institute of Celestial Mechanics and Ephemeris Calculation (IMCCE) and their developed theory INPOP; and the ephemeris theory EPM developed at the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences (IAA RAS). The methods and observational data sets used in constructing each of the theories are described. A comparison of the ephemerides computed within these theories is made using examples from future space missions. It is shown that the differences in computed positions do not exhibit systematic characteristics and represent rather random discrepancies caused by variations in dynamic models and the observational data taken into account. The overall conclusion from the comparison of the ephemerides is that none of the considered options (JPL DE, EPM, and INPOP) has an advantage in terms of accuracy. All three options are equally valid, and any of the three ephemeris options can be used in practice.

Keywords: planets, ephemeris