

УДК 521.1+523.4
ББК 22.62
Е60

Емельянов, Николай Владимирович.

Е60 Динамика естественных спутников планет на основе наблюдений / Н. В. Емельянов ; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова ; Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга. — 576 с. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-89818-107-9

Представлен обширный набор методов и результатов изучения движения естественных спутников планет. Основное внимание уделено задаче уточнения параметров движения спутников на основе наблюдений. Дается множество фактических сведений об орбитах и физических свойствах естественных спутников больших планет Солнечной системы. Главы книги снабжены обширной библиографией работ, на которых основаны представленные в книге сведения.

Материал, изложенный в книге, предназначен для исследователей в широкой области динамики Солнечной системы, для специалистов, осуществляющих проекты по подготовке миссий к другим планетам. Книга предназначена также для использования в учебном процессе в классических университетах.

Она будет полезна и популяризаторам науки.

УДК 521.1+523.4
ББК 22.62

ISBN 978-5-89818-107-9

© Переиздание. ДМК Пресс, 2022
© Оформление. Век 2, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие автора	12
Глава 1. Цели, задачи и общий подход к изучению динамики спутников	15
1.1. Введение	15
1.2. Небесная механика — основа изучения динамики спутников планет	17
1.3. Цели изучения динамики спутников планет	18
1.4. Основные понятия небесной механики и астрометрии	19
1.5. Общий подход к изучению динамики планет и спутников	25
1.6. Особые свойства необходимых наблюдений	28
Глава 2. Спутники планет	33
2.1. Спутники планет — объекты Солнечной системы . . .	34
2.2. Классификация и номенклатура спутников планет . .	35
2.3. Открытие Нептуна и его спутника Тритона	39
2.4. История открытия спутника Плутона Харона	41
2.5. Орбитальные и физические параметры планет	49
2.6. Орбитальные параметры спутников планет	53
Литература к Главе 2	55
Глава 3. Уравнения движения и аналитические теории	59
3.1. Уравнения движения и системы координат	60
3.2. Модель кеплеровского движения	63
3.2.1. Основные формулы кеплеровского движения . .	63
3.2.2. Вычисление координат в эллиптическом кеплеровском движении	71
3.2.3. Вычисление скорости в эллиптическом кеплеровском движении	71

3.2.4.	Частные производные от координат и компонент скорости	71
3.2.5.	Формулы кеплеровского движения относительно элементов Лагранжа	74
3.2.6.	Примеры использования элементов Лагранжа	77
3.3.	Силовая функция притяжения несферичной планеты	77
3.3.1.	Разложение силовой функции	77
3.3.2.	Притяжение в моделях и для реальных тел	79
3.4.	Приближенный учет влияния главных спутников на движение далеких	83
3.5.	Подходы и методы построения моделей движения	84
3.6.	Обобщенная задача двух неподвижных центров	87
3.7.	Методы теории возмущений	90
3.7.1.	Общая схема теории возмущений	90
3.7.2.	Применение методов теории возмущений	92
3.7.3.	Уравнения относительно элементов промежуточной орбиты	98
3.7.4.	Решение уравнений методом малого параметра	105
3.7.5.	Решение уравнений способом Пуассона	109
3.8.	Разложение возмущающей функции относительно элементов промежуточной орбиты	112
3.9.	Определение возмущений	117
3.10.	Постоянное возмущение большой полуоси	123
3.11.	Прецессирующий эллипс	127
3.12.	Возмущенное движение при малых эксцентриситетах	129
3.12.1.	Формулировка проблемы	129
3.12.2.	Круговое возмущенное движение	130
3.12.3.	Переход к элементам кеплеровской орбиты	132
3.12.4.	Оскулирующие элементы в возмущенном движении при малых эксцентриситетах	135
3.13.	Построенные аналитические теории движения спутников планет	142
3.13.1.	Аналитическая теория движения Тритона	142
3.13.2.	Модели прецессирующих эллипсов для близких спутников Юпитера	149
3.13.3.	Специальные аналитические теории главных спутников больших планет	152
3.14.	Влияние приливов в вязко-упругих телах планеты и спутника	155

3.14.1. Постановка задачи о влиянии приливов	155
3.14.2. Уравнения в прямоугольных координатах	157
3.14.3. Решение уравнений в прямоугольных координатах	160
3.14.4. Переход к элементам кеплеровской орбиты	164
3.14.5. Некоторые важные выводы	176
Литература к Главе 3	178
Глава 4. Методы численного интегрирования	183
4.1. Цели решения уравнений движения небесных тел	184
4.2. Общие свойства методов численного интегрирования	185
4.3. Метод Рунге-Кутты	190
4.4. Алгоритм решения задач методами численного интегрирования	192
4.5. Инструкция к программе Эверхарта	194
4.6. Программа интегрирования М.В. Беликова	200
4.7. Сравнение процедур численного интегрирования	202
4.8. Аппроксимация рядами по полиномам Чебышева	202
4.9. Обзор методов. Книга В.А. Авдюшева	205
Литература к Главе 4	206
Глава 5. Наблюдения спутников планет	208
5.1. Общие принципы наблюдений	208
5.2. Определение топоцентрических положений	210
5.3. Наблюдения планеты	211
5.4. Наблюдения спутника планеты	214
5.5. Наблюдения двух спутников планеты	215
5.6. Определение угловых измеряемых величин	217
5.7. Угловое расстояние и позиционный угол	220
5.8. Определение тангенциальных координат	221
5.9. Определение разности координат в случае наблюдений взаимных затмений спутников	222
5.10. Заключение относительно измеряемых величин	225
5.11. Моменты видимых сближений спутников	225
5.12. Средства и техника наземных наблюдений	228
5.13. Источники данных наблюдений	231
5.14. Шкалы времени и системы координат	233
Литература к Главе 5	239

Глава 6. Построение моделей движения небесных тел на основе наблюдений	241
6.1. Метод дифференциального уточнения параметров. Применение МНК	242
6.2. Плохая обусловленность и неоднозначность решения .	254
6.3. Обзор сведений об алгоритмах фильтрации	257
6.4. Вычисление измеряемых величин и частных производных	259
6.4.1. Общий порядок вычислений	259
6.4.2. Дифференциальные уравнения для изохронных производных в задаче трех тел	263
6.4.3. Дифференциальные уравнения для изохронных производных. Уточнение массы возмущающего тела	266
6.4.4. Дифференциальные уравнения для изохронных производных в задаче о движении спутника сжатой планеты	267
6.4.5. Построение условных уравнений при угловых измерениях	270
6.5. Назначение весов наблюдениям	275
6.6. Вычисление статистических характеристик невязок . .	278
6.7. Проблема отбраковки грубых наблюдений	280
Литература к Главе 6	281
Глава 7. Получение астрометрических данных из наблюдений взаимных покрытий и затмений спутников планет	282
7.1. Описание явлений	283
7.2. Метод получения астрометрических данных	286
7.3. Упрощенный вариант модели	290
7.4. Фотометрические модели явлений	293
7.4.1. Общие фотометрические характеристики	293
7.4.2. Фотометрическая модель взаимного покрытия спутников	295
7.4.3. Фотометрическая модель взаимного затмения спутников	297
7.5. Законы рассеяния света для спутников планет	299
7.5.1. Закон рассеяния света Ломмеля–Зеелигера . .	299
7.5.2. Закон Хапке для гладкой поверхности	300
7.5.3. Закон Хапке для шероховатой поверхности . .	301

7.5.4. Параметры закона Хапке для Галилеевых спутников Юпитера	302
7.6. Фотометрические характеристики спутника, интегральные по диску	303
7.7. Фотометрические модели взаимных покрытий и затмений главных спутников Сатурна и Урана	306
7.7.1. Фотометрическая модель спутников Сатурна	306
7.7.2. Фотометрическая модель для спутников Урана	311
7.8. Соотношение точности наблюдений различных типов	312
7.9. Всемирные кампании наблюдений	313
7.10. Препятствия перед улучшением точности	313
7.11. Периоды явлений в будущем	320
Литература к Главе 7	321
Глава 8. Оценка точности эфемерид спутников планет	326
8.1. Факторы, определяющие точность эфемерид	327
8.2. Вариация ошибок наблюдений методом Монте-Карло	329
8.3. Вариация состава наблюдений «бутстреп»-выборками	332
8.4. Оценка точности методом вариации параметров	335
8.5. Точность эфемерид далеких спутников	337
Литература к Главе 8	342
Глава 9. Вращение спутников планет	344
9.1. Общие свойства вращения спутников планет	344
9.2. Основные понятия о вращении планет и спутников	347
9.3. Вращение Нептуна и орбита Тритона	349
9.4. Теория вращения Фобоса	353
9.5. Вращение Галилеевых спутников Юпитера, спутников Сатурна и Плутона	357
9.6. Хаотическое вращение спутников планет. Вращение Гипериона	359
Литература к Главе 9	366
Глава 10. Эволюция орбит спутников планет	370
10.1. Воздействие различных факторов на эволюцию орбит спутников планет	371
10.2. Эволюция орбит спутников от сжатия планеты	372
10.3. Эволюция орбит спутников планет под действием притяжения Солнца	376
10.3.1. Осреднение возмущающей функции	376
10.3.2. Частный случай — задача Хилла	381

10.3.3. Анализ при дважды осредненной возмущающей функции в случае Хилла	382
10.3.4. Эволюция при дважды осредненной возмущающей функции в случае Хилла	392
10.3.5. Применения для реальных спутников планет	400
10.4. Уточненные модели эволюции. Численно-аналитический метод	401
10.5. Эволюция орбит при совместном влиянии различных факторов	405
10.6. Классификация орбит спутников по свойствам эволюции орбит	409
10.7. Эволюция орбит и сближения далеких спутников	411
10.7.1. Современные знания об эволюции орбит далеких спутников планет	411
10.7.2. Сближения далеких спутников планет	415
10.7.3. Аналитическое описание эволюции орбит	416
10.7.4. Определение минимальных расстояний между орбитами	417
10.7.5. Интернет-ресурс по эволюции орбит и сближений далеких спутников	419
10.7.6. Примеры вычислений	420
10.7.7. Заключение	423
10.8. Уточнение теории вековых возмущений Лапласа – Лагранжа	424
Литература к Главе 10	425
Глава 11. Физические параметры спутников планет	432
11.1. Введение	433
11.2. Справочник по физическим параметрам спутников	434
11.3. Детектирование вулканов на спутнике Юпитера Ио	435
11.4. Оценки физических параметров далеких спутников планет	436
11.4.1. Особенности далеких спутников планет	436
11.4.2. Обзор имеющихся фотометрических данных	438
11.4.3. Фотометрическая модель для далеких спутников	442
11.4.4. Определение фотометрических параметров по результатам фотометрии	444
11.4.5. Исходные данные и результаты	446
11.4.6. Сравнение результатов разных авторов	450

11.4.7. Выводы об оценках фотометрических параметров	453
11.5. Определение массы Гималии по астрометрическим наблюдениям	454
Литература к Главе 11	459
Глава 12. Информационные ресурсы по естественным спутникам планет	464
12.1. Варианты и смена версий теорий движения	465
12.2. Доступ к базам данных и эфемеридам спутников	468
12.3. Возможности сервера эфемерид MULTI-SAT	475
12.4. Теории и модели в сервере эфемерид MULTI-SAT	481
12.5. Теории и модели в сервере эфемерид JPL	486
12.6. Спутники планет в виртуальных обсерваториях	488
12.7. Стандарты фундаментальной астрономии	488
Литература к Главе 12	491
Приложение 1. Номенклатура спутников планет	495
Приложение 2. Орбитальные параметры спутников	510
Приложение 3. Специальные функции в небесной механике	524
Приложение 4. Шкалы времени	530
Приложение 5. Декомпозиция Холецкого. Программа	536
Приложение 6. Параметры вращения планет и спутников	538
Приложение 7. Физические параметры спутников планет	556
Предметный указатель	572

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Лишь тогда есть толк в теории, когда она представляет собой не только абстрактные конструкции в воображении очарованного теоретика, а хорошо отлаженные процедуры, исправно служащие целям практического познания природы.

Динамика спутников планет представляет собой весьма интересную область небесной механики. На первый взгляд динамику спутников можно изучать и без наблюдений. Исследователь может придумать близкую к действительности или вообще абстрактную спутниковую модель, испытывать на ней новые методы, демонстрируя свое высочайшее мастерство. Есть и другое соблазнительное направление деятельности — объяснение того, почему небесные тела движутся именно так, как они движутся. Новое объяснение известных в природе фактов или объяснение ранее не объясненных явлений выглядит значительным научным достижением. Безусловно, мы таким образом оттачиваем свое мастерство. Однако в этих делах исследователь должен в какой-то момент остановиться и задать себе вопрос: добываем ли мы при этом новую информацию об окружающей нас природе. Разумеется, научное обобщение фактов на каком-то этапе может создать качественный скачок в наших представлениях о природе. Однако этому предшествует трудоемкий, а

иногда и изнурительный процесс накопления фактических знаний. В динамике спутников планет этот путь неизбежно пролегает через техническое освоение наблюдательной информации, через составление непомерно громоздких вычислительных программ и проведение скучнейших вычислений. Какой исследователь пойдет туда? Либо тот, кто понимает суровую неизбежность этого процесса, либо тот, кто имеет свои особые научно-технические пристрастия. В помощь именно таким отважным исследователям и написана предлагаемая книга.

Как и во многих других разделах астрономии, в динамике спутников планет критерием истины является соответствие наблюдениям. Теоретикам известно, что чем больше наблюдений, тем может быть хуже для теории. Можно поздравить таких теоретиков — на смену их теории пришла новая. Именно на такие события нецелена предлагаемая книга.

Как в обычной жизни, так и в научных исследованиях, мы нередко находимся в поисках справочного бюро. В наше время таким бюро является «всемирный виртуальный разум» — Интернет. В исследованиях динамики спутников планет, как и во многих других научных исследованиях, востребованы только такие данные, которые снабжены сведениями о том, кто и как эти данные получил, и для которых ясна их точность и достоверность. В предлагаемой книге приводится справочная информация по спутникам планет, снабженная ссылками на заслуживающие доверия источники.

Научный труд часто бывает успешным, когда он ограничен определенными рамками как по объектам, так и по методам исследований. В таком стройном процессе иногда случаются досадные ситуации, когда необходимо выходить наружу за незнакомыми методами или сведениями. В таких ситуациях может помочь предлагаемая книга.

Наконец, данная книга помогает противодействовать мнению о том, что слова «небесная механика» звучат старомодно, и что это не современная область астрономии. В действительности, небесная механика не ограничена задачей трех тел и определением орбиты по трем наблюдениям. В наше время это самая практическая и современная область астрономии. Она не только удовлетворяет наше природное любопытство, но также служит решению двух вечных проблем человечества: расширению среды обитания и защите от опасных сил природы.

Большая часть книги основана на научных результатах и публикациях автора. Для тех разделов, которыми автор сам непосредственно не занимался, в книге представлены краткие обзоры публикаций других специалистов. По всем разделам книги дана обширная библиография. Это необходимо для более детального изучения методов и научных результатов. Библиография сама по себе представляет справочный материал, востребованный для широкого использования. К каждой главе дается отдельный список. Некоторые ссылки могут повторяться в разных главах.

Научная работа по теме предлагаемой книги велась автором частично при сотрудничестве с коллегами из французского Института небесной механики и вычисления эфемерид. Это, с одной стороны, сопровождало работу хорошей экспертизой, а с другой стороны, обеспечивало востребованность получаемых автором результатов.

Возможность написания книги была в первую очередь обеспечена высоким уровнем образования, которое дал автору Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Всю свою научную жизнь автор провел в стенах Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ, где и была написана эта книга.

Автор выражает благодарность доценту Г.И.Ширмину за окончательное редактирование и корректуру книги.

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ОБЩИЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ ДИНАМИКИ СПУТНИКОВ

Резюме

В этой главе происходит первое свидание читателя с автором. Это очень важный момент. Поэтому здесь представлен общий взгляд автора на всю тему книги. Объясняются специфические особенности науки о динамике естественных спутников планет. Показаны цели всего этого дела и какой от него толк.

Для хорошего понимания всегда нужен общий язык. Поэтому в этой первой главе даны основные понятия, которыми оперирует автор. В отдельных научных сообществах вырабатываются свои определения вещей, иногда даже свой жаргон. Автор использует здесь те определения и понятия, которыми пользовались в свое время его учителя, и которые обычно используются в лекциях на астрономическом отделении Физического факультета МГУ.

Далее в главе представлен основной методический подход. Этому подходу подчинен весь последующий материал книги. В книге сделана попытка разностороннего описания динамики естественных спутников планет. Однако главное заключается в построении моделей движения на основе наблюдений. Во многих других задачах исследователи становятся пользователями этих моделей.

1.1. Введение

Сознание того, что во все стороны от нас простирается необъятная Вселенная, всегда беспокоило человека. Это вызывает двойное желание. Во-первых, хорошо бы понять своё место в необозримом

пространстве и бесконечном разнообразии мира. У человека нередко возникает легкий дискомфорт от отсутствия ответа на подобный вопрос. Одновременно рождается желание извлечь из Космоса выгоду для удовлетворения своих постоянно возрастающих потребностей. Еще большее беспокойство испытывает человек, обнаружив угрозу своей жизни со стороны сил природы. Ничто так не пугает нас, как непонятное. Удивительно легко успокоить человека объяснением страшных явлений даже не совсем знакомыми словами. Сознание того, что хоть кто-то разбирается в деяниях природы, возвращает нас к привычному комфорту повседневной жизни. Вот почему мы должны быть благодарны тем немногим людям, которые работают, чтобы избавить нас от мучительных вопросов о космосе и судьбе.

С древних времен люди задумывались о влиянии небесных светил на земную жизнь. Попытки сопоставить небесные явления с судьбой человека делались как учеными, так и далекими от науки предприимчивыми личностями. Однако во все времена неизменно получался весьма ненадежный результат. Что касается судьбы самих небесных тел, то астрономы и математики давно рассчитали удивительно устойчивый характер их движения. Размеры и формы орбит планет, наклоны осей их вращения почти не изменились даже на космогонических интервалах времени.

Ученые-естествоиспытатели и философы пришли к выводу, что главная причина существования Разума во Вселенной — это функция познания. Разумная жизнь характеризуется стремлением понять и объяснить происходящие вокруг явления.

На любом этапе познания Вселенной мы уже имеем более или менее адекватную ее модель. Новые, более точные наблюдения приводят к рассогласованию модели с действительностью. Чаще всего желаемое согласование модели восстанавливается путем уточнения известных параметров движения или состояния небесных тел. Иногда приходится значительно совершенствовать теории, методы построения модели или методы вычислений. Процесс невольно направлен на обнаружение новых, необъясненных явлений. На некотором этапе удается добыть эту столь необходимую Разуму «пищу», но этому всегда предшествует колоссальный труд ученых — наблюдателей, теоретиков, вычислителей. Модели движения небесных тел ценны еще тем, что позволяют нам предвычислять их расположение на любой момент времени в прошлом или будущем.

Лишь тогда есть толк в теории, когда она представляет собой не только абстрактные конструкции в воображении очарованного теоретика, но и хорошо отлаженные процедуры, исправно служащие целям практического познания природы. Одним из главных инструментов на таком пути является практическая небесная механика. Именно практическая небесная механика дает нам наиболее полные и точные знания о динамике спутников планет.

1.2. Небесная механика — основа изучения динамики спутников планет

Небесная механика — область науки, которая занимается изучением движений небесных тел под действием естественных сил природы.

Предметом небесной механики являются механические формы движения материи.

Объекты исследований — всевозможные материальные образования, от мельчайших частиц космической пыли до колоссальных систем типа звездных скоплений, галактик и скоплений галактик.

Цель небесной механики — познание законов природы, управляющих механическими движениями небесных тел.

Для всего естествознания небесная механика играет роль фундамента, без которого немислимо познание Вселенной и освоение Космоса. Значение небесной механики для жизни на Земле состоит в использовании знаний о движении небесных тел и ближнем Космосе для лучшего удовлетворения потребностей человека и его защиты от сил природы. Теория движения искусственных спутников Земли позволяет использовать космические аппараты для коммуникации и исследования земных ресурсов. Теория движения астероидов, комет и метеоров дает оценку опасности попадания этих тел в атмосферу и выпадения на земную поверхность. Исследования движений тел Солнечной системы позволили создать фундаментальную систему отсчета — модель инерциальной системы, реализованную небесной механикой и астрометрией в форме астрономических ежегодников и фундаментальных звездных каталогов.

В недрах небесной механики возникли, оформились и развились многие наиболее эффективные методы математической физики и вычислительной математики.

В качестве примера (и отнюдь не единственного!) можно указать методы численного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих различные природные явления и рукотворные процессы. Зародившись в небесной механике, эти и другие численные методы получили широчайшее распространение в науке и технике. В XVII-XVIII веках с решения астрономических задач методами небесной механики началась, по существу, и вся теоретическая физика.

Не только преимущественно теория систем обыкновенных дифференциальных уравнений, как это было в прошлом столетии, но, по сути дела, весь арсенал современных средств прикладной математики используется современной небесной механикой при моделировании движений космических объектов.

1.3. Цели изучения динамики спутников планет

Основная цель изучения динамики тел Солнечной системы — знание движения планет и их спутников. Задача совпала с вечной проблемой человечества — расширением и изучением среды обитания. Спутники больших планет — наиболее подходящие места для посадки автоматических и обитаемых космических аппаратов. Изучение строения и динамики тел Солнечной системы является важной частью динамической астрономии. Решается эта задача методами небесной механики на основе астрометрических наблюдений. Новая задача динамики тел Солнечной системы, возникшая во второй половине XX века, — межпланетная навигация.

Общий подход к изучению динамики — создание моделей движения и эфемерид планет, астероидов и естественных спутников планет. Процесс основывается на общих законах природы, физических параметрах небесных тел и, самое главное, на их наблюдениях. Используются современные математические методы и самые совершенные методы вычислений. Эфемериды являются конечным результатом исследований, так как содержат в себе все знания о динамике тел Солнечной системы.

Эфемериды нужны для определения физических свойств небесных тел. С их помощью изучается происхождение и эволюция Солнечной системы. Эфемериды нужны также для подготовки и проведения космических миссий к другим планетам. С помощью эфемерид открывают новые небесные тела. Еще в середине XIX века

французский ученый Лавуазье на основе эфемерид открыл новую планету Нептун. Процесс открытия новых планет и спутников таким путем продолжается и сейчас. В итоге мы заключаем, что эфемериды являются средством исследований, так как содержат в себе все знания о движении планет и спутников.

Результаты и выводы небесной механики явно и незримо присутствуют во многих других областях науки и практической деятельности человека.

1.4. Основные понятия небесной механики и астрометрии

Установим некоторые основные понятия практической небесной механики и астрометрии, которыми мы будем оперировать в последующем изложении.

Объектами наших исследований являются планеты и спутники Солнечной системы. На пути исследований оперируют с моделями небесных тел, которых в природе не существует, но которые в известной мере мало отличаются от реальных небесных тел. Примерами таких объектов могут служить материальная точка или абсолютно твердое однородное тело, ограниченное поверхностью трехосного эллипсоида.

Законы движения. Реальным проявлением движения небесных тел является изменение их взаимного расположения, которое определяется взаимными расстояниями. Для задания движения системы небесных тел следует задать закон изменения их взаимных расстояний во времени. Математическим описанием законов движения являются те или иные функции времени.

Для удобного отображения движения небесных тел оперируют понятиями системы отсчета, системы координат и шкалы времени. Абстрактное понятие системы координат так или иначе связывают с реальными небесными телами. Примерами могут служить Гринвичский меридиан на Земле или внегалактические радиоисточники излучения. Абстрактное понятие шкалы времени связывают с реальными физическими процессами. Примерами могут служить вращение Земли или электромагнитное излучение атома.

Законы взаимодействия. Основой для изучения движения небесных тел являются строго установленные из наблюдений законы физики, которые описывают взаимодействия тел или воздействия на

них той среды, в которой они движутся. Математической формой законов взаимодействия небесных тел оказываются обыкновенные дифференциальные уравнения, которым удовлетворяют взаимные расстояния между небесными телами или их координаты.

Механическая модель. В небесной механике используют понятие механической модели. Модель описывается составом движущихся объектов, их свойствами, заданием сил, действующих на отдельные компоненты модели. Механические модели используются либо для приближенного описания движений небесных тел либо как основа для разработки более точных методов описания их движений.

Задачей практической небесной механики считается создание и исследование различных механических моделей, а также изучение и описание движения реальных небесных тел.

Механическая модель, являясь, как правило, приближенным описанием движения системы реальных небесных тел, может принципиально от нее отличаться. В частности, свойства тел в модели могут не соответствовать реальности, а законы действующих сил могут задаваться специальным образом. Примерами могут служить задача о движении системы **материальных точек**, в которой небесные тела не имеют размеров, или **ограниченная задача трех тел**, не удовлетворяющая третьему закону Ньютона.

Наблюдения. Измеряемые величины. Источником наших знаний о небесных телах являются наблюдения. Наблюдая, мы не можем довольствоваться констатацией факта наличия небесного тела на небе. В процессе астрономических наблюдений выполняются измерения тех или иных величин. Делается это с помощью разнообразных приборов. В отличие от абстрактных координат, измеряемая величина всегда реальна. Она образуется в измерительном приборе. Астрономы имеют дело с богатым разнообразием приборов и измеряемых величин. Примерами могут служить углы поворота оси телескопа относительно отвесной линии и плоскости меридиана, расстояния между изображениями небесных тел на фотопластинках, промежуток времени между вспышкой лазерного дальномера и фиксацией в телескопе отраженного от небесного тела светового импульса, интенсивность засветки отдельного пиксела полупроводникового приемника света, разность продолжительностей записи фрагмента излучения космического радиоисточника на двух радиотелескопах.

Точность наблюдений. Приборам присуща погрешность. Таинства процессов, происходящих в измерительных приборах, оставляют нам лишь возможность строить гипотезы относительно ошибок измерений. Никогда не бывает известна величина ошибки отдельного измерения. Очень часто мы предполагаем, что погрешности чисто случайны, и рассматриваем различные статистические характеристики ошибок. Чаще всего оперируют с понятием наиболее вероятной среднеквадратичной величиной ошибки. Конструктивные свойства измерительных приборов иногда позволяют приближенно установить точность измерений. В общем случае мы говорим о *точности наблюдений*.

Время. Изменение измеряемой величины во времени обусловлено движением небесных тел. Измерение выполняется в некоторый момент времени. Момент отсчитывается по часам обсерватории. В практической небесной механике измеряемой величине всегда приписывают конкретный момент измерения.

Время является абстрактным понятием, для его определения нужны какие-нибудь измерительные приборы. Любой прибор имеет собственную погрешность измерения. Сначала время измеряли углом вращения Земли. Такое время называли всемирным и обозначили через UT. Когда были обнаружены расхождения теории движения Луны с наблюдениями, стало ясно, что Земля вращается неравномерно, и эталоном стало время, как независимая переменная в теории движения Луны. Время, измеряемое по наблюдениям Луны, называлось эфемеридным временем и обозначалось ET (Ephemeris Time). Однако точность наблюдений Луны все же ограничена. Поиски более точного измерителя времени привели к атомным часам. Этот датчик времени является сейчас наиболее точным. Время, осредненное по нескольким наиболее точным атомным часам мира, называют международным атомным временем и обозначают IAT.

В дальнейшем мы будем говорить о наблюдениях небесных тел, всегда предполагая при этом получение той или иной *измеряемой величины* на некоторый момент времени — *момент измерения*.

Точность астрономических измерений достигла уже такого уровня, что стала заметна неадекватность классической ньютоновской механики наблюдаемому движению небесных тел. В более точной общей теории относительности время течет различно в любых двух

точках пространства. Для связи различных шкал времени нужно учитывать движение тел и их массы.

Параметры движения. Изучая планеты и спутники, звезды и галактики мы смело предполагаем, что все время остаются постоянными некоторые параметры, присущие небесным телам и их движению. К ним относятся масса, размеры и форма тел, параметры орбиты и многие другие величины. Эти параметры невозможно непосредственно измерить с помощью имеющихся приборов. Однако их значения реально проявляют себя в наблюдаемом движении небесных тел. Будем называть в дальнейшем такие величины *параметрами движения* небесных тел.

Системы координат. Измеряемые величины не дают наглядных представлений о конфигурации системы небесных тел и тем более непригодны непосредственно для выражения общих законов движения. Удобным средством описания пространственного расположения тел и направлений на небесные светила являются системы координат. Когда говорят о положении светила или об ориентации тела в некоторой системе координат, имеется в виду абстрактные оси координат в пространстве и воображаемые линии на небе. Системы координат выбирают так, чтобы дать ясное представление о законах и свойствах движения небесных тел.

Выбор системы координат обусловлен удобством описания и изучения движения конкретного небесного тела. Начало и оси координат связывают либо с деталями объекта, например с гринвичским меридианом Земли, либо с его динамическими свойствами, например, с главными осями инерции тела, либо со свойствами движения, например, с осью вращения тела, либо с положением тела в некоторый момент времени, либо выбирают систему координат другим специальным образом.

Чаще других используется система прямоугольных или декартовых координат, ее начало обозначают буквой O , а оси — буквами x , y , z . Столь же часто применяется система сферических координат с обозначением центрального расстояния буквой r , широты — буквой φ и долготы — буквой λ .

Любые системы координат с началом, расположенным в точке наблюдения, называются топоцентрическими. Направления осей топоцентрической системы связывают с линией отвеса и местным меридианом. Говорят о геоцентрических системах координат, когда начало помещено в центр масс Земли.

Законы движения небесных тел — это зависимости координат тел от времени и параметров движения. Зависимости могут принимать различные формы. Чаще всего используются аналитические функции, описывающие явную зависимость координат от времени. В некоторых случаях зависимость дается в неявной форме, тогда координаты получаются путем вычислений по формулам последовательными приближениями. Закон движения может иметь форму числовых таблиц, в которых значения координат небесных тел заданы на ряд фиксированных моментов времени, обычно следующих с каким-то постоянным шагом. При таком численном задании закона движения теряется зависимость координат от параметров движения небесного тела. В этом случае затруднен анализ свойств движения, и мы ограничены тем интервалом времени, для которого координаты были вычислены.

Координаты небесных тел являются абстрактными понятиями. Их нельзя измерить никакими приборами. Системы координат моделируются с помощью формул и алгоритмов и являются составной частью модели движения небесных тел.

Модель движения небесного тела.

Мы не знаем точно, как устроены небесные тела и по каким точным законам они движутся. Поэтому приходится довольствоваться изучением моделей движения, выдвигая смелую гипотезу о том, что наши модели мало отличаются от действительности.

В общем случае под моделью движения небесного тела мы будем подразумевать некоторую конструкцию, позволяющую определять значения измеряемой величины на любые заданные моменты времени при известных значениях параметров движения.

Реализации модели движения небесного тела могут иметь весьма различные формы. Это могут быть математические формулы, написанные вручную на бумаге или опубликованные в виде печатного материала. Это могут быть напечатанные числовые таблицы значений координат. В настоящее время и формулы и таблицы отображаются в памяти компьютеров. При этом формулы преобразуются в алгоритмы вычислений, а таблицы доступны вычислительным программам, решающим те или иные задачи. Однако даже в эпоху мощной вычислительной техники в нескольких научных центрах мира создаются и печатаются в форме астрономических ежегодников координаты основных небесных тел, вычисленные на несколько лет вперед.

Откуда же берутся законы движения небесных тел? В старые времена они устанавливались почти эмпирически из простых наблюдений. Сейчас же, конечно, законы движения находят в процессе решения дифференциальных уравнений движения относительно координат небесных тел. Составляют эти уравнения на основе строго установленных законов физики, которые описывают взаимодействия тел или воздействия на них той среды, в которой они движутся. Это делается в рамках какой-либо механической модели. Четко фиксируются все факторы, влияющие на движение каждого тела системы и включенные в рассматриваемую модель. Процесс построения законов движения небесных тел, а также его результат — сами законы движения, называют теорией движения. Именно этим занимается небесная механика.

В подавляющем большинстве задач небесной механики невозможно получить точное решение уравнений движения. Приходится довольствоваться либо приближенным решением точных уравнений, либо точным решением приближенных уравнений. Применяются как аналитические, так и численные методы решения дифференциальных уравнений. В обоих случаях решение обладает погрешностью. Эта погрешность может быть более или менее достоверно оценена с помощью самой теории.

Точность модели движения небесного тела. Исходными данными для модели движения небесного тела являются параметры движения, которые в свою очередь известны с некоторой погрешностью. Эта погрешность также повлияет на точность предвычисления координат небесного тела и точность предвычисления измеряемой величины. В дальнейшем мы будем говорить о *точности модели*, подразумевая погрешность вычисления измеряемой величины. При этом мы разделяем два источника этой погрешности: приближенность найденного решения уравнений движения и неточность параметров движения. Погрешность решения уравнений движения мы будем также называть погрешностью вычислений или погрешностью метода. Говоря о точности теории движения небесного тела, всегда нужно уточнять, включена ли в погрешность теории неточность параметров движения или имеется в виду точность теории в предположении абсолютно точных параметров.

Методы исследований. От других астрономических дисциплин небесная механика отличается лишь методами исследования, среди которых выделяются: *аналитические, численные, качественные.*

Аналитические методы дают возможность получать набор аналитических соотношений, позволяющих рассчитывать приближенные положения и скорости небесных тел на заданные моменты времени, минуя какие-либо промежуточные их значения. Особенностью аналитических методов является большая трудоемкость и нарастающая громоздкость выкладок. Кроме того, аналитические методы не дают возможности судить о свойствах исследуемых движений на очень больших интервалах времени. Другим их недостатком является то, что применимы они не ко всем объектам.

Ограничения, свойственные аналитическим методам, не распространяются на *численные методы*, которые пригодны для расчета движений любых небесных тел и их систем с наперед заданной точностью. С внедрением в научные исследования мощных вычислительных машин считавшаяся прежде чрезмерной трудоемкость численных методов перестала быть препятствием для их применения. Но и у них есть своя ахиллесова пята — это неуклонное накопление погрешности с увеличением интервала интегрирования при невозможности строгих оценок роста этой погрешности. Еще один недостаток этих методов — численная форма представления результатов и неизбежность расчета промежуточных этапов, хотя зачастую целью исследования является конечная конфигурация после интегрирования.

Качественные методы небесной механики позволяют судить о свойствах движений небесных тел без полного интегрирования (аналитического или численного) дифференциальных уравнений.

Аналитические, численные и качественные методы продолжают применяться в современной практической небесной механике, причем красота и высокая эффективность аналитических методов удачно сочетается с простотой и универсальностью методов численных, а все это дополняется космогонической важностью выводов, получаемых качественными методами исследований.

1.5. Общий подход к изучению динамики планет и спутников на основе наблюдений

Общим подходом к изучению динамики планет и спутников является построение модели движения на основе наблюдений. Именно модель движения нужна для практического познания природы.

На рис. 1.1 изображена схема изучения динамики тел Солнечной системы на основе наблюдений. На любом этапе исследований мы фиксируем состав изучаемой системы небесных тел. Установленные на текущий момент законы взаимодействия тел (гравитационное притяжение, сопротивление среды) позволяют записать дифференциальные уравнения движения. Используя аналитические методы, можно найти общее решение уравнений движения. Подставляя в это общее решение значения произвольных постоянных (параметров движения), получим искомую модель движения системы небесных тел. Решая уравнения движения методами численного интегрирования при известных начальных условиях (параметров движения), также получаем модель движения системы небесных тел. Некоторые предварительные значения параметров движения обычно бывают известны из предшествующих исследований. Для построения модели движения потребуются также значения физических параметров, входящих в уравнения движения посредством законов взаимодействия (например, массы тел).

Основным процессом изучения динамики небесных тел является уточнение модели на основе наблюдений. Наблюдения дают нам значения измеряемых величин. Назовем их измеренными значениями. С другой стороны, мы имеем модель движения, которая для того и служит, чтобы предвычислять измеряемые величины. Мы можем вычислить измеряемые величины именно на моменты наблюдений. Результаты называются вычисленными значениями измеряемой величины. Разные по происхождению значения одной и той же величины будут различаться между собой. Эту разность значений мы обозначаем на рис. 1.1 символически через «О-С» (О — *observatum*, С — *calculatum*). Разность естественна, так как в ней присутствует погрешность наблюдений и погрешность модели движения небесного тела. Однако в некоторых случаях разности «О-С» будут превышать погрешность модели и погрешность наблюдений. Новые, более точные наблюдения обнаруживают рассогласование модели с действительностью. В этих случаях рассогласованию приписывают наиболее простую и наиболее вероятную причину — неточность принятых значений параметров движения небесного тела. В дело включается процесс, называемый уточнением параметров движения из наблюдений (см. «Методы уточнения параметров» на рис. 1.1). Чаще всего желаемое согласование теории с наблюдениями достигается путем уточнения параметров, и разно-

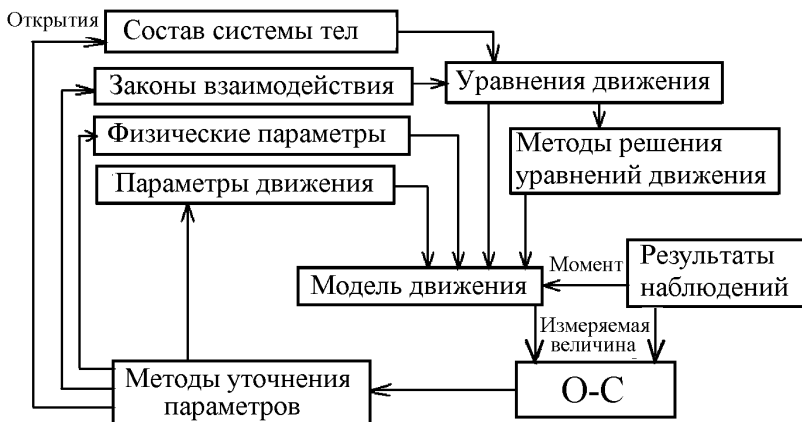


Рис. 1.1. Схема процесса изучения динамики небесных тел.

сти «О-С» снова оказываются в пределах погрешностей модели и наблюдений.

В некоторых редких случаях не удается добиться согласования теории с наблюдениями — разности «О-С» остаются значительными. Тогда приходится совершенствовать методы решения уравнений движения и методы вычислений. Это наиболее трудоемкая часть небесной механики. Заново пересматриваются факторы, влияющие на движение каждого небесного тела. Выводятся новые, более точные формулы теории. Как следствие, формулы становятся более длинными. Разрабатываются и применяются более точные методы вычислений. Как следствие, необходимое вычислительное время существенно увеличивается.

В еще более редких случаях рассогласование теории с наблюдениями остается существенным, сколько ни пытаются исследователи уточнить параметры движения и усовершенствовать модель движения. В результате обобщения фактов, проверки новых гипотез и высшего напряжения интеллекта совершается открытие. Могут быть открыты ранее неизвестные небесные тела или новые законы взаимодействия известных тел. В такой ситуации резко расширяются наши общие представления об окружающем мире. Делается обобщение основных законов природы.

Приведенная здесь схема, как любая схема, суха и ограничена,

она лишь в общем виде отражает разнообразные научные изыскания и накопление фактов, фантазии и ошибки.

Отметим, что описанный процесс имеет также сугубо практическую направленность. Модель движения небесных тел является основой для слежения за возможными опасностями со стороны сил космоса. Модель движения небесных тел также непосредственно используется для проектирования и обеспечения полетов автоматических и пилотируемых околоземных и межпланетных аппаратов — искусственных небесных тел.

1.6. Особые свойства необходимых наблюдений

Движение большинства реальных и воображаемых небесных тел имеет характер обращений одних тел вокруг других. Изучаются также собственные вращения небесных тел. Обращение или вращение тела описывается углом, величина которого монотонно возрастает во времени. Рассмотрим подробнее, как определяются эти процессы из наблюдений.

Угол орбитального обращения или угол вращения небесного тела назовем условно *долготой* и обозначим ее здесь через λ . В большинстве механических моделей скорость изменения долготы $\dot{\lambda}$ приближенно оказывается постоянной.

Прогресс может быть достигнут повышением точности наблюдений. На этом пути может произойти открытие либо нового свойства известного небесного тела, либо новой планеты или спутника. Поясним это на примере.

Допустим, что мы построили хорошую модель движения и с ее помощью вычислили разности значений орбитальной долготы, полученных из наблюдений, и вычисленных по теории, т. е. так называемые невязки «О-С». При наличии ошибок наблюдений график этих разностей может выглядеть так, как показано на рис. 1.2а. Мы видим здесь только «шум» и ничего интересного. Допустим, что прогресс в технике наблюдений позволил улучшить точность наблюдений. Шум уменьшился. На его фоне возникает что-то подозрительное на вид. Это мы видим на рис. 1.2б. При дальнейшем повышении точности наблюдений очевидно наличие некоторого синусоидального изменения разностей «О-С». Смотрите на рис. 1.2в. Этот «сигнал» послужит определению того, чего мы раньше не учли в нашей теории.

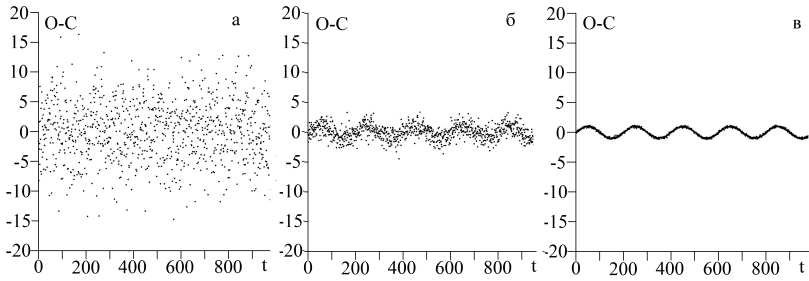


Рис. 1.2. Примеры остаточных отклонений O-C орбитальной долготы небесного тела при различной точности наблюдений.

Свойство орбитальных движений небесных тел таково, что орбитальная долгота увеличивается монотонно со временем. Если исключить из ее значений, полученных из наблюдений, функцию ее теоретического изменения, то можно получить то, что изображено на рис. 1.3а. Снова ничего интересного. Если поискать старые наблюдения и продолжать наблюдать интересующее нас небесное тело, то можно получить то, что показано на рис. 1.3б. Мы видим почти квадратичное по времени изменение долготы. Такой эффект может появиться только из-за неучтенной диссипации механической энергии небесного тела, что может быть вызвано, например, приливными силами.

Теперь ясно, что для прогресса необходимо расширение интервала времени наблюдений. На каком-то этапе это может привести к открытию новых явлений.

Какова же связь интервала времени наблюдений и точности эфемерид? Посмотрим на рис. 1.4а. Показаны значения орбитальной долготы небесного тела, полученные из наблюдений на интервале времени (t_1, t_2) . Налицо некоторый «шум» и линейное изменение. На основе теории и наблюдений мы можем вычислить возможные значения долготы на интересующий нас момент времени t_f , ограниченные прямыми линиями на рисунке. Если мы продолжим наблюдения с прежней точностью до момента t_3 , то точность эфемериды улучшится, что и видно на рис. 1.4б.

Очевидно, что мы не можем измерять орбитальную долготу непосредственно при наблюдениях. Мы наблюдаем лишь проекцию орбитального движения на небесную сферу. Однако можно вывести

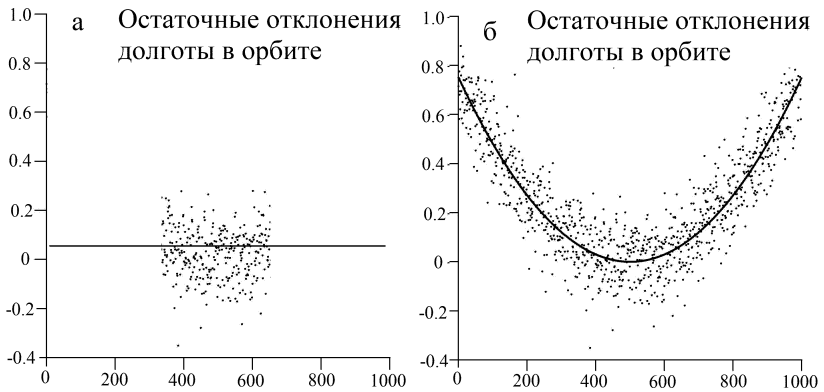


Рис. 1.3. Примеры остаточных отклонений О-С орбитальной долготы небесного тела на различных интервалах времени.

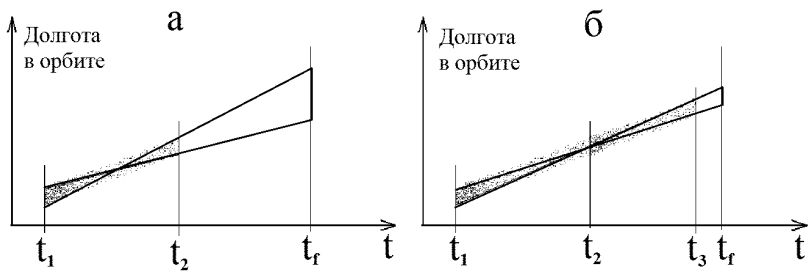


Рис. 1.4. Демонстрация зависимости точности эфемерид небесного тела от интервала времени наблюдений.

приближенную формулу относительно точности определения орбитальной долготы. Аналогичные выводы можно будет сделать и по отношению к другим характеристикам орбитального движения.

Теория рассматриваемого здесь процесса состоит в описании линейного изменения орбитальной долготы небесного тела во времени. Параметром теории движения, определяемым из наблюдений, будет λ . Измеряемой величиной — сама долгота λ . Такие обстоятельства характерны для всех естественных спутников планет.

При выполнении однотипных наблюдений погрешность измерения долготы будет одинаковой в любые моменты времени. Обозначим эту погрешность через σ_λ . Пусть измерение долготы выполне-

но в два момента времени t_1 и t_2 . Тогда погрешность определения параметра движения σ_{λ} находится из соотношения

$$\sigma_{\lambda} = \frac{\sigma_{\lambda}}{t_2 - t_1},$$

откуда видно, что точность определения параметра движения улучшается с ростом интервала измерений $t_2 - t_1$.

Посмотрим теперь, какова роль точности параметра движения при реализации основной цели теории — предвычисления долготы на заданные моменты времени. Допустим, что нужно вычислить долготу на момент времени t_f в будущем, то есть $t_f > t_2$. Погрешность такого предвычисления определится по формуле

$$\sigma_{\lambda(t_f)} = \frac{\sigma_{\lambda}}{t_2 - t_1} \left(t_f - \frac{t_1 + t_2}{2} \right).$$

Эта погрешность также уменьшается с ростом интервала измерений.

Допустим, что наблюдения продолжались после момента t_2 . Пусть последнее новое наблюдение выполнено в некоторый момент t_3 ($t_3 > t_2$). Теперь погрешность предвычисления долготы на момент t_f стала равной

$$\sigma_{\lambda(t_f)} = \frac{\sigma_{\lambda}}{t_3 - t_1} \left(t_f - \frac{t_1 + t_3}{2} \right) < \frac{\sigma_{\lambda}}{t_2 - t_1} \left(t_f - \frac{t_1 + t_2}{2} \right).$$

Таким образом, точность предвычисления долготы улучшилась.

Посмотрим, что может дать привлечение более точных наблюдений, но выполненных на небольшом интервале времени. Пусть, например, посередине интервала измерений $t_1 - t_2$ в моменты t_1^* , t_2^* выполнены два измерения долготы с погрешностью σ_{λ}^* . Пусть при этом

$$\sigma_{\lambda}^* = 0.5 \sigma_{\lambda}, \quad t_2^* - t_1^* = 0.1 (t_2 - t_1), \quad \frac{t_1^* + t_2^*}{2} = \frac{t_1 + t_2}{2},$$

то есть новые наблюдения в два раза точнее прежних, а интервал измерений в десять раз меньше.

Точность предвычисления долготы на основе более точных наблюдений найдется из соотношений

$$\sigma_{\lambda(t_f)} = \frac{\sigma_{\lambda}^*}{t_2^* - t_1^*} \left(t_f - \frac{t_1^* + t_2^*}{2} \right) = 5 \frac{\sigma_{\lambda}}{t_2 - t_1} \left(t_f - \frac{t_1 + t_2}{2} \right),$$

откуда видно, что эта точность оказалась в пять раз хуже, чем на основе прежних, менее точных наблюдений.

Рассмотренный здесь анализ общих свойств построения модели на основе наблюдений приводит к следующим выводам.

1. Для построения модели движения любого небесного тела всегда стараются использовать набор всех существующих в мире наблюдений, начиная с момента открытия этого небесного тела.

2. Продолжение наблюдений небесных тел даже с прежней точностью оказывается полезным.

3. Использование наблюдений, выполненных с лучшей точностью, не всегда приводит к уточнению модели. Преимущества одних наблюдений по сравнению с другими определяются не только их точностью, но также интервалом времени, на котором они выполнены.

4. Любые новые наблюдения, даже более точные, почти всегда используются только как дополнение к уже существующей базе данных.

Эти выводы составляют особенность практической небесной механики по сравнению с многими другими исследованиями небесных тел, когда новые ценные научные результаты получаются на основе только новейших наблюдений, которые по точности перекрывают старые. В практической небесной механике более точная и более адекватная действительности модель движения небесного тела строится на основе более полной базы данных наблюдений.

Кроме того, очевидна необходимость поиска новых способов наблюдений, представляющих новые данные о движениях небесных тел.