

В. М. Чаругин

КЛАССИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

Учебное пособие



Москва
2013

УДК 52
ББК 22.6
Ч237

Рецензенты:

И. В. Разумовская, зав. кафедрой физики твердого тела
(с секцией астрономии) МПГУ, д-р хим. наук, профессор

М. В. Попов, зав. отделом «Радиоастрономия»
АКЦ ФИАН РАН, д-р физ.-мат. наук

Ч237 **В. М. Чаругин**. Классическая астрономия: Учебное
пособие. – М.: Прометей, 2013. – 214 с.

Предлагаемое пособие «Классическая астрономия» представляет собой первую часть курса по общей астрономии и предназначено для студентов педагогических вузов, изучающих астрономию по учебным планам бакалавриата и магистратуры физической и математической специальностей. Пособие содержит все основные сведения из классических разделов астрономии, а также элементы теории запуска искусственных небесных тел.

В книге изложены основы астрометрии и небесной механики, показаны принципы современных практических и теоретических методов изучения видимого положения и пространственного движения небесных тел и их систем.

ISBN 978-5-7042-2400-6

© В. М. Чаругин 2013
© Издательство «Прометей», 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие представляет собой первую часть общего курса астрономии, который на протяжении многих лет читался автором студентам факультета физики и информационных технологий МПГУ. В пособии излагаются основные вопросы классической астрономии – астрометрии и небесной механики. Автор придерживался современных взглядов на методику преподавания, учитывающих межпредметные связи, тем более что курс излагался студентам после изучения ими общей физики и высшей математики.

§ 1. Предмет астрономии

Астрономия – наука о физическом строении, движении, происхождении и эволюции небесных тел, их систем и Вселенной в целом.

Объекты, изучаемые в астрономии, весьма разнообразны. Перечень их по мере развития астрономии непрерывно возрастает, постоянно подтверждая неисчерпаемость и многообразие материального мира. Традиционными объектами астрономических исследований являются Солнце, звезды, планеты и их спутники, метеорные тела, туманности, звездные скопления, звездные системы и вся Вселенная в целом. С прогрессом науки связано открытие новых объектов – пульсаров, квазаров (квазизвездных радиоисточников), космических лучей (частиц высоких энергий), микроволнового фонового (реликтового) излучения и поиск теоретически предсказанных «черных дыр» и гравитационных волн. Наконец, с позиций теории строения Вселенной в целом (космологии) астрономия изучает структуру пространства – времени Вселенной. С астрономией тесно связаны проблема поиска внеземных цивилизаций и разработка способов контактов с ними.

До начала космической эры астрономия была единственной наукой, изучающей внеземные объекты природы. Теперь космическими исследованиями занимается не только астрономия.

Самостоятельное развитие приобретают космонавтика и многочисленные новые отрасли – космическая биология, космическая медицина, спутниковая геодезия и другие.

Успехи космонавтики существенно отразились на астрономических способах исследований, внося в астрономию, помимо наблюдений, и эксперимент.

§ 2. Структура современной астрономии

Современная астрономия – широко разветвленная наука, использующая разнообразные методы и средства познания Вселенной. Разделы астрономии тесно связаны между собой, и среди них можно выделить шесть основных.

1. Астрометрия разрабатывает теоретические методы, технику измерений на небесной сфере и способы их математической обработки. В ведении астрометрии находится служба времени – его определение из астрономических наблюдений. В ведении астрометрии находится также и календарь. Одной из важных задач является построение инерциальной системы координат.

Этот же раздел астрономии занимается разработкой способов определения из наблюдений географических координат пунктов земной поверхности.

В астрометрии можно выделить такие подразделы:

а) сферическую астрономию, разрабатывающую математические методы определения видимых положений и движений небесных светил, а также системы счета времени;

б) практическую астрономию, разрабатывающую способы наблюдений, методы их обработки и теорию астрономических приборов.

Методы практической астрономии применяются в морской, авиационной и спутниковой навигации и в геодезии.

2. Небесная механика – наука о пространственном движении небесных тел и их систем под действием сил взаимного тяготения и иной физической природы. Она изучает фигуры небесных тел и их устойчивость, во многом способствует пониманию процессов происхождения и эволюции небесных тел и их систем. Практическая задача небесной механики состоит и в определении элементов орбит небесных тел по данным наблюдений, в предвычислении видимых положений небесных тел.

Вычисление видимых положений (эфемерид) и определение орбит небесных тел составляет основу раздела небесной механики, традиционно называемого теоретической астрономией.

Ныне разрабатываются новые способы определения орбит, основанные на радиотехнических измерениях и лазерной локации.

Небесная механика быстро развивается в связи с запросами космонавтики. На ее базе формируется новая отрасль науки – динамика космического полета.

3. Астрофизика – один из крупнейших разделов современной астрономии. Ее задачи состоят в изучении физического состояния и процессов, происходящих на поверхности и в недрах небесных тел, их химического состава, свойств среды между небесными телами и т.д.

Астрофизика подразделяется на практическую и теоретическую. Первая разрабатывает способы астрофизических наблюдений и их обработки, занимается теорией и практическим применением астрофизических инструментов.

Теоретическая астрофизика занимается объяснением происходящих на небесных телах физических процессов и наблюдаемых явлений на основе теоретической физики.

Развитие теоретической и экспериментальной физики, быстрый прогресс техники привели к возникновению новых разделов астрофизики. Существенно расширен диапазон электромагнитных волн, используемый в наблюдениях. Возник раздел астрофизики, названный радиоастрономией, который исследует небесные тела посредством радиолокации и исследования их излучения в радиодиапазоне.

Установка астрономической аппаратуры на искусственных спутниках Земли и космических аппаратах позволила существенно расширить исследуемый диапазон спектра электромагнитного излучения небесных тел, свободного от помех, создаваемых земной атмосферой.

К новейшим разделам астрофизики относятся инфракрасная, рентгеновская астрономия, гамма-астрономия и нейтринная астрономия.

4. Звездная астрономия занимается исследованием движения и распределения в пространстве звезд, газопылевых туманностей

и звездных систем, их структурой и эволюцией, проблемой их устойчивости.

Одним из больших разделов звездной астрономии является внегалактическая астрономия, занимающаяся исследованием свойств и распределений звездных систем – галактик, которые находятся за пределами нашей звездной системы (она тоже называется Галактикой, но пишется с прописной буквы).

В этих исследованиях используют как результаты наблюдений, так и теоретические законы, и выводы астрометрии, небесной механики и астрофизики.

5. Космогония – раздел астрономии, разрабатывающий проблемы происхождения и эволюции небесных тел и их систем, в частности проблему происхождения Солнечной системы. Правильное ее решение может иметь существенное значение для понимания современных геофизических и геологических процессов, происходящих в недрах Земли. Космогония занимается и проблемами звездообразования.

6. Космология – наиболее интенсивно развивающийся раздел астрономии. Ее задача состоит в изучении Вселенной как единого целого, в выявлении геометрической структуры Вселенной, ее эволюции и происхождении всех объектов, заполняющих ее. Наблюдательные основы космологии опираются на данные астрофизики и звездной астрономии, а теоретические – на наиболее общие законы физики: общую теорию относительности, физику элементарных частиц и электродинамику.

§ 3. Возникновение и развитие астрономии

Истоки астрономии теряются в глубине веков. Ее начатки возникли у всех цивилизованных народов древности. Первые астрономические сведения о смене времен года и периодичности солнечных и лунных затмений были известны еще более четырех тысячелетий назад в Древнем Китае, другой родиной первых астрономических знаний в ту же эпоху были страны Ближнего Востока и Египет.

Подобно другим наукам, астрономия развивалась в значительной мере благодаря запросам человеческой практики. Развитие астрономии было обусловлено потребностями сельскохозяйственного производства – необходимостью счета времени и правильно-

го предсказания начала соответствующих сезонов сельскохозяйственных работ, разливов рек и т.д. Прокладка караванных путей, военные походы, сезонные перемещения кочевых племен, мореплавание – все это побуждало искать способы ориентирования по Солнцу и звездам. Постепенно возрастающие требования к точности предсказания календарных сроков и определения местоположения на земной поверхности привели к созданию простейших угломерных астрономических инструментов.

В века, предшествующие началу нашей эры, вместе с развитием математики, прежде всего геометрии, получила развитие и астрономия. Наиболее существенные результаты в астрономии были получены древнегреческими астрономами. На базе геоцентрической системы мира ими были разработаны теории видимых движений планет, Луны и Солнца. Большой вклад в эту теорию был сделан Гиппархом (II в. до н.э.), а последняя, наиболее совершенная теория была создана Птолемеем (II в. н.э.).

В пору средневекового мракобесия в Европе науки пришли в полный упадок. В эти мрачные времена римская церковь придала учению Птолемея откровенно реакционную, теологическую окраску. Прогресс наук стал невозможен.

Лишь арабские и среднеазиатские астрономы в период, предшествующий эпохе Возрождения, смогли добиться значительных успехов. Прогрессировала техника астрономических наблюдений, предвычислялись и корректировались таблицы видимых планетных движений. Исключительных результатов добились среднеазиатские ученые Бируни (973–1048), Улугбек (1394–1449) и другие.

Рост точности наблюдений, накопление богатого наблюдательно-го материала о видимом движении планет поставили перед учеными сложнейшую задачу – ревизию теории движения планет, созданной Птолемеем, и построение новой теории. Развитию астрономии вместе с другими науками способствовало изменение социально-экономических условий в странах Европы. Развитие в недрах феодализма капиталистических производственных отношений создало условия для активизации научных исследований. Великие географические открытия, развитие мореплавания и торгового судоходства требовали форсированной разработки способов морской навигации, а значит, и астрономии. Надежная морская навигация была невозможна без точной теории движения планет, так как по их положению определяли координаты кораблей в открытом море.

Революционным был, опубликованный в 1543 г. многолетний труд выдающегося польского ученого Николая Коперника (1473–1543). Коперник отказался от птолемеевой геоцентрической системы мира и в основу своей теории положил гелиоцентрическую систему, поместив Солнце в центр мира. Этот смелый шаг имел значение, далеко выходящее за пределы астрономии и физики. Это был вызов церковному мировоззрению. Коперникова гелиоцентрическая теория активнейшим образом служила утверждению материалистического мировоззрения.

Гелиоцентрическая система мира Коперника явилась краеугольным камнем астрономии. Уже в самом начале XVII в. на ее основе Иоганн Кеплер (1571–1630), обрабатывая многолетние наблюдения планет, проведенные датским астрономом Тихо Браге (1546–1601), установил три закона планетных движений, имеющие не только кинематический, но и динамический характер. С открытием Исааком Ньютоном (1643–1727) аксиом динамики и закона тяготения динамическая астрономия (небесная механика) начала свое бурное развитие.

Небесная механика привлекла к себе внимание многих выдающихся математиков мира. Исключительный вклад в небесную механику внесли французские математики, в частности Лагранж (1736–1813) и Лаплас (1749–1827), заложившие основы современных теорий движения больших планет и Луны. Во второй половине XIX в. были созданы достаточно точные теории движения больших планет, а открытие Нептуна в 1846 г. на основе математических расчетов французского ученого У. Леверье (1811–1877) явилось торжеством небесной механики, утвердившей за ней славу одной из самых надежных наук.

Параллельно с небесной механикой быстрыми темпами развивалась и наблюдательная астрономия. Современные ее методы берут свое начало от Галилея (1564–1642), который первым использовал зрительную трубу в качестве телескопа (1610) и тем самым стимулировал как телескопостроение, так и создание астрономического приборостроения вообще. В первые же годы телескопических наблюдений, выполненных Галилеем и его современниками, удалось обнаружить много неизвестных ранее явлений. Открытие Галилеем спутников Юпитера служило убедительнейшим свидетельством в пользу гелиоцентрической системы Коперника. Земля

оказалась окончательно низведенной с ее «геоцентрического пьедестала». Изучение поверхности Луны, обнаружение фаз Венеры, разложение Млечного Пути на отдельные звезды – все это лишало Землю ореола уникальности и идеальности и ставило ее в один ряд с другими небесными телами.

Много ценных наблюдений было выполнено на грани XVIII и XIX вв. В это время благодаря совершенствованию телескопов резко возросла их разрешающая способность и улучшилось качество изображений. Астрономы, и прежде всего английский астроном В. Гершель (1738–1822), смогли проникнуть в глубь Вселенной и положить начало изучению звездного мира. Началось систематическое исследование распределения звезд в пространстве, были открыты и исследовались звездные скопления и туманности, кратные и переменные звезды.

Деятнадцатый век стал веком торжества небесной механики и физики небесных тел. В середине XIX в. астрономия взяла на свое вооружение фотографию и спектральный анализ. С этих пор зародилась астрофизика, и началось изучение физических процессов на небесных телах.

К началу второй четверти XX в. выяснилось, что звезды входят в состав грандиозной звездной системы – Галактики, а спиральные туманности представляют собой аналогичные звездные системы, находящиеся за пределами Галактики. Было обнаружено явление разбегания галактик, что указывало на расширение видимой части Вселенной – Метагалактики.

С течением времени астрономы не только совершенствовали приемники излучения небесных светил, но и подвергали анализу все новые и новые участки их спектров. В 30-х гг. XX в. благодаря применению кварцевой оптики стало возможным изучать ультрафиолетовое излучение небесных объектов, а в 40-х гг. XX в. исследование было распространено на радиодиапазон. Возник раздел астрофизики – радиоастрономия. Благодаря радиоастрономии были обнаружены новые необычные классы небесных тел – квазары, пульсары, специфическое микроволновое радиоизлучение, не связанное ни с одним известным небесным телом, приходящее на Землю со всех направлений, похожее на излучение абсолютно черного тела с температурой около 3 К и получившее название фонового реликтового излучения.

1957 г. открыл новый этап в развитии астрономии. Запуск в нашей стране первых искусственных спутников и последовавшее освоение межпланетного пространства с помощью космических аппаратов привели не просто к техническому перевооружению астрономии, но и к превращению ее из науки наблюдательной в науку экспериментальную. В наши дни астрономические инструменты вынесены за пределы земной атмосферы, и она более не препятствует исследованию излучения небесных светил во всех диапазонах спектра. С космических аппаратов были обнаружены новые типы небесных тел – рентгеновские и инфракрасные звезды, существенно исследованы быстрые заряженные частицы, приходящие из глубин Вселенной, – космические лучи.

Посадка космических аппаратов на Луну, доставка лунного грунта на Землю, первая высадка людей на Луну, посадка спускаемых аппаратов на поверхности Венеры и Марса, пролеты космических аппаратов вблизи Юпитера и Сатурна и их спутников – вот далеко не полный перечень тех космических экспериментов, осуществленных за последнее пол века в СССР и США, которые привели к революции в астрономических методах исследования Вселенной.

§ 4. Роль астрономии в формировании материалистического мировоззрения

Наряду с другими естественными науками астрономия на всем протяжении своей истории особенно активно способствовала развитию и укреплению материалистических воззрений на природу. Она дала большое количество фактов и строго научных выводов, опровергнувших наивные религиозные представления о строении и происхождении мира.

Изучение оптическими средствами нашей планетной системы и звездных систем дало ученым существенные аргументы против геоцентрических учений, против представления об исключительности и привилегированности нашей Земли и Солнечной системы, против религиозных противопоставлений Земли и Неба.

Достижения космонавтики в исследовании ближнего космоса и Земли как небесного тела, триумфальное расширение и углубление области астрономических исследований подтверждают с пол-

ной степенью достоверности реальность наших представлений о физической природе и процессах на Луне, Венере, Марсе и других телах Солнечной системы. Новые физико-химические данные, полученные с космических аппаратов, принесли убедительнейшие доказательства материальности и единства мира и универсальности его законов.

Следует, однако, заметить, что в ряде случаев при анализе астрономических наблюдений и построениях теоретических моделей требуется особая осторожность и надлежащая естественнонаучная и философская интерпретация результатов. Одним из примеров, подтверждающих это положение, может служить проблема «красного смещения». В спектрах галактик наблюдается смещение линий к красному концу, свидетельствующее о разбегании галактик. Этот эффект приводил некоторых астрономов к идее об акте творения и к отказу от концепции вечности Вселенной. Ошибочность таких выводов заключается в том, что законы, справедливые для ограниченной части пространства и времени, нельзя переносить на всю Вселенную. Это и формально-логически, и физически, и философски недопустимая экстраполяция. Здесь необходимо решение проблемы в рамках соответствующих космологических моделей мира. В разные эпохи в различных областях пространства метрические свойства четырехмерного многообразия «пространство – время» могут быть различны, и об этом нельзя забывать при глобальных естественнонаучных и философских выводах.

Астрономия всегда играла и продолжает играть важнейшую роль в формировании диалектико-материалистического мировоззрения, убедительно опровергая своими наблюдениями и строгими теоретическими выводами религиозно-идеалистические представления о Вселенной.

В противоположность религиозным учениям диалектический материализм указывает на непрерывное развитие всего существующего в природе как эволюционным, так и революционным путем. И действительно, астрономия обнаружила звезды различного возраста, пульсации звезд на определенной стадии их эволюционного развития, а также взрывные (революционные) процессы в звездах и галактиках, порождающие качественно новые состояния материи.

Вместе с этим астрономия существенным образом стимулировала своими открытиями и развитием прогресс самых различных отраслей физики и механики, а опосредствованным образом и математики.

В XX в. астрономия своими наблюдательными фактами способствовала утверждению новой физики – специальной и общей теории относительности, созданной усилиями замечательной плеяды ученых: Дж. Максвелла, Г. Лоренца, А. Пуанкаре и А. Эйнштейна. Первыми эмпирическими подтверждениями теории относительности послужили обнаруженные расхождения в движении перигелия Меркурия и искривление светового луча вблизи Солнца.

Развитие ядерной физики шло рука об руку с развитием астрофизики. Такие объекты, как Солнце и звезды, всегда представляли и представляют собой неповторимые пока в земных условиях физические лаборатории. Их изучение дает возможность проверить на практике правильность выводов новых физических теорий. Одним из первых примеров, иллюстрирующих сказанное, служит история открытия химического элемента гелия, сначала найденного на Солнце по спектроскопическим наблюдениям, а затем в земных лабораториях.

§ 5. Астрономические корни современного естествознания

История развития цивилизации свидетельствует о том, что мировоззрение людей каждой эпохи формируется благодаря их практической деятельности на земле и астрономическим наблюдениям. Скорее всего, именно наблюдение звездного неба привели к развитию способности мыслить. Действительно, объединение ярких звезд в геометрическую схему – **созвездие** и сопоставление этой схеме реального животного означает формирование образного мышления. Первые созвездия появились не позднее 12 тысяч лет том назад. В пользу этого говорит тот факт, что древние жители Сибири и Северной Америки семь ярких звезд Большой медведицы объединили в одну группу и дали ей схожие «медвежьи» названия. Такое совпадение могло произойти только в случае общения жителей Азии и Америки, когда еще не было Берингова

пролива, который образовался в 10-м тысячелетии до нашей эры. При дальнейшем развитии ум человека сам перешел к абстрактным образам и вопросам об устройстве мира и роли человека в нем.

Обобщение опыта использования геометрических схем на небосводе и живописных образов земных предметов привело к появлению письменности и искусства счета. Например, схематическое изображение созвездия Тельца γ () послужило прообразом звука «А» в языках племен индоевропейской группы.

Символ «0» ноль, который ввели древние индийцы в 3-м тысячелетии до н.э. Символизировал замкнутый путь всех предметов во Вселенной, подобно тому как замкнутые видимые пути небесных светил. Согласно мифологии индийцев, все предметы рождаются из вечной пустоты и исчезают в ней. Вселенная – это проявленная пустота. Ноль означает пустоту – начало и конец Вселенной. В записи десятичных дробей, открытых древними индийцами символ «0» использовался для обозначения пустого десятичного разряда.

На протяжении тысячелетий прикладная астрономия – составление календаря и суточный счет времени – определяла роль астрономии в обществе. Календари всех древних народов Двуречья, Китая, Египта, полуострова Юкатан, Сибири представляют собой прогноз смены фаз Луны, восходов и заходов светил и перечисления возможных стихийных бедствий, а также сельскохозяйственных работ, соответствующих временам года. Эти календари позднее называли астрологическими книгами.

Необходимость уточнения прогноза стимулировала развитие методов астрономических наблюдений: строительства специальных площадок на крышах храмов, создание угломерных инструментов, развитие арифметики и геометрии.

Введение 60-ричной системы счисления связано с наблюдениями за перемещением светил. Жрецы цивилизации шумеров в Двуречье (3 тыс. до н.э.) использовали верхнюю площадку пирамидального храма для астрономических наблюдений. Она находилась на высоте около 40 метров и имела форму квадрата со стороной 11,5 м. В этот квадрат вписывается окружность радиуса 5,7 м. Длина окружности равна примерно 36 м, и ее можно разделить на 360 частей, длина каждой части будет порядка средней ширины ладони человека 10 см. Каждую такую часть можно разделить на

60 долей, причем из центра окружности одна доля будет видна под углом в 1'. Этот угол равен средней разрешающей способности человеческого глаза. Таким образом, шумерские астрономы наблюдали за движением светил с точностью до одной угловой минуты. Они считали, что Солнце делает за год 360 шагов по кругу и каждый шаг равен двум видимым угловым диаметрам светила. Солнечный шаг стал прообразом градусной меры: слово «градус» на латинском языке означает «шаг». Считается, что Солнце «шагает» равномерно и рассчитывая эфемериды Солнце, шумерские жрецы открыли арифметическую прогрессию и правило пропорции. Понятие относительности движения появилось тоже в этих расчетах, так как жрецам пришлось ввести два перемещения Солнца. Одно – суточное – относительно Земли, второе – годовое – относительно звездного неба.

Искусство счета совершенствовали исторические наследники шумеров ассирийские и вавилонские жрецы. Они открыли дроби и геометрические прототипы тригонометрических функций (VIII–VII вв. до н.э.).

Египетские астрономы в своих построениях использовали дуги и ломаные. В конце концов, они открыли свойства равнобедренных треугольников и то, что диаметр делит окружность пополам (VII в. до н.э.).

Положительная практика применения астрологических прогнозов формировала представления о взаимосвязи земных и небесных явлений. Однако, авторы календарей еще не могли объяснить наглядно, почему происходит смена фаз Луны и затмения Солнца, почему жизнедеятельность растений, насекомых и других существ связана с циклом лунных фаз. Астрологический прогноз имел мистический характер, а его исполнение подтверждало мифологическую картину мира.

По-видимому, ощущение присутствия богов казалось столь реальным, что для описания происходящих событий допускался только возвышенный стихотворный стиль.

Стихи использовались в астрономических книгах, в юридических трактатах, в бытовой переписке. Астрология, возбуждая фантазию, способствовала развитию языка и поэзии. Интересно, что в началах юридического права шумеров в качестве символов справедливости, добра и мудрости были выбраны Солнце, Луна и звезды соответственно.

Накопление данных астрономических наблюдений и развитие геометрических методов их описания, в конце концов, позволило к середине 1-го тысячелетия до н.э. выделить сферическую симметрию как фундаментальное свойство космоса. Описывая эту симметрию. Жрецы сравнивали ее с красотой и гармонией.

Сферическая симметрия была с одной стороны, простым понятием, которое человек мог воспроизвести в предметах быта. С другой стороны, кажущаяся всеобщность симметрии подталкивала к мысли, что именно она и есть самое главное в загадочном замысле творца.

Пифагор (VI в. до н.э.) одним из первых принял симметрию или гармонию в качестве главного принципа мироустройства. На этом принципе базируется теория музыки Пифагора. В симметрии западной и восточной элонгации Утренней и Вечерней звезд древних греков Пифагор увидел доказательство того, что эти звезды есть одно светило – Венера. Ученик Пифагора Филолай предложил модель Космоса, в которой все подчинялось сферической симметрии: небесные тела и Земля есть шары, их движение сферически симметрично относительно центра – божественного огня.

Последователь пифагорийцев Парменид (V в. до н.э.) понял, что приняв постулат о гармонии, придется отказаться от произвольных ссылок на деятельность богов, так как все модели явлений должны быть непротиворечивыми. Если есть явления, которые можно объяснить естественными причинами, то и для всех таинственных и непонятных явлений надо искать естественное объяснение. Фактически Парменид перешел от мифологического мировоззрения к физическому, поэтому его называют первым физиком. Парменид ввел понятие тепловых поясов, используя геометрические условия прохождения Солнца через зенит.

Большинство древнегреческих мыслителей участвовало в создании гражданских кодексов полисов. Собственно этим ограничивалось прикладное значение их размышлений и наблюдений. Замечательно, что в каждом кодексе есть основной принцип гармонии: равенство граждан перед законом. Только этот принцип, по мысли философов, позволил бы достичь такого совершенства общественных отношений, которое было бы подобно совершенству звездного неба.

Попытки понять происхождение гармонии Вселенной привели к открытию закона единства и борьбы противоположностей (Гераклит Эфесский V в. до н.э.), гипотезы атомизма и детерминизма (Анаксагор, Эмпедокл, Демокрит V–IV вв. до н.э.). Платон считал, что законы симметрии определяют свойства Вселенной в большом и малом. Он пытался объяснить различие веществ тем, что их атомы обладают разными типами симметрии (платоновы тела). Аристотель (IV в. до н.э.) учил, что задача каждой науки состоит в обнаружении соответствующей гармонии природы. Гипотезу о сферичности Земли использовал Эратосфен в (III в. до н.э.), предложив методику определения ее размеров и измерив их.

В эпоху античности астрономия была одной из самых популярных наук. В среде образованных людей обсуждались модели космоса и философские принципы устройства Вселенной. На площадях греческих городов устанавливались солнечные часы, имевшие также и художественную ценность. По приказу Александра Македонского придворный поэт Арат написал поэму «Явления» о созвездиях и планетах (III в. до н.э.).

Астрономия перестала быть таинственной наукой жрецов, ее изучают все, кто учился в академиях Платона и Аристотеля. В результате изменилось мировоззрение греков: сфера деятельности богов была отодвинута далеко от Земли. Согласно Аристотелю, существует «подлунный мир», который следует объяснять физическими причинами, и есть совершенный мир – космос, где царит гармония и обитают боги. Причем наблюдаемые планеты уже не символизировали богов. Аристотель поставил задачу объяснения движения планет физическими причинами.

Общим для всех древних цивилизаций – поиск гармонии мира через астрономические наблюдения, поэтому не удивительно, что изучению астрономии придавали огромное значение, и в Древней Греции ее приравнивали к одному из видов искусств и персональная богиня Урания покровительствовала ей.

Закат античной науки начался во II–III вв. н.э., и был обусловлен тем, что научные открытия имели значения только для образованной части общества и никак не изменяли производительных сил. Жизнь свободных граждан обеспечивали рабы, которых добывали в войнах. Римской империи нужна была только военная наука, а не рассуждения об устройстве Вселенной.

В эпоху становления христианства (V–VII вв.) население Западной Европы было занято междоусобными и религиозными войнами. Ни астрономией, ни другими науками никто не занимался. В монастырях монахов обучали только арифметики и латинскому языку. Календарный счет дней практически не согласовывался с данными астрономических наблюдений.

Первые признаки возрождения появились при императоре франков Карле Великом. В 782 г. он создал придворное общество ученых монахов – знатоков сочинений древних авторов. По инициативе этого общества при монастырях открыли школы, в которых обязательными предметами были арифметика. Латинский язык и астрономия.

В IX в. на латинский язык был переведен астрологический трактат величайшего античного астронома Клавдия Птолемея «Тетрабиблос». Интерес к астрологии сыграл историческую роль – он привел к возрождению интереса к исследованиям в области астрономии, медицины, химии, физики и геометрии. В XII–XIII вв. в европейских монастырях и университетах начали переводить и изучать труды Евклида, Архимеда, Аристотеля, Гиппарха, Птолемея. Первая астрономическая обсерватория в Европе была построена в XIII в. при короле Кастилии Альфонсе Мудром.

Развите методов схоластики за десять веков средневековья привело к формированию логики как метода теоретического осмысления опыта. Среди ученых монахов популярными методами доказательства становились мысленные эксперименты, а не ссылки на канонизированные труды Аристотеля. Однако при расчете эфемерид небесных светил ни схоластика, ни мысленные эксперименты не нужны, но необходимы прямые астрономические наблюдения и опыт использования математики. Именно астрономия способствовала возрождению экспериментальных исследований в самых разных областях науки.

В XIV в. астрономию включили в число предметов факультета свободных искусств университетов. Этот факультет был обязательным во всех университетах.

Астрономия сыграла фундаментальную роль в научной деятельности основоположников современной науки. Николай Коперник, предлагая гелиоцентрическую модель планетной системы в XVI в., руководствовался фактически необходимостью улуч-

шения календаря. С современной точки зрения значение его книги «О вращении небесных сфер» состоит в том, что, во-первых, в ней продемонстрировано как можно существенно упростить математические расчеты, изменив систему отсчета. Во-вторых, в его рассуждениях о вращении Земли содержатся интуитивные представления о законе инерции и законе сохранения импульса. Наконец, в-третьих, Коперник полагал, что свойства притягивать тела характерно не только для Земли, но и для других небесных светил. Вера Коперника в постулат о сферической симметрии космоса помешала ему ввести эллиптические орбиты для планет, хотя в его черновиках есть рисунки с такими орбитами.

Заметим, что исторический вклад Коперника в науку не ограничен только астрономией. Он первый описал важнейшее явление экономики общества, которое теперь мы называем инфляцией.

Во второй половине XVI в. работал знаменитый астроном Тихо Браге. Он стал основоположником прецизионных астрономических наблюдений.

Обработка многолетних рядов наблюдений Браге за перемещением Солнца и Марса позволила Иоганну Кеплеру открыть три закона движения планет в начале XVII в. Вся научная деятельность Кеплера была освящена верой в гармонию мира. В своих расчетах и моделях он использовал симметрию сферы и правильных многогранников. Его методы анализа строения снежинок стали предтечей современных методов симметрии, используемых в физике и химии. Кеплер развил идеи Архимеда о вычислении площадей фигур с помощью заполнения их правильными многогранниками. Фактически он уже умел вычислять простейшие интегралы, которые позднее открыл Ньютон и Лейбниц. Очень важен вклад Кеплера в анализ свойств инерции. До него, следуя Аристотелю, считали, что инерционным или бессильным движением обладают только небесные тела, свободно парящие в эфире. Казалось очевидным, что это движение есть равномерное движение по окружности, поскольку таково видимое перемещение планет. Этого же представления придерживался современник Кеплера Галилео Галилей. Галилей определял свойство инерции как способность сохранять состояние равномерного движения. Кеплер первый понял, что инерционное движение – это равномерное движение по прямой. Он утверждал, что движение планет по эллипсам связа-

но с силовым воздействием на них Солнца. Пытаясь понять как осуществляется это воздействие, Кеплер открыл закон изменения освещенности при удалении от источника света. Он использовал свойство сферической симметрии пространства. В этом случае освещенность пропорциональна плотности лучей света, которые пересекают сферу, окружающую источник. Полное число лучей сохраняется, поэтому их плотность обратно пропорциональна квадрату радиуса сферы. Кеплер экспериментально проверил открытый им закон.

Обдумывая свойства инерционного движения и закон для освещенности, Кеплер сформулировал проблему, которую теперь называют фотометрическим парадоксом. Замечательно то, что решение проблемы, предложенное Кеплером, фактически, совпадает с принятым сегодня: фотометрического парадокса нет, если число звезд в единице объема бесконечной Вселенной невелико.

Роль астрономии в научной деятельности Исаака Ньютона огромна. Его труд «Начала натуральной философии» (1687) посвящен объяснению трех законов Кеплера с помощью закона тяготения. Знаменитые теперь три закона динамики Ньютон сформулировал в виде лемм в водной части «Начал». Можно сказать, что астрономические наблюдения Тихо Браге оказались тем фундаментом, на котором была построена теория тяготения.

Математический аппарат дифференцирования и интегрирования был открыт Ньютоном в процессе исследования свойств оптических линз и зеркал для телескопов.

Восемнадцатый век вошел в историю как эпоха становления ньютоновской картины мира. В начале века вышла в свет книга Ньютона «Оптика». В конце века П. С. Лаплас опубликовал свою книгу «Изложение системы мира», благодаря которой гипотеза Ньютона о тяготении превратилась в закон природы. Этот закон был признан не только физиками и математиками, но стал известен всем образованным людям того времени.

В XVIII в. быстро развивалась техника изготовления телескопов. Небольшие телескопы уже не были очень дорогими и астрономическими наблюдениями занимались не только профессионалы, но и философы, поэты, врачи. В результате было сделано много конкретных астрономических открытий (собственные движения звезд, галактики, абберация, Уран, шапки на полюсах Мар-

са, звездные скопления). Эти открытия требовали объяснения, стимулируя развитие физики, химии и математики. Именно в это время, благодаря работам по небесной механике Эйлера, Клеро, Д'Аламбера, Лагранжа и Лапласа, создаются основы современной теоретической физики.

Бурное развитие экспериментальной физики в XIX в. привело к открытию эффекта Доплера, фотографии, спектрального анализа, законов электромагнетизма. Эти открытия перевели астрономию на астрофизические «рельсы». Высокоточные астрономические наблюдения, требовавшие строгой математической обработки подвели вплотную Тихо Браге и Иогана Кеплера к идеям теории вероятности, которая только только начала зарождаться в их эпоху. Но уже в середине XIX в., разработанная, известным астрономом Дж. Гершелем теория ошибок измерений и доказательство им закона распределения случайных ошибок измерений не была оставлена без внимания Максвеллом и, по-видимому, послужило ему при открытии своего закона распределения частиц по скоростям – фундаментального закона статистической физики.

К началу XX в. физическая картина мира казалась почти завершенной. Окрыленное успехами XVIII–XIX вв. сообщество ученых верило, что в бесконечной Вселенной происходят процессы, подчиняющиеся уже известным физическим законам. Задача науки – это решение прикладных проблем. Правда, эту спокойную картину нарушали «небольшие» астрономические проблемы: объяснение спектров звезд, проблема трех тел, строение и энергетика Солнца, ненаблюдаемость светоносного эфира, фотометрический и гравитационный парадоксы, парадокс «тепловой смерти Вселенной».

История науки XX в. повторила сюжет эпохи Возрождения. Именно попытки решения этих астрономических проблем изменили фундаментальную основу всех наук. В результате появились теория относительности, квантовая механика и теория динамического хаоса, открыты нестационарность Вселенной и ядерные источники энергии, сформулирован антропный принцип, началось освоение человеком ближнего космоса.

Сейчас в конце XX в. фундаментальным понятием физики и математики является понятие симметрии. Для описания физических полей используют фазовые множества, которые обладают

симметрией сферы или тора. Сами эти множества ненаблюдаемы, зато, согласно теореме Нетер, наблюдаются следствия их симметрий в виде различных законов сохранения (энергии, импульса, момента импульса, заряда). По-видимому, вращательная симметрия, впервые замеченная древними астрономами, определяет структуру Вселенной на всех масштабах – от элементарных частиц до звезд и скоплений галактик.

Итак, опыт развития мировоззрения свидетельствует о том, что поступательное развитие цивилизации определяют астрономические исследования. Этот вывод становится очевидным, если вспомнить, что все формы жизни, в том числе и разумной, взаимосвязаны друг с другом, с планетой, на которой они появились, со звездой, которая обогревает планету, наконец, со всей Вселенной, эволюция которой привела к рождению звезд и нас с вами, изучающих эту Вселенную.

Из приведенного краткого исторического анализа видно, что большинство существующих фундаментальных физических теорий, математика, химия, география в значительной степени определялись развитием астрономии. Поэтому, чтобы понять их в полной мере необходимо знать астрономию.

§ 6. Народнохозяйственное значение астрономии

Огромно значение астрономии в развитии фундаментальных наук – физики, математики, механики. Многие разделы астрономии играют важную роль в развитии народного хозяйства. Это прежде всего относится к геодезической службе, на которой основана картография. В своих математических методах она опирается на сферическую астрономию, а в методах определения географических координат – на практическую астрономию. Астрономическое инструментоведение сыграло основную роль в создании точных геодезических измерительных инструментов. Без астрономической службы времени невозможно определение географической долготы, а, следовательно, и построение географических и топографических карт, которые имеют важное народнохозяйственное значение.

Определение потенциала гравитационного поля Земли астрономическими методами, например, по движению искусственных

спутников Земли, имеет существенное значение не только для геодезии, но и для геологической разведки полезных ископаемых.

Большое значение для нужд народного хозяйства имеет астрономическая служба времени. Хотя сейчас используются атомные стандарты времени, тем не менее, астрономическая служба времени не потеряла своего значения. Астрономия следит и за соответствием календаря явлениям, связанным с обращением Земли вокруг Солнца.

Астрономические методы используются в глобальных навигационных системах ГЛОНАС и GPS. Проблемы навигации в космических полетах также решаются с помощью астрономии.

В наши дни астрономия своими достижениями существенным образом помогает решению многих проблем космонавтики, которые ориентированы на активную помощь народному хозяйству. Оптимальный выбор и точный расчет орбит искусственных спутников выполняется методами небесной механики. При физических исследованиях больших регионов земной поверхности и акваторий океанов используются астрофизические инструменты и методы. Таким образом, астрономия совместно с космонавтикой участвует в разведке полезных ископаемых, в охране природы, в рациональной организации сельскохозяйственного производства и многих иных мероприятиях народнохозяйственного значения. Широкое проникновение человека в космическое пространство поставило перед наукой важную задачу – обеспечение радиационной безопасности космонавтов и научной аппаратуры в открытом космосе. Эта опасность в первую очередь исходит от космических лучей, жесткого ультрафиолетового и рентгеновского излучения, которые резко усиливаются во время вспышек на Солнце. В связи с этим огромное значение приобрели астрофизические исследования процессов, происходящих на Солнце и в межпланетном пространстве. Построение теории солнечной активности и на ее основе составление прогнозов вспышечной активности Солнца позволят значительно увеличить безопасность космических полетов. Такой прогноз позволит заранее предвидеть наступление магнитных бурь, прерывание радиосвязи и других процессов на Земле, нарушающих нормальный ритм хозяйственной деятельности людей.

РАЗДЕЛ 1. СФЕРИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

Глава I. Видимые положения небесных светил

§ 7. Звездное небо и созвездия

В любой местности Земли наблюдатель видит над собой небо в форме сферической поверхности (небесный свод). Днем в безоблачную погоду цвет неба голубой, так как молекулы земной атмосферы, освещаемой Солнцем, рассеивают преимущественно голубые лучи. Яркий голубой фон дневного неба не позволяет видеть звезды. Ночью, когда солнечное освещение отсутствует, на небе видно множество звезд. Создается впечатление, что Земля окружена огромной сферой, на внутренней поверхности которой расположены небесные светила, а в центре находится наблюдатель, видящий только половину сферы; вторая ее половина скрыта земной поверхностью. В действительности никакой материальной сферы, окружающей Землю, в природе не существует. Небесные тела движутся в беспредельном мировом пространстве на самых различных расстояниях от Земли. Эти расстояния столь невообразимо велики, что наше зрение не в состоянии их оценить; невольно все небесные светила представляются нам одинаково удаленными, то есть находящимися на внутренней поверхности воображаемой сферы.

Из-за колоссальных расстояний звезд от Земли их взаимные расположения на небе кажутся неизменными на протяжении тысячелетий, и поэтому древние народы, жившие 3–4 тыс. лет назад, видели звездное небо почти таким же, каким оно выглядит в наше время. Народы древних культурных государств изучали звездное небо с целью разработки систем счета времени, предсказания наступлений сезонов года и ориентировки при дальних передвижениях. Они изучали расположение на небе только ярких, четко выделяющихся звезд (которых на небе не так уж много), объединяя их в группы, или фигуры, хорошо запоминающиеся

своими контурами. Такие фигуры из ярких звезд именовались *созвездиями*, то есть сочетаниями звезд. Позже к ним причислили и более слабые звезды. Созвездия получали названия, заимствованные из мифов о богах, сказаний о легендарных героях, а также из производственно-бытового обихода. Так, группу из семи ярких звезд, имеющую очертание ковша, древние греки назвали созвездием Большой Медведицы. В Древней Руси это же созвездие имело разные названия – Воз, Колесница, Кастрюля, Ковш, в Сибири оно называлось Лосем, а древние казахи объединяли его со звездами Малой Медведицы и называли Конем (рис. 1).

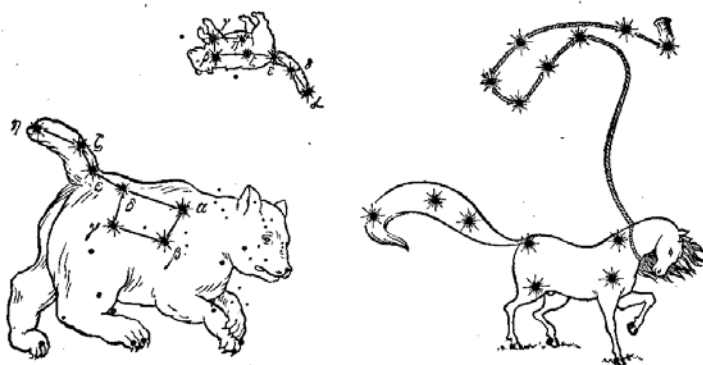


Рис. 1. Созвездия Большой Медведицы и Малой Медведицы у древних греков и древних казахов (справа)

В III в. до н.э. греческие астрономы свели названия созвездий в единую систему, которую впоследствии заимствовала европейская наука. Поэтому все яркие созвездия сохранили греческие названия: созвездия Большой Медведицы, Малой Медведицы, Цефея, Кассиопеи, Андромеды, Персея, Ориона и другие. В конце XVII в. были выделены на небе малозаметные созвездия из слабых звезд: созвездия Лисички, Ящерицы, Жирафа, Голубя и другие, а в XVIII в. на небе южного полушария Земли образованы созвездия с техническими названиями: Телескоп, Микроскоп, Печь, Насос и другие.

В настоящее время созвездиями считаются участки звездного неба. Современные границы и названия созвездий утверждены в 1922 г. на I съезде Международного астрономического союза, соз-

данного в 1919 г. Все небо разделено на 88 созвездий, из которых с территории СССР можно видеть 54.

Многие звезды созвездий имеют обозначения. В древности звездам давались собственные имена; некоторые из них, главным образом греческие и арабские, дошли до наших дней, но используются только для наиболее ярких звезд: Кастор и Поллукс (в созвездии Близнецов), Сириус (в созвездии Большого Пса), Вега (в созвездии Лиры) и другие. С 1603 г. с появлением звездного атласа «Уранометрия» немецкого астронома И. Байера (1572–1625), звезды в пределах каждого созвездия обозначаются последовательными буквами греческого алфавита, как правило, либо в порядке уменьшения блеска звезд, либо по контуру фигуры созвездия, хотя имеются и исключения. Так, например, в созвездии Близнецов звезда α (Кастор) слабее звезды β (Поллукс), в созвездии Пегаса наиболее яркая звезда обозначена буквой ϵ , а звезда α (Маркаб) – лишь третья по блеску, в созвездии Дракона звезда α (Тубан) занимает по блеску лишь восьмое место. Существует и цифровая нумерация звезд в созвездиях, но она сейчас используется только для слабых звезд.

Блеск звезд измеряется звездными величинами: чем больше блеск звезды, тем меньше ее звездная величина. Самым ярким звездам приписана нулевая звездная величина (0^m), а слабым звездам, на пределе видимости невооруженным глазом, – шестая звездная величина (6^m). В оптические инструменты видны звезды еще меньшего блеска, звездная величина которых более 6^m . Звезды каждой последующей звездной величины слабее звезд предыдущей звездной величины примерно в 2,5 раза. Современная астрономия, используя фотометры, определяет блеск звезд с точностью до $0^m,01$. Так, по приближенным оценкам, шесть ярких звезд (α , β , γ , δ , ζ , η и ϵ) Большой Медведицы считаются звездами 2^m , а точные измерения дают: $1,77^m(\epsilon)$, $1,79^m(\alpha)$, $1,86^m(\eta)$, $2,06^m(\zeta)$, $2^m,37(\beta)$ и $2^m,44(\gamma)$.

Обозначения и блеск звезд заносятся в специальные списки звезд (звездные каталоги) и отмечаются на звездных картах. Невооруженный глаз может видеть на всем небе около пяти с половиной тысяч звезд, среди которых наиболее ярких только 24. С территории России видно около 3000 звезд (до 6^m), в том числе 15 наиболее ярких.

§ 8. Небесная сфера

Для решения многих задач астрономии расстояния до небесных тел не играют роли, а имеет значение лишь их видимое расположение на небе. Кажущаяся сферическая поверхность неба используется как математическое построение для определения видимых положений небесных тел и называется *небесной сферой*.

Небесная сфера – это воображаемая сферическая поверхность произвольного радиуса, в центре которой находится наблюдатель. Небесные тела проецируются на небесную сферу.

Центр небесной сферы можно поместить в произвольной точке пространства, и тогда положения небесных светил на ее поверхности определяются направлениями из центра, параллельными тем направлениям, по которым видны эти светила наблюдателю.

Чтобы правильно представлять себе наблюдаемые астрономические явления, лучше всего полагать радиус R небесной сферы сколь угодно большим, больше расстояния самого удаленного небесного светила.

Из-за малых размеров Земли в сравнении с расстояниями до звезд (с принятым радиусом небесной сферы) наблюдателей, расположенных в разных местах земной поверхности, можно считать находящимися в центре небесной сферы, что позволяет сформулировать *особое свойство* небесной сферы: одна и та же точка небесной сферы (одна и та же звезда) видна из разных мест земной поверхности по параллельным направлениям.

Небесная сфера обладает всеми свойствами сферы, известными из стереометрии. Перечислим те из них, которые понадобятся в дальнейшем; при этом следует иметь в виду, что в астрономии круги отождествляются с окружностями (рис. 2).

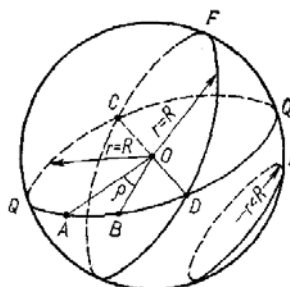


Рис. 2. Небесная сфера

1. Плоскость, проходящая через центр сферы, делит ее на две равные полусферы (полушария) и пересекает поверхность сферы по большому кругу, радиус которого равен радиусу сферы (O – центр сферы; R – радиус сферы; $PDGC$ и $QDQ'C$ – большие круги, их радиусы $r = R$).

2. Два больших круга всегда пересекаются в двух диаметрально противоположных точках, так как плоскости этих кругов пересекаются по диаметру сферы (COO – диаметр сферы, C и D – точки пересечения больших кругов $PDGC$ и $QDQ'C$).

3. Через две точки поверхности сферы, не лежащие на одном диаметре, можно провести только один большой круг, так как третьей точкой положения его плоскости является центр сферы (большой круг QQ' проведен через точки A и B).

4. Через две диаметрально противоположные точки сферы можно провести бесчисленное множество больших кругов (точки C и D).

5. Плоскости, пересекающие сферу вне ее центра, образуют на ее поверхности малые круги, радиусы которых меньше радиуса сферы (малый круг KL , его радиус $r < R$).

Все измерения на небесной сфере проводятся только в угловых или дуговых единицах – градусах, минутах и секундах дуги. Наблюдатель, находящийся в центре небесной сферы, может измерить лишь углы между направлениями. Так, расстояние между точками A и B небесной сферы (см. рис. 2), изображаемое на ней дугой AB , измеряется центральным углом ρ между направлениями на эти точки. Поэтому на чертежах небесной сферы центральные углы часто не изображаются, а заменяются соответствующими им дугами больших кругов. Дуги больших кругов являются наикратчайшими расстояниями между точками небесной сферы.

Чтобы получить представление об угловых расстояниях на небесной сфере, полезно запомнить, что видимые диаметры Солнца и полной Луны близки к $0^\circ,5$.

§ 9. Основные элементы небесной сферы и ее суточное вращение

На чертежах небесной сферы обычно дается ее вид извне, в то время как в действительности наблюдатель находится в ее центре, из которого и следует представлять себе все построения на ее поверхности.

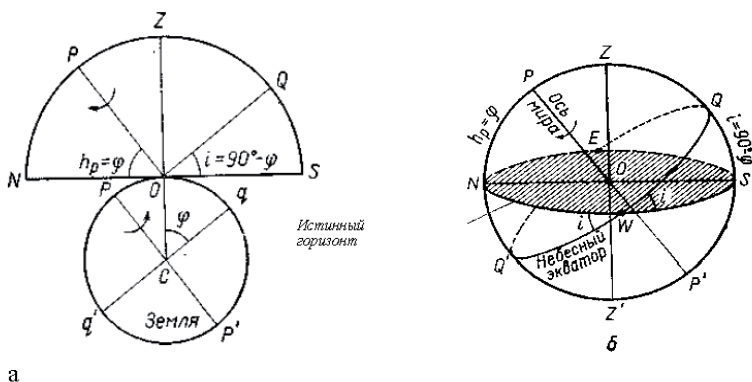


Рис. 3. Элементы небесной сферы

На рис. 3 слева изображена Земля и половина небесной сферы, видимая из некоторой точки O земной поверхности северного полушария Земли, а справа – вся небесная сфера, центром которой является эта точка O (наблюдатель). Во многих задачах астрономии можно принимать Землю за шар, не учитывая ее небольшого сжатия. Тогда в любом месте O земной поверхности (см. рис. 3, а) направление *отвесной* (или вертикальной) линии COZ совпадает с направлением земного радиуса CO в этом месте. Отвесная линия ZOZ' (см. рис. 3, б) пересекает небесную сферу в двух диаметрально противоположных точках, называемых *зенитом* (Z) и *надиром* (Z'). Зенит находится точно над головой наблюдателя, а надир скрыт земной поверхностью.

Большой круг $MESW$ небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна отвесной линии, называется *истинным (математическим) горизонтом*. Истинный горизонт делит небесную сферу на две полусферы, одна из которых доступна наблюдениям (вершиной ее является зенит Z), а другая не видна (в вершине этой полусферы лежит надир Z'). Истинный горизонт нельзя отождествлять с *видимым горизонтом*, так как первый находится на небесной сфере, а второй лежит на земной поверхности, его вид зависит от рельефа местности и его точки могут располагаться как ниже, так и выше истинного горизонта. В моменты своего восхода и захода светила считаются находящимися на истинном горизонте.

Особое свойство небесной сферы позволяет считать плоскость истинного горизонта NS касательной к земной поверхности в месте наблюдения O (см. рис. 3, а).

Наблюдения звездного неба показывают, что небесная сфера медленно вращается в направлении с востока к западу. Для наблюдателя, обращенного лицом к югу, это вращение происходит слева направо, по вращению часовой стрелки. Созвездия поднимаются над горизонтом в восточной стороне неба и опускаются к горизонту в западной стороне. В действительности же вращается Земля вокруг своей оси в направлении с запада к востоку, чему имеются строгие доказательства (маятник Фуко, отклонение падающих тел к востоку и другие.). Кажущееся вращение небесной сферы служит примером того, как в астрономии постоянно приходится отличать видимое от истинного и по видимым явлениям, используя те или иные доказательства, находить их истинную причину.

Хотя в действительности вращается Земля, тем не менее, в астрономии сохранена терминология для видимых явлений: восход и заход небесных светил, суточное движение Солнца и Луны, вращение звездного неба и других явлений.

Видимое вращение небесной сферы называется *суточным вращением*, так как его период равен одним суткам (в дальнейшем это понятие будет уточнено). Это вращение происходит вокруг земной оси (pp' на рис. 3, а), но в силу особого свойства небесной сферы представляется совершающимся вокруг ее диаметра (PP' на рис. 3, б), параллельного земной оси и называемого *осью мира*. Ось мира пересекается с небесной сферой в двух диаметрально противоположных точках – северном полюсе мира (P) и южном полюсе мира (P'). Оба полюса мира представляют собой точки небесной сферы, в которых с ней пересекается продолженная в обе стороны ось вращения Земли, и поэтому не участвуют в суточном вращении, оставаясь неподвижными. В северном полушарии Земли над горизонтом расположен *северный полюс мира* и на расстоянии около 1° (точнее, $52'$) от него находится яркая звезда α Малой Медведицы ($2^m, 14$), которая именно поэтому называется Полярной звездой. *Южный полюс мира* расположен над горизонтом местностей южного полушария Земли, находится в созвездии Октанта, и вблизи него нет ярких звезд.

Большой круг (QQ') небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется *небесным экватором*. Он делит небесную сферу на два небесных полушария – северное с вершиной в северном полюсе мира (P) и южное, вершиной которого является южный полюс мира (P'). Небесный экватор проходит по созвездиям Рыб, Кита, Ориона, Единорога, Гидры, Секстана, Девы, Змееносца, Змеи, Орла и Водолея.

Согласно свойству больших кругов небесный экватор пересекается с истинным горизонтом в двух диаметрально противоположных точках, называемых *точками востока* (E) и *запада* (W). Небесный экватор вращается вместе с небесной сферой. На рис. 3 направление вращения небесной сферы показано стрелками около оси мира. Стрелка около земной оси (pp') показывает направление вращения Земли, Зенит, надир и все точки истинного горизонта неподвижны относительно наблюдателя, то есть не вращаются вместе с небесной сферой.

Большой круг ($PZSP'Z'N$) небесной сферы, проходящий через полюсы мира, зенит и надир, называется *небесным меридианом*, он пересекается с истинным горизонтом в *точках юга* (S) и *севера* (N), отстоящих от точек востока (E) и запада (W) ровно на 90° . Точка севера расположена ближе к северному полюсу мира, а точка юга – ближе к южному полюсу мира. Отвесная линия и ось мира лежат в плоскости небесного меридиана, которая пересекается с плоскостью истинного горизонта по диаметру (NOS) небесной сферы, проходящему через точки севера и юга. Этот диаметр назван полуденной линией, так как Солнце в полдень бывает вблизи небесного меридиана.

Небесный меридиан делит небесную сферу на восточную и западную полусферы. Сам небесный меридиан делится зенитом и надиром на южную сторону (полукруг ZSZ'), проходящую через точку юга, и северную сторону (полукруг ZNZ'), проходящую через точку севера. Полюсы же мира делят небесный меридиан на южную половину (полукруг $PZSP'$) и северную половину (полукруг $PZS'P'$). Легко видеть (см. рис. 3), что небесный меридиан ($PZSP'$) образован плоскостью земного (географического) меридиана ($pOqp'$), на котором находится наблюдатель, и поэтому не участвует в суточном вращении небесной сферы. Для всех наблюдателей, расположенных на одном географическом меридиане, небесный меридиан тоже общий.

В суточном вращении небесной сферы вокруг оси мира небесные светила движутся по малым кругам (ab , cd , ef , gh) – суточным, или небесным, параллелям, плоскости которых параллельны плоскости небесного экватора (рис. 4).

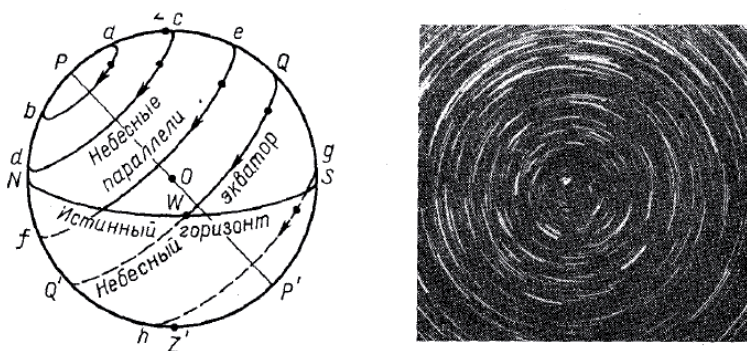


Рис. 4. Суточный путь светил и фотография северной полярной области неба, полученная неподвижной камерой (справа)

§ 10. Теорема о высоте полюса мира

Угловое расстояние полюса мира от истинного горизонта называется высотой полюса мира. На рис. 3 высота северного полюса мира (P) показана углом h_p , или, что одно и то же, дугой $NP = h_p$. Легко видеть, что $h_p = \angle qCO$, являющемуся географической широтой φ наблюдателя (O), отсчитываемой от земного экватора (qq'). Отсюда следует теорема о высоте полюса мира: *в каждом месте земной поверхности высота полюса мира равна географической широте этого места:*

$$h_p = \varphi \quad (1.1)$$

Тогда наклон небесного экватора к истинному горизонту равен

$$i = 90^\circ - \varphi. \quad (1.2)$$

Под этим же углом к плоскости истинного горизонта наклонены плоскости небесных параллелей.

Теорема о высоте полюса мира служит основой для определения географической широты мест земной поверхности (см. § 18), но непосредственно ее использовать нельзя, так как полюсы мира на небе ничем не отмечены.

§ 11. Горизонтальная система координат

Видимое положение светил и любых точек небесной сферы определяется двумя сферическими координатами. В астрономии используется несколько систем небесных сферических координат, каждая из которых имеет свое применение в решении определенных задач. На небесной сфере выбирается большой круг, принимаемый за основной круг системы координат. Две диаметрально противоположные точки небесной сферы, удаленные от основного круга ровно на 90° , называются *полюсами системы координат*.

Измерять положения небесных светил можно только в том случае, если они находятся над истинным горизонтом (*SWNE*), который принят за основной круг горизонтальной системы координат (рис. 5). Полюсами этой системы служат зенит (*Z*) и надир (*Z'*), через которые проводятся большие полуокружности, называемые *кругами высоты* или *вертикалами* (например, круг высоты *ZMnZ'*). Следует обратить внимание на терминологию: кругом высоты называется не полный большой круг, а только его половина от зенита до надира, так что один такой большой круг содержит два диаметрально противоположных круга высоты.

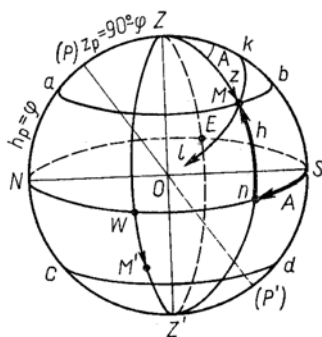


Рис. 5. Горизонтальная система координат

Южная сторона небесного меридиана (ZSZ') является начальным вертикалом, а круги высоты ZEZ' и ZWZ' , проходящие через точки востока (E) и запада (W), имеют общее название *первого вертикала*. Малые круги (ab , cd), параллельные плоскости истинного горизонта, называются *кругами равной высоты* или *альмукантарами* (от арабского «кантара» – изгибать сводом). Сетка горизонтальной системы координат неподвижна, то есть не принимает участия во вращении небесной сферы.

На рис. 5 кроме сетки горизонтальной системы координат показаны северный (P) и южный (P') полюсы мира, а также ось мира (PP'), чтобы напомнить о вращении небесной сферы вокруг этой оси и чтобы полюсы мира не отождествлялись с полюсами горизонтальной системы координат – зенитом и надиром.

Положение небесного светила M определяется двумя горизонтальными координатами – *азимут* A и *высотой* h . Высотой называется угловое расстояние от истинного горизонта, измеряемое по кругу высоты ($h = nM$). Над истинным горизонтом высота $h > 0$ и имеет пределы от $h = 0^\circ$ (истинный горизонт) до $h = +90^\circ$ (зенит). Под истинным горизонтом высота $h < 0$ (например, $h = WM$) и ее наименьшее значение $h = -90^\circ$ (надир).

В практике наблюдений проще измерять не высоту h , а *зенитное расстояние* $r = ZM$, то есть угловое расстояние от зенита.

Очевидно, что

$$z = 90^\circ - h \quad (1.3)$$

всегда положительно и измеряется в пределах от $z = 0^\circ$ (зенит) до $z = 180^\circ$ (надир). У северного полюса мира $z_p = 90^\circ - \varphi$, так как $h_p = \varphi$.

Азимут A представляет собой угол при зените между вертикалом и южной стороной небесного меридиана, измеряется дугой ($A = Sn$) истинного горизонта от точки юга (S) до вертикала и отсчитывается в западном направлении в пределах от 0° до 360° . Иногда азимут отсчитывается в обе стороны от точки юга; в западном направлении он считается положительным (от 0 до $+180^\circ$), а в восточном – отрицательным (от 0 до -180°). Азимут и зенитное расстояние небесных светил непосредственно измеряются угловыми инструментами.

В суточном вращении небесной сферы светила перемещаются по небесным параллелям (например, по параллели kMI), и поэтому на протяжении суток обе горизонтальные координаты светил непрерывно изменяются, принимая в различные моменты времени строго определенные значения. Это позволяет заранее вычислять условия видимости небесных светил в заданные моменты времени. Но для составления звездных карт и каталогов небесных объектов горизонтальная система координат непригодна; для этого требуется такая система, в которой вращение небесной сферы не влияло бы на значения обеих координат светил.

§ 12. Экваториальная система координат

Для неизменности сферических координат необходимо, чтобы координатная сетка вращалась вместе с небесной сферой. Поэтому она основана на небесном экваторе (QQ') и называется *экваториальной системой координат* (рис. 6).

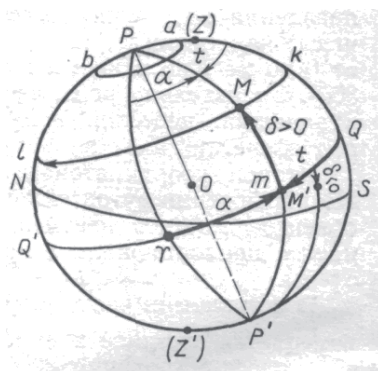


Рис. 6. Экваториальная система координат

Полюсами этой системы являются *северный* (P) и *южный* (P') *полюсы мира* и через них проведены большие полуокружности ($P\gamma P'$, $PMtP'$), называемые *кругами склонения* (реже – *часовыми кругами*), а параллельно плоскости небесного экватора проводятся *небесные параллели* ($ab, kl, \dots$). Положение светила (M) на небесной сфере определяется двумя экваториальными координатами –

прямым восхождением α и склонением δ . Прямое восхождение ($\alpha = \mathcal{V}m$) отсчитывается по небесному экватору (QQ') от той его точки, в которой Солнце пересекает его весной, обычно 21 марта (подробности в § 20). Эта точка называется точкой весеннего равноденствия и обозначается особым знаком Υ . Прямым восхождением называется угловое расстояние круга склонения от точки весеннего равноденствия; оно всегда положительно, отсчитывается только в одном направлении с запада к востоку, то есть против суточного вращения небесной сферы (указанного на небесной параллели kl стрелкой), и измеряется в пределах от 0 до 360° , а чаще всего в единицах, имеющих наименование единиц времени (час – ч, минута – м и секунда – с), от 0 до 24^h , что вполне допустимо, так как небесный экватор вращается равномерно вместе с небесной сферой. При пересчете угловых единиц в единицы времени используются соотношения: $24^h = 360^\circ$, $1^h = 15^\circ$, $4^m = 1^\circ$, $1^m = 15'$, $4^s = 1'$ и $1^s = 15''$.

Круг склонения, проходящий через точку весеннего равноденствия Υ , называется *равноденственным колюром*. Прямое восхождение может быть также представлено углом (α) при полюсе мира между равноденственным колюром и кругом склонения, проходящим через светило (M).

Склонением ($\delta = mM$) называется угловое расстояние от небесного экватора (QO'), отсчитываемое по кругу склонения. В северном небесном полушарии склонение положительно ($\delta > 0$), а в южном отрицательно ($\delta < 0$) и измеряется в пределах от 0° (небесный экватор) до $\pm 90^\circ$ (полюсы мира).

На рис. 6 у светила M склонение $\delta > 0$, а у светила M' склонение $\delta < 0$, но оба светила в рассматриваемый момент времени видны, так как находятся над истинным горизонтом (SN) и их высота $h > 0$. Таким образом, знак склонения не является критерием видимости светила, которая зависит от моментов времени и от соотношения между склонением δ светила и географической широтой φ местности. Экваториальные координаты (α и δ) звезд и других не менее удаленных небесных объектов остаются практически неизменными на протяжении сравнительно длительных промежутков времени.

Экваториальные координаты непосредственно измерены быть не могут, так как ни экватор, ни точка весеннего равноденствия на

небе ничем не отмечены. Эти координаты находят вычислениями на основе наблюдений.

Экваториальные координаты звезд имеют обширное практическое применение: по ним создают звездные карты и каталоги, определяют географические координаты пунктов земной поверхности, осуществляют ориентировку в космическом пространстве, проверяют время, изучают вращение Земли и т.д. Определение экваториальных координат наиболее далеких от Земли небесных объектов – квазаров, движение которых в пространстве не изменяет (из-за чрезвычайной удаленности) их видимого положения на небе, дает возможность установить надежную инерциальную систему отсчета.

§ 13. Экваториальная система координат с часовым углом

Для счета времени и для практики астрономических наблюдений необходима такая небесная координата, которая в суточном вращении небесной сферы равномерно изменяется на протяжении суток, то есть измеряет угол поворота небесной сферы вокруг оси мира. Эта координата, называемая *часовым углом*, представляет собой угол (t) при полюсе мира между кругом склонения ($PMmP'$ на рис. 6) и южной половиной небесного меридиана ($PZQSP'$). Часовой угол измеряется дугой ($t = Qm$) небесного экватора от южной половины небесного меридиана до круга склонения в направлении вращения небесной сферы, то есть к западу. Часовые углы, как правило, измеряются в единицах времени, в пределах от 0 до 24^ч, но также и в угловых единицах, в пределах от 0 до 360°. Значительно реже часовые углы считаются положительными в западной небесной полусфере и отрицательными в восточной полусфере.

Второй координатой в этой системе является склонение (δ). На протяжении суток склонение звезд и других далеких небесных объектов остается неизменным, а часовой угол непрерывно изменяется пропорционально времени на 24^ч за один оборот небесной сферы. В астрономии часовым углом t_γ точки весеннего равноденствия измеряется звездное время. Обозначив момент по звездному времени через S , получим:

$$S = t_{\gamma}. \quad (1.4)$$

Так как (см. рис. 6) $t_{\gamma} = Q\gamma$, а у светила M прямое восхождение $\alpha = \gamma m$, то часовой угол этого же светила

$$t = Qm = t_{\gamma} - \alpha,$$

или

$$t = S - \alpha, \quad (1.5)$$

то есть часовой угол любого светила всегда равен моменту по звездному времени минус прямое восхождение этого светила.

§ 14. Преобразование небесных координат

Преобразованием небесных координат называется вычисление сферических координат одной системы по сферическим координатам другой системы. Для этого используются формулы сферического треугольника, образованного на сфере дугами трех больших кругов. В таком треугольнике (рис. 7) стороны a , b и c , как и противолежащие им углы A , B и C , измеряются в угловых единицах. Между этими элементами сферического треугольника существуют определенные соотношения, из которых здесь приведены без вывода только необходимые для данного курса астрономии.

Теорема (или формула) косинусов. Косинус какой-либо стороны сферического треугольника равен произведению косинусов двух других его сторон плюс произведение синусов этих сторон на косинус угла между ними:

$$\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C. \quad (1.6)$$

Теорема (или формула) синусов. Синусы сторон сферического треугольника пропорциональны синусам противолежащих углов:

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C}. \quad (1.7)$$

Формула пяти элементов. В сферическом треугольнике произведение синуса одной стороны на косинус прилежащего угла равно произведению синуса второй, прилегающей к этому углу стороны, на косинус третьей стороны минус произведение сходных функций этих сторон на косинус угла между ними:

$$\sin c \cos A = \sin b \cos a - \sin a \cos b \cos C. \quad (1.8)$$

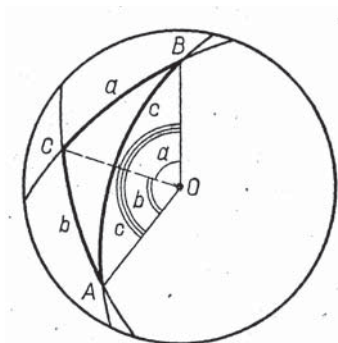


Рис. 7. Сферический треугольник; стороны измеряются углами при центре O сферы

В прямоугольном сферическом треугольнике сторона, лежащая против прямого угла, называется гипотенузой, а две другие стороны – катетами. Положив в формулах (1.6) – (1.8) угол $C = 90^\circ$ и поэтому назвав сторону c гипотенузой, найдем:

$$\cos c = \cos a \cos b, \quad (1.9)$$

то есть косинус гипотенузы равен произведению косинусов катетов:

$$\sin a = \sin c \sin A \quad \text{и} \quad \sin b = \sin c \sin B, \quad (1.10)$$

то есть синус катета равен произведению синуса гипотенузы на синус противолежащего этому катету угла:

$$\sin c \cos A = \cos a \sin b \quad (1.11)$$

то есть произведение синуса гипотенузы на косинус одного из прилежащих углов равно произведению косинуса катета, лежащего против этого угла, на синус другого катета.

Разделив выражение (1.11) на первое равенство (1.10), получим:

$$\frac{\sin c \cos A}{\sin c \sin A} = \frac{\cos a \sin b}{\sin a}$$

и окончательно

$$\sin b = \operatorname{tg} a \operatorname{ctg} A, \quad (1.12)$$

то есть синус одного катета равен произведению тангенса другого катета на котангенс противолежащего другому катету угла.

В любой момент времени положение светила M на небесной сфере (рис. 8) определяется в горизонтальной системе координат азимутом $A = Sn$ и высотой $h = nM$ или зенитным расстоянием $z = ZM = 90^\circ - h$, а в экваториальной системе – часовым углом $t = Qm$ и склонением $\delta = mM$. Дуги небесного меридиана ($PZQS$), круга высоты (ZMn) и круга склонения (PMm) светила образуют сферический треугольник PZM , называемый *параллактическим треугольником* (от греческого «параллаксис» – уклонение, так как из-за вращения небесной сферы треугольник все время поворачивается, меняя свою форму), вершинами которого служат северный полюс мира P , зенит Z и светило M . Стороны параллактического треугольника $ZM = z$, $PM = 90^\circ - \delta$ и $PZ = z_p = 90^\circ - \varphi$, где φ – географическая широта места.

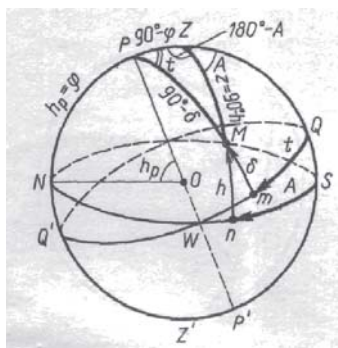


Рис. 8. Параллактический треугольник

В этом треугольнике угол при северном полюсе мира равен t , а угол при зените равен $180^\circ - A$. Угол при светиле (M) называется *параллактическим углом* и при преобразовании координат не используется.

Для вычисления горизонтальных координат z и A по известным экваториальным координатам δ и t согласно формулам (1.6) – (1.8) получим:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad (1.13)$$

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t \quad (1.14)$$

и

$$\sin z \cos A = -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t. \quad (1.15)$$

Формула (1.13) дает однозначное решение, так как z всегда положительно. При значениях t , близких к 0 и 180° , вычислять A предпочтительнее по формуле (1.14), а при значениях t , близких к 90° и 270° – по формуле (1.15). Квadrant для A определяется знаками правой части равенств, так как всегда $\sin z > 0$. Формулы (1.13)–(1.15), применяются при вычислении условий видимости небесных светил, экваториальные координаты α и δ которых заимствуются из астрономических календарей, а часовые углы t вычисляются по формуле (1.5).

Для вычисления экваториальных координат α и δ по известным горизонтальным координатам z и A в соответствии с формулами (1.6) – (1.8) найдем:

$$\sin \delta = \sin \varphi \cos z - \cos \varphi \sin z \cos A \quad (1.16)$$

$$\cos \delta \sin t = \sin z \sin A \quad (1.17)$$

и

$$\cos \delta \cos t = \cos \varphi \cos z + \sin \varphi \sin z \cos A. \quad (1.18)$$

Знак δ определяется знаком $\sin \delta$, а квадрант для t выбирается по знакам правой части формул (1.17) и (1.18), так как всегда $\cos \delta > 0$. Предпочтительность формул для вычисления t аналогична прежней.

§ 15. Кульминация светил

В суточном вращении небесной сферы каждое светило дважды пересекает (или проходит) небесный меридиан: один раз – южную его половину ($t = 0^h = 0^\circ$) и второй раз (через полсуток) – северную половину ($t = 12^h = 180^\circ$). Явление прохождения светилом южной половины небесного меридиана называется *верхней кульминацией*, так как в этот момент высота светила h наибольшая (зенитное расстояние z наименьшее) из всех возможных значений на протяжении суток.

Для этого явления часто применяются равнозначные термины: «светило в меридиане», «светило кульминирует», «светило в верхней кульминации» (от лат. *culmen* – верх, вершина).

В верхней кульминации у светил часовой угол $t = 0^\circ$, и поэтому, положив в формуле (1.13) $\cos t = 1$, получим:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta,$$

или

$$\cos z = \cos [\pm(\varphi - \delta)],$$

откуда

$$z = \pm(\varphi - \delta).$$

При $\cos t = 1$ равенство (1.15) принимает вид:

$$\sin z \cos A = -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta = \sin(\varphi - \delta),$$

а так как z и $\sin z$ всегда положительны, то при $\delta < \varphi$ $\cos A = 1$ и азимут светила $A = 0^\circ$, то есть, если склонение (δ) светила меньше географической широты (φ) места, то светило кульминирует к югу от зенита и его зенитное расстояние

$$z_{\text{в}} = \varphi - \delta^*, \quad (1.19)$$

а высота

$$h_{\text{н}} = (90^\circ - \varphi) + \delta. \quad (1.20)$$

При $d > \varphi \cos A = -1$ и азимут светила $A = 180^\circ$, то есть если склонение светила больше географической широты места, то светило кульминирует к северу от зенита, между зенитом и северным полюсом мира, и тогда зенитное расстояние светила

$$z_{\text{в}} = \delta - \varphi, \quad (1.21)$$

а высота

$$h = (90 - \delta) + \varphi. \quad (1.22)$$

Наконец, если склонение светила равно географической широте места, то светило кульминирует в зените и его зенитное расстояние $z_{\text{в}} = \varphi - \delta = 0^\circ$, а высота $h_{\text{в}} + 90^\circ$.

Отсюда следует, что склонение зенита $\delta = \varphi$, и через зенит всегда проходит небесная параллель, склонение которой равно географической широте места. Здесь и далее индекс «в» при z и h означает, что формулы справедливы только для *верхней* кульминации.

Все рассмотренные случаи верхней кульминации иллюстрируются на рис. 9, изображающим проекцию небесной сферы на плоскость небесного меридиана:

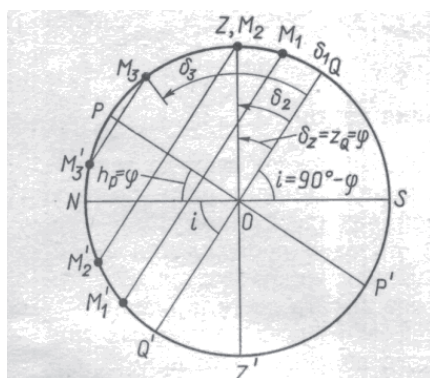


Рис. 9. Кульминация светил

$PZQSP'$ – южная половина небесного меридиана, $PNQ'P'$ – его северная половина, NS – истинный горизонт, QQ' – небесный экватор, Z – зенит, склонение которого $\delta_z = QZ = \varphi$. Светила M_1 , M_2 и M_3 находятся в верхней кульминации, но имеют разное склонение: $\delta_1 = QM_1 < \varphi$, $\delta_2 = QM_2 = \varphi$, $\delta_3 = QM_3 > \varphi$; их зенитные расстояния $z_1 = ZM_1$ (при $A = 0^\circ$), $z_2 = 0^\circ$ (светило M_2 – в зените Z) и $z_3 = ZM_3$ (при $A = 180^\circ$). У наивысшей точки Q небесного экватора $z_Q = \varphi$. Хорды M_1M_1' , M_2M_2' и M_3M_3' изображают небесные параллели этих светил.

Нижней кульминацией называется прохождение светил через северную половину небесного меридиана (положение светил M'_1 , M'_2 и M'_3 на рис. 9). В этот момент их часовой угол $t = 180^\circ = 12^h$. Положив в формуле (1.13) $\cos t = -1$, получим:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta - \cos \varphi \cos \delta = -\cos(\varphi + \delta), \text{ или}$$

$$\cos z = \cos[180^\circ - (\varphi + \delta)]$$

откуда

$$z_n = 180^\circ - \varphi - \delta \quad (1.23)$$

и

$$h_n = \delta - (90^\circ - \varphi). \quad (1.24)$$

Здесь и далее индекс «н» при z и h означает, что формулы действительны только для нижней кульминации. Равенство (1.24) позволяет сразу определить, заходит ли светило в данной местности или же является незаходящим. Если $\delta < +(90^\circ - \varphi)$, то $h_n < 0$ и, следовательно, светило заходящее (M'_1 и M'_2 на рис. 9). Если же $\delta > +(90^\circ - \varphi)$, то $h_n > 0$ и светило незаходящее, то есть круглые сутки находится над горизонтом (M'_3 на рис. 9). В силу симметрии небесной сферы светила со склонением $\delta \leq -(90^\circ - \varphi)$ вообще не восходят в данной местности и поэтому никогда не видны, что следует также из формулы (1.20) при $h_n \leq 0^\circ$. Эта симметрия выражается правилом: *круг невосходящих светил равен кругу незаходящих светил* (рис. 10).

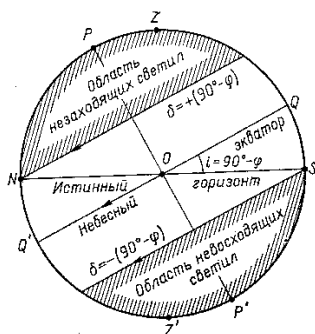


Рис. 10. Незаходящие и невосходящие светила

Светила со склонением $-(90^\circ - \varphi) < \delta < +(90^\circ - \varphi)$ восходят и заходят, но положение точек их восхода и захода на истинном горизонте зависит от их склонения: при $\delta = 0^\circ$ светила расположены на небесном экваторе (рис. 11, светило F), восходят в точке востока (E), заходят в точке запада (W), полсуток находятся над горизонтом и полсуток – под ним; у светил (M) северной небесной полусферы ($\varphi > 0^\circ$) точки восхода (a) и захода (b) смещены от точек востока и запада в сторону точки севера (N), и светила большую часть суток находятся над горизонтом, а меньшую часть суток – под ним; у светил (D) южной небесной полусферы ($\delta < 0^\circ$) точки восхода (c) и захода (d) смещены от точек востока и запада в сторону точки юга (S), и светила меньшую часть суток пребывают над горизонтом, а большую часть суток – под ним.

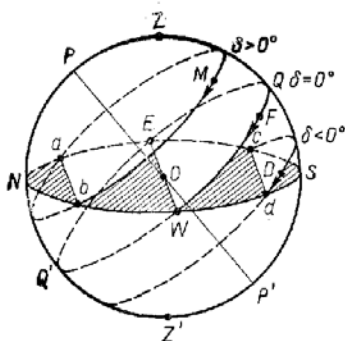


Рис. 11. Положение точек восхода и захода светил с различным склонением

§ 16. Вид звездного неба на разных географических параллелях

Из-за шарообразной формы Земли вид звездного неба в местах с разной географической широтой (φ) различен и определяется теоремой о высоте полюса мира ($h_p = \varphi$). На земном экваторе ($\varphi = 0^\circ$; рис. 12) $h_p = 0^\circ$, и поэтому ось мира лежит в плоскости истинного горизонта и совпадает с полуденной линией, северный полюс мира (P) совмещен с точкой севера (N), южный полюс мира (P') – с точкой юга (S), небесный экватор (QQ') проходит через зенит (Z) и надир (Z'), плоскости всех небесных параллелей перпендикулярны плоскости истинного горизонта, а сами параллели делятся ею пополам. Все светила восходят и заходят перпендикулярно горизонту и видны полсутки. В равной мере обозримы обе небесные полусферы. Светила северной полусферы ($\delta > \varphi = 0^\circ$; точка M на рис. 12) пересекают небесный меридиан к северу от зенита, а светила южной полусферы ($\delta < \varphi = 0^\circ$; точка L) – к югу от зенита. Полярная звезда (α Малой Медведицы) видна вблизи точки севера и регулярно заходит за горизонт.

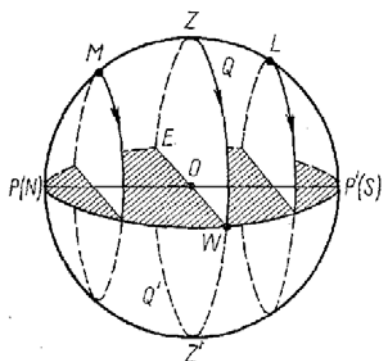


Рис. 12. Вид небесной сферы на земном экваторе

При перемещении наблюдателя по земной поверхности в сторону географического полюса одноименный полюс мира поднимается над горизонтом ($h_p = \varphi$), а противоположный опускается под него, небесный экватор приближается к истинному горизонту, наблюдениям доступна вся одноименная небесная полусфера и

только часть противоположной, уменьшающаяся по мере приближения к географическому полюсу; увеличиваются круги незаходящих и невосходящих светил (рис. 13).

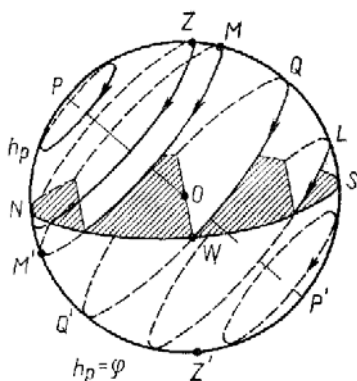


Рис. 13. Вид небесной сферы на произвольной географической широте

На Северном полюсе Земли ($\varphi = +90^\circ$; рис. 14) $h_p = +90^\circ$, ось мира (PP') совпадает с отвесной линией, северный полюс мира (P) совмещен с зенитом (Z), а небесный экватор (QQ') – с истинным горизонтом, и поэтому не имеется ни точек востока, юга, запада и севера, ни небесного меридиана, ни полуденной линии. Небесные параллели параллельны плоскости истинного горизонта, и в суточном вращении неба звезды движутся параллельно горизонту, не меняя своей высоты. Понятие кульминаций отсутствует. Светила (M) северной небесной полусферы незаходящие, а светила (L) южной полусферы невосходящие. Полярная звезда расположена почти в зените.

На Южном географическом полюсе картина аналогичная, только там с зенитом совпадает южный полюс мира, светила южной небесной полусферы незаходящие, а светила северной полусферы не видны.

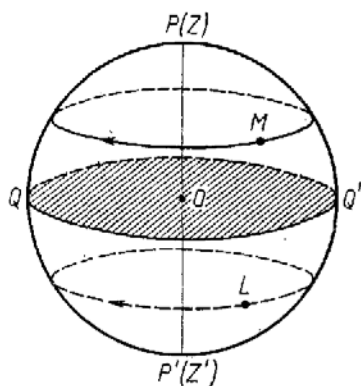


Рис. 14. Вид небесной сферы на географическом полюсе

§ 17. Астрономическая рефракция

Из-за преломления световых лучей в земной атмосфере, называемого *астрономической (или атмосферной) рефракцией*, наблюдаемое (видимое) зенитное расстояние z' светила несколько меньше его истинного зенитного расстояния z , а видимая высота h' несколько больше истинной высоты h , то есть, как принято говорить в астрономии, рефракция приподнимает светило над горизонтом.

Разность

$$\rho = z - z' = h' - h \quad (1.25)$$

называется величиной рефракции, а чаще *рефракцией*.

На зенитных расстояниях $z < 70^\circ$ рефракция мала, менее $3'$, убывает с увеличением высоты и в зените $\rho = 0$. Величина рефракции зависит от температуры воздуха (t) и атмосферного давления (p). При произвольных атмосферных условиях рефракция называется истинной, а при $t^\circ = +10^\circ\text{C}$ и $p = 760$ мм рт. ст. = 1013 гПа (гектопаскалей) – средней. При $z < 70^\circ$ средняя рефракция

$$\rho = 58'',2 \times \operatorname{tg} z'. \quad (1.26)$$

При $z > 70^\circ$ формула (1.26) непригодна, так как дает погрешность, резко возрастающую с приближением к горизонту ($z = 90^\circ$), где рефракция наибольшая. При $z = 90^\circ$ по этой формуле получается $\rho =$, в то время как в действительности средняя рефракция в горизонте $\rho = 35'$.

Истинная рефракция, даже при самых неблагоприятных атмосферных условиях в полярных районах, не бывает больше 2° . На основе наблюдений созданы таблицы рефракции для разных зенитных расстояний при различных атмосферных условиях. Этими таблицами пользуются при обработке астрономических наблюдений.

Рефракция, действуя только в вертикальном направлении, не влияет на азимут светила, но искажает его экваториальные координаты. Она обязательно учитывается при определении экваториальных координат светил, вычислении моментов их восхода и захода, при уточнении длительности сумерек, полярных дней и ночей и т. д.

Из-за рефракции диски Солнца и Луны вблизи горизонта выглядят овальными, так как у нижнего края диска рефракция примерно на $6'$ больше, чем у верхнего края, и поэтому вертикальный диаметр диска кажется укороченным в сравнении с горизонтальным диаметром, который рефракцией не искажается.

§ 18. Измерение горизонтальных координат светил и определение положения небесного меридиана

Для измерения горизонтальных координат применяется небольшой переносный оптический инструмент, называемый *универсальным инструментом*, простейшая конструкция которого показана на рис. 15. У современных универсальных инструментов разделенные круги скрыты защитными кожухами и на рисунке видны не будут. Поэтому здесь приведена старая конструкция с открытыми кругами.

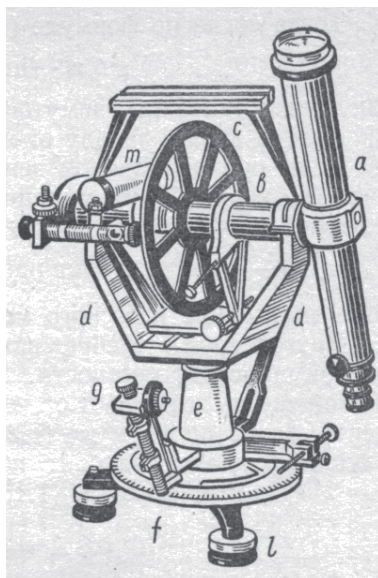


Рис. 15. Универсальный инструмент простейшей конструкции

Он состоит из небольшой зрительной трубы (*a*), скрепленной с горизонтальной осью (*b*), на которую жестко насажен вертикальный круг (*c*). Горизонтальная ось лежит на цапфах рамки (*d*) и на них может вместе с вертикальным кругом и зрительной трубой поворачиваться. Рамка насажена на вертикальную ось (*e*), с которой жестко скреплен горизонтальный круг (*f*), и вместе с ними может поворачиваться в горизонтальной плоскости. На обоих кругах, или лимбах, нанесены градусные и минутные деления (обычно через 20', 10' или 5'), позволяющие отсчитывать поворот зрительной трубы в обеих плоскостях. Для увеличения точности отсчетов около кругов на неподвижных основаниях укреплены специальные пластины с более мелкими делениями (верньеры) и микроскопы (*g*). Установка зрительной трубы в определенном направлении фиксируется на обеих осях зажимными винтами, а ее незначительный поворот осуществляется микрометрическими винтами. Винтовые ножки (*l*) и уровни (*m*) обеспечивают правильную установку инструмента. В окуляре зрительной трубы укреплена сетка нитей, которая при наблюдениях видна в поле зрения инструмента (рис. 16).

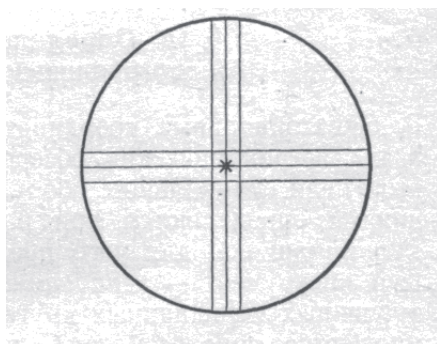


Рис. 16. Изображение звезды в поле зрения универсального инструмента

При наведении зрительной трубы на светило его зенитное расстояние отсчитывается по вертикальному кругу, а азимут – по горизонтальному кругу инструмента.

Для определения положения небесного меридиана имеется несколько способов. Один из них основан на том, что при равных расстояниях звезды от небесного меридиана (до и после верхней кульминации) ее зенитное расстояние z одинаково, что следует из равенства (1.13):

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t.$$

Тогда согласно формуле (1.14)

$$\sin z \sin A = \cos z \sin t$$

численные значения азимутов A одинаковы, но к востоку от меридиана $A < 0$, а к западу от него $A > 0$.

Если при одинаковом зенитном расстоянии звезды первой отсчет (до верхней кульминации) на горизонтальном круге был n_1 , а второй отсчет (после верхней кульминации) n_2 , то средний отсчет $n_s = \frac{n_1 + n_2}{2}$ соответствует направлению на точку юга, то есть определяет положение небесного меридиана и полуденной линии.

Другой способ требует знания склонения δ звезды и географической широты φ местности. Измерив видимое зенитное расстояние z' этой звезды, отмечают отсчет n_1 на горизонтальном круге

инструмента, затем по формуле (1.26) или по таблицам определяют рефракцию ρ , далее находят истинное зенитное расстояние звезды $z = z' + \rho$ и по формуле (1.16)

$$\cos A = \frac{\sin \varphi \cdot \cos z - \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \sin z}$$

вычисляют азимут A звезды.

Тогда на горизонтальном круге отсчет $n_s = n_i - A$ соответствует направлению на точку юга.

§ 19. Определение склонения звезд и географической широты местности

Экваториальные координаты (α и δ) звезд определяют только в тех астрономических обсерваториях, которые располагают для этой цели специальным оборудованием. Наиболее точно эти координаты определяются при наблюдениях светил в меридиане (в кульминациях), для чего предназначен специальный измерительный инструмент – *меридианный круг* (рис. 17). Конструкции современных меридианных кругов очень сложны и предусматривают множество приспособлений, повышающих точность измерений и сводящих к минимуму их ошибки. На рис. 17 справа показана схема меридианного круга. На массивной полый оси (C) перпендикулярно к ней жестко укреплены оптическая труба (AB) длиной до 2 м (диаметр объектива около 15–20 см) и два разделенных круга (K) диаметром 60–70 см, на которых нанесены деления через 2'. Ось расположена строго горизонтально в плоскости первого вертикала (в направлении к точкам запада и востока) на двух каменных или бетонных столбах, установленных на мощных фундаментах, и может поворачиваться в подшипниках вместе с трубой и кругами только в плоскости небесного меридиана, откуда сам инструмент и получил свое название. На этих же столбах неподвижно укреплены верньеры и микроскопы (M), позволяющие отсчитывать деления на кругах с точностью до 0",1.

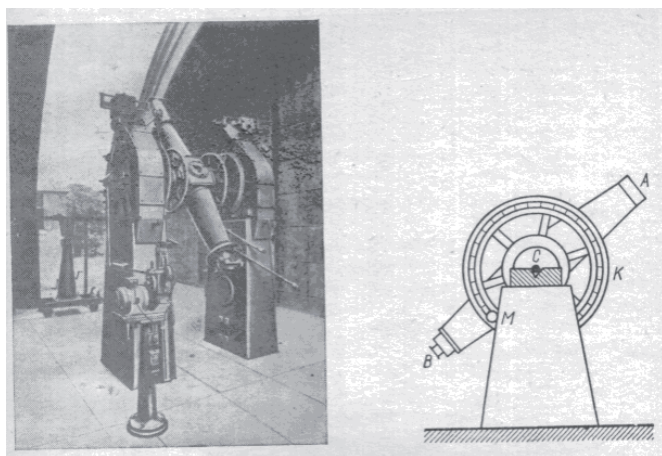


Рис. 17. Меридианный круг и его схема

В поле зрения оптической трубы видна сетка из горизонтальных и вертикальных нитей, из которых центральная вертикальная нить совпадает с направлением на меридиан. На разделенных кругах отмечена точка зенита Z_0 , то есть деление, соответствующее направлению оптической трубы в зенит.

Процедура измерений на меридианном круге весьма сложна, так как требует действий, учитывающих и исключающих погрешности инструмента и по возможности личные ошибки наблюдателя.

Метод определения экваториальных координат светил называется *абсолютным*, если он не зависит от прежних определений и не опирается на уже известные координаты звезд. В противном случае метод называется *относительным* или *дифференциальным*.

Абсолютным методом можно определить склонение только незаходящих звезд, и именно поэтому знаменитая Пулковская астрономическая обсерватория (рис. 18) под Санкт-Петербургом, являющаяся Главной астрономической обсерваторией Российской академии наук, построена в северном районе с географической широтой около 60° , где много незаходящих звезд. Такие определения возможны только в осенне-зимний период, когда ночь длится более 14 часов.



Рис. 18. Пулковская астрономическая обсерватория

Измерив видимое зенитное расстояние одной и той же звезды в верхней ($z'_в$), а через полсуток в нижней ($z'_н$) кульминации и учтя рефракцию ρ , находят истинные зенитные расстояния $z_в = z'_в + \rho$ и $z_н = z'_н + \rho$, по которым вычисляют склонение δ этой звезды и независимо от него географическую широту φ обсерватории. При верхней кульминации звезды к югу от зенита используют формулы:

$$z_в = \varphi - \delta \quad (1.19)$$

и

$$z_н = 180^\circ - \varphi - \delta, \quad (1.23)$$

из которых находят:

$$\delta = 90^\circ - \frac{z_н + z_в}{2}$$

и

$$\varphi = 90^\circ - \frac{z_н - z_в}{2}$$

Если же в верхней кульминации звезда находилась к северу от зенита, то формула (1.19) заменяется формулой (1.21) $z_b = \delta - \varphi$ и тогда

$$\delta = 90^\circ - \frac{z_n - z_b}{2} \quad \text{и} \quad \varphi = 90^\circ - \frac{z_n + z_b}{2}.$$

Таким методом определяют склонение не всех незаходящих звезд, а только нескольких десятков или сотен, с тем чтобы, систематически повторяя измерения, следить за изменением их склонения и за возможными небольшими колебаниями географической широты обсерватории.

У остальных светил измеряют зенитное расстояние в верхней кульминации, и так как географическая широта обсерватории уже известна, то их склонение вычисляют по формулам (1.19) и (1.21).

Дифференциальный метод определения склонения светил чаще всего применяется при фотографических наблюдениях. На фотографируемом участке звездного неба обязательно должно находить несколько звезд с известными экваториальными координатами, определенными абсолютным методом; такие звезды называются *опорными*. Принцип дифференциального метода состоит в том, что на фотографическом негативе измеряются в определенном масштабе разности $\Delta\delta_i$ между искомым склонением δ светила и известными склонениями δ_i опорных звезд. Получается несколько близких между собой величин $\delta = \delta_i + \Delta\delta_i$, о которых вычисляется наиболее вероятное значение искомого склонения.

При визуальных наблюдениях в меридиане (обязательно в верхней кульминации) измеряются разности Δz_i между зенитными расстояниями z светила и z_i опорных звезд. Так, при кульминации к югу от зенита искомое склонение $\delta = \delta_i - (z - z_i) = \delta_i - \Delta z_i$.

Найденные склонения звезд публикуют в *звездных каталогах*. Измеряя в различных местностях универсальным инструментом зенитное расстояние этих звезд в меридиане, и заимствуя их склонение из звездных каталогов, астрономические экспедиции определяют по формулам (1.19) и (1.21) географическую широту местности.

Методы определения прямого восхождения светил и географической долготы мест земной поверхности изложены в гл. III.

В настоящее время географические координаты определяются только астрономическими методами.

Глава II. Видимое годичное движение солнца, его причины и следствия

§ 20. Эклиптика

В полночь в верхней кульминации всегда находятся те звезды, прямое восхождение которых почти на 180° отличается от прямого вхождения Солнца. Наблюдения показывают, что в каждую последующую полночь кульминируют звезды, прямое восхождение которых примерно на 4^m (1°) больше прямого восхождения звезд, кульминировавших в предыдущую полночь. Следовательно, и прямое восхождение α Солнца ежесуточно возрастает приблизительно на 4^m , а это означает, что, помимо суточного движения с востока к западу, обусловленного вращением Земли, Солнце медленно перемещается на фоне звезд с запада к востоку (навстречу суточному вращению неба) примерно на 1° в сутки и за год совершает по небесной сфере один оборот (360°). Это годичное движение Солнца называется видимым, так как является отражением действительного обращения Земли вокруг Солнца, чему имеются неопровержимые доказательства (см. § 56). Из-за движения Земли вокруг Солнца вид звездного неба постепенно изменяется по сезонам (временам) года, регулярно повторяясь из года в год.

Из ежедневных измерений зенитного расстояния z_v Солнца в момент его верхней кульминации (называемый *истинным полднем*) установлено, что его склонение δ плавно изменяется: ежегодно 20–21 марта и 22–23 сентября $\delta = 0^\circ$ (Солнце пересекает небесный экватор), 21–22 июня становится наибольшим $\delta_{\max} = +23^\circ 26'$, а 21–22 декабря – наименьшим, $\delta_{\min} = -23^\circ 26'$. То есть примерно полгода Солнце находится в северном небесном полушарии и полгода в южном, поочередно удаляясь от небесного экватора на наибольшее расстояние в $23^\circ 26'$. Следовательно, видимое годичное движение Солнца происходит по большому кругу небесной сферы, наклоненному к небесному экватору под углом $\varepsilon = 23^\circ 26'$ (точнее, $\varepsilon = 23^\circ 26' 29''$). Этот большой круг называется

эклиптикой (от греческого «эклипсис» – затмение), так как, когда Луна подходит к эклиптике, то при определенных условиях происходят солнечные и лунные затмения. Угол ее наклона к небесному экватору называется наклонением эклиптики.

На рис. 19 изображены небесный экватор QQ' , ось мира PP' , эклиптика EE' и ось эклиптики $ПП'$ – перпендикуляр к плоскости эклиптики, проходящий через центр O небесной сферы и пересекающийся с ней в точках $П$ и $П'$, называемых *полюсами эклиптики*. Полюсы эклиптики отстоят от полюсов мира на $\varepsilon = 23^\circ 26'$; *северный полюс эклиптики* $П$ ($\alpha = 270^\circ = 18^\text{ч}$, $\delta = +66^\circ 34'$) расположен вблизи звезды δ Дракона, а *южный полюс эклиптики* $П'$ ($\alpha = 90^\circ = 6^\text{ч}$, $\delta = -66^\circ 34'$) – недалеко от звезды δ Золотой Рыбы. Стрелка на небесном экваторе показывает направление суточного вращения небесной сферы, а стрелка на эклиптике – направление видимого годичного движения Солнца ($\odot$).

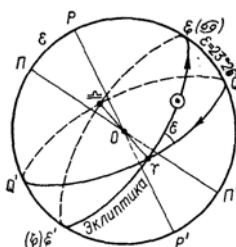


Рис. 19. Эклиптика и небесный экватор: $\odot$ – Солнце

Точки пересечения эклиптики с небесным экватором называются *точками равноденствия*; в *точке весеннего равноденствия* Υ ($\alpha = 0^\circ = 0^\text{ч}$, $\delta = 0^\circ$) Солнце переходит из южного небесного полушария в северное, а в *точке осеннего равноденствия* Ω ($\alpha = 180^\circ = 12^\text{ч}$, $\delta = 0^\circ$) – из северного небесного полушария в южное. Линия ($\Upsilon O \Omega$) пересечения плоскости небесного экватора с плоскостью эклиптики называется *линией узлов* небесного экватора, а точки равноденствий – его *узлами* на эклиптике.

Точки эклиптики, удаленные на 90° от точек равноденствий, называются *точками солнцестояний*: в северной небесной по-

лусфере лежит *точка летнего солнцестояния* ☊ ($\alpha = 90^\circ = 6^h$, $\delta = +23^\circ 26'$), а в южной небесной полусфере – *точка зимнего солнцестояния* ☋ ($\alpha = 270^\circ = 18^h$, $\delta = -23^\circ 26'$).

Точки равноденствий и солнцестояний обозначены знаками тех созвездий, в которых они находились более 2000 лет назад.



Рис. 20. Определение экваториальных координат Солнца

Экваториальные координаты Солнца вычисляются по его зенитному расстоянию $z_\odot$, измеренному в истинный полдень. В этот момент (рис. 20) дуги небесного меридиана, небесного экватора и эклиптики образуют прямоугольный сферический треугольник с острым углом $\varepsilon = 23^\circ 26'$ (треугольник изображен на внутренней поверхности небесной сферы). Тогда согласно формуле (1.19) склонение Солнца $\delta = \varphi - z_\odot$ и его прямое восхождение α вычисляется по формуле:

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \delta \operatorname{ctg} \varepsilon, \quad (2.1)$$

полученной из равенства (1.12).

Таким образом, хотя точка весеннего равноденствия на небе ничем не отмечена, тем не менее, ее удобно принимать за начало счета прямого восхождения, так как это позволяет легко вычислять прямое восхождение Солнца, по которому определяется положение самой точки весеннего равноденствия.

По ежедневным значениям экваториальных координат Солнца α и δ отмечают его видимый годичный путь по созвездиям и наносят эклиптику на звездные карты.

§ 21. Зодиакальные созвездия и знаки зодиака

Эклиптика проходит по двенадцати созвездиям (по числу месяцев в году), из которых одиннадцать имеют названия живых существ (реальных или мифических), и поэтому все двенадцать созвездий именуются *зодиакальными* (от греческого «зодиа-кос» – зверь). Их названия и принятые обозначения: Рыбы (♓), Овен (♈), Телец (♉), Близнецы (♊), Рак (♋), Лев (♌), Дева (♍), Весы (♎), Скорпион (♏), Стрелец (♐), Козерог (♑) и Водолей (♒). Между созвездиями Скорпиона и Стрельца Солнце перемещается по участку созвездия Змееносца, но так как в году только 12 месяцев и подавляющее большинство звезд этого созвездия расположено далеко от эклиптики, то оно не причислено к зодиакальным.

В настоящее время точка весеннего равноденствия Υ находится в созвездии Рыб, точка летнего солнцестояния ♊ – в созвездии Близнецов, точка осеннего равноденствия ♎ – в созвездии Девы и точка зимнего солнцестояния ♑ – в созвездии Стрельца. Началом сезонов считаются моменты прохождения Солнцем этих точек.

Весь пояс зодиакальных созвездий называется *Зодиаком*. Протяженность зодиакальных созвездий вдоль эклиптики различна: наибольшая протяженность, около 40° , у созвездий Тельца, Девы и Стрельца, а по созвездию Скорпиона проходит дуга эклиптики, равная всего лишь 5° . Поэтому для удобства счета положения Солнца эклиптика разделена на 12 равных частей (дуг), по 30° каждая, называемых знаками Зодиака. Счет знаков Зодиака начинается от точки весеннего равноденствия, и они тоже обозначаются знаками и названиями зодиакальных созвездий.

Весной Солнце последовательно проходит по созвездиям Рыб, Овна и Тельца, летом – по созвездиям Близнецов, Рака и Льва, осенью – по созвездиям Девы, Весов и Скорпиона (а также Змееносца), а зимой – по созвездиям Стрельца, Козерога и Водолея.

§ 22. Эклиптическая система координат

Наблюдения показывают, что Луна и планеты перемещаются по зодиакальным созвездиям, вблизи эклиптики. Поэтому видимое движение этих светил, как и Солнца, проще изучать в *эклиптической системе координат*, основным кругом которой служит эклиптика, а полюсами – полюсы эклиптики. Эклиптика ($\xi\xi'$) делит небесную сферу (рис. 21) на северное эклиптическое полушарие и южное эклиптическое полушарие.

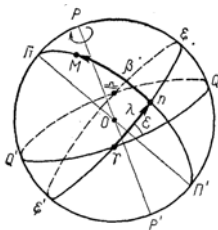


Рис. 21. Эклиптическая система координат

Большие полуокружности, проведенные через полюсы эклиптики (например, полуокруг $\Pi M \Pi'$), называются кругами эклиптикой широты. Положение светила определяется двумя сферическими координатами – *эклиптической долготой* λ и *эклиптической широтой* β . Эклиптическая долгота λ отсчитывается по эклиптике от точки весеннего равноденствия γ до круга широты светила с запада к востоку и измеряется от 0 до 360° . Эклиптическая широта β отсчитывается от эклиптики по кругу широты в пределах от 0° (эклиптика) до $\pm 90^\circ$ (полюсы эклиптики) и в северном эклиптическом полушарии считается положительной, а в южном отрицательной.

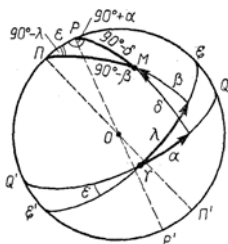


Рис. 22. Астрономический треугольник

Сферический треугольник $ПМ$, вершинами которого являются северный полюс эклиптики ($П$), северный полюс мира ($Р$) и светило ($М$), называется *астрономическим треугольником* (рис. 22); он связывает эклиптические и экваториальные координаты светила. Стороны астрономического треугольника $ПМ = 90^\circ - \delta$, и $ПР = \varepsilon$ (наклонение небесного экватора к эклиптике); угол при полюсе эклиптики $\angle РПМ = 90^\circ - \lambda$, а угол при полюсе мира $\angle ПРМ = 90^\circ + \alpha$.

Используя формулы (1.6) – (1.8), легко найти соотношение между эклиптическими и экваториальными координатами светила. В частности, у Солнца эклиптическая широта $\beta = 0^\circ$, и поэтому эклиптическая долгота λ вычисляется по формулам:

$$\cos \lambda = \cos \alpha \cos \delta$$

и

$$\sin \lambda = \sin \delta \operatorname{cosec} \varepsilon = \sin \alpha \cos \delta \sec \varepsilon.$$

§ 23. Неравномерность годичного движения Солнца и обращение Земли

Из наблюдений моментов верхних кульминаций звезд зодиакальных созвездий установлено, что Солнце совершает один оборот по эклиптике за период $T_* = 365,2564$ суток $= 365^d 6^h 09^m 10^s$, называемый *звездным* или *сидерическим годом* (от лат. *sidus* – звезда и *sideralis* – звездный), так как по истечении этого периода Солнце снова возвращается к той же звезде. Среднее суточное движение Солнца $n = 360^\circ : 365^d,2564 = 0^\circ,986 \approx 59'$, но систематические определения его эклиптической долготы показывают неравномерность его движения. Дугу эклиптики в 180° от точки весеннего до точки осеннего равноденствия Солнце проходит за 186 суток, то есть в весенне-летний период в северном полушарии Земли оно перемещается за сутки в среднем на $58'$, а в осенне-зимний период длительностью 179 суток – на $60'$. Быстрее всего Солнце смещается по эклиптике 1–5 января, по $n_{\max} = 61'$ в сутки, а медленнее всего – 1–5 июля, по $n_{\min} = 57'$ в сутки. Видимый диаметр Солнца тоже изменяется от большего $d_{\max} = 32'35''$ в начале января до $d_{\min} = 31'31''$ в начале июля.

Видимое годовое движение Солнца по эклиптике доказывает, что Земля обращается вокруг Солнца по замкнутой плоской кривой. Следовательно, эклиптика представляет собой большой круг, по которому плоскость земной орбиты пересекается с небесной сферой. Неравномерное же движение Солнца и периодическое изменение его видимого диаметра свидетельствует о том, что Земля обращается вокруг Солнца по эллиптической орбите и на наименьшем расстоянии от него бывает в начале января, а на наибольшем – в начале июля. Период обращения Земли вокруг Солнца равен звездному году $T_* = 365^д,564 = 365^д6^ч09^м10^с$.



Рис. 23. Определение наклона оси вращения

Так как небесный экватор образован на небесной сфере плоскостью земного экватора и пересекается с эклиптикой под углом $\varepsilon = 23^{\circ}26',5$, то, следовательно, плоскость земного экватора наклонена под этим же углом к плоскости земной орбиты (рис. 23), и на такой же угол от перпендикуляра к ней (от оси эклиптики) отклонена земная ось вращения. Так, из астрономических наблюдений установлен наклон земной оси к плоскости земной орбиты.

Из-за гравитационного воздействия на Землю Луны и Солнца плоскость земного и небесного экватора при почти неизменном наклонении медленно поворачивается с востока к западу, и поэтому точки весеннего и осеннего равноденствия, расположенные на линии узлов небесного экватора, ежегодно смещаются по эклиптике на $p = 50'',27$ в том же направлении, то есть навстречу видимому годовому движению Солнца. Это смещение равноден-

ственных точек, открытое еще в середине II в. до н.э. древнегреческим астрономом Гиппархом Родосским, называется *прецессией* (от латинского *praecessio* – предшествование) или *предварением равноденствий*. Из-за прецессии Солнце ежегодно приходит в точку весеннего равноденствия раньше, чем Земля завершит очередной оборот вокруг него на интервал времени

$$\tau = p / n = 50'',27 / 3550'' \text{ сут.} = 0,0142 \text{ сут.} = 20'' 24',$$

так как среднее суточное движение Солнца $n = 0^\circ,986 = 3550''$.

Промежуток времени между двумя очередными прохождением Солнцем точки весеннего равноденствия называется *солнечным* или *тропическим годом*, который короче звездного года на $20''24'$. Следовательно, длительность тропического года $T_{\gamma} = 365^{\text{д}},2422 = 365^{\text{д}}5^{\text{ч}}48^{\text{м}}46^{\text{с}}$, а его началом принято считать момент времени, в который эклиптическая долгота Солнца $\lambda = 280^\circ$, что бывает либо 1 января, либо накануне, то есть 31 декабря.

Гравитационное воздействие планет на Землю приводит к медленному и незначительному покачиванию плоскости земной орбиты, в результате чего периодически несколько изменяется наклонение экватора к эклиптике. В настоящую эпоху наклонение ежегодно уменьшается на $0'',47$. Так, в начале 1980 г. оно было $\varepsilon = 23^\circ26'30'',78 \approx 23^\circ27'$, а к началу 2010 г. оно уменьшилось до $\varepsilon = 23^\circ26'16,77 \approx 23^\circ26'$.

Таким образом, исследуя видимое годовое движение Солнца, астрономы изучили реальное движение Земли в пространстве.

§ 24. Смена сезонов года и тепловые пояса

Смена сезонов (времен) года на Земле является следствием трех причин: обращения Земли вокруг Солнца, наклона земной оси к плоскости земной орбиты и сохранения направления земной оси в пространстве, что приводит к периодическому изменению условий освещения и обогрева Солнцем земных полушарий.

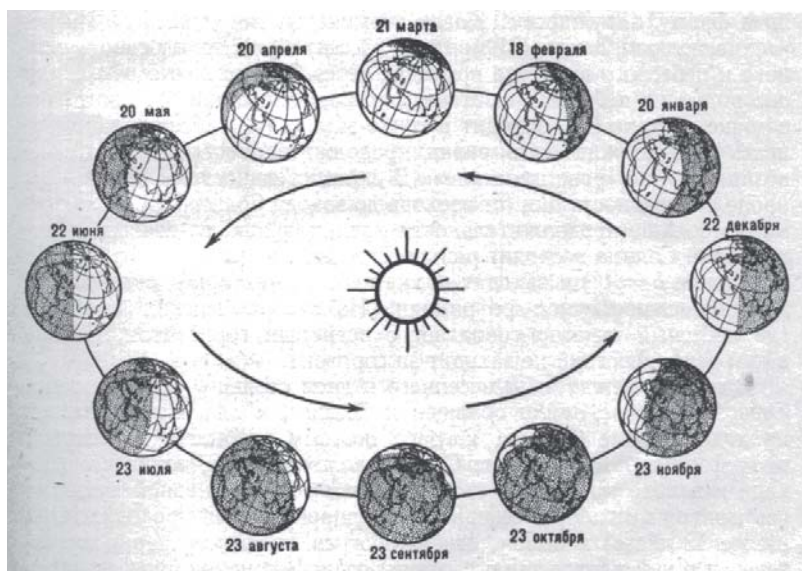


Рис. 24. Перемещение земного терминатора на протяжении года

Угол падения солнечных лучей на какую-либо местность земной поверхности всегда равен зенитному расстоянию z Солнца, и поэтому местность получает от Солнца количество тепла $I = I_0 \cos z$. Период смены сезонов года равен тропическому году, так как эти сезоны начинаются в моменты прохождения Солнца основных точек эклиптики.



Рис. 25. Изменение полуденной высоты Солнца и продолжительность дня и ночи (суточный путь Солнца в различные сезоны года)

На рис. 24 изображены положения Земли на орбите в разные дни года. Освещенное Солнцем дневное полушарие Земли отделяется от неосвещенного, ночного полушария линией светораздела – *терминатором* (от лат. *terminare* – ограничивать), имеющим форму окружности. Когда терминатор пересекает географические полюсы Земли (21 марта и 23 сентября), то плоскость земного и небесного экватора проходит через Солнце; поэтому с Земли оно видно на небесном экваторе (рис. 25, положение $\odot 1$), восходит в точке востока (*E*), заходит в точке запада (*W*), и продолжительность дня должна быть равна продолжительности ночи (отсюда возник термин «равноденствие»). В действительности же в эти даты продолжительность дня (от восхода до захода Солнца) на несколько минут больше продолжительности ночи, так как, во-первых, верхний край Солнца восходит раньше его центра (у которого в эти дни склонение $\delta = 0^\circ$) и заходит позже него, а во-вторых, сказывается действие атмосферной рефракции. На географических полюсах, где небесный экватор совпадает с истинным горизонтом, Солнце в дни равноденствий не заходит за горизонт.

В период между днем весеннего и днем осеннего равноденствия Северный полюс Земли обращен к Солнцу, а плоскость экватора проходит южнее Солнца, которое поэтому пребывает в северной полусфере неба. Склонение Солнца положительно, точки его восхода и захода смещены в сторону точки севера, дневной путь над горизонтом местностей северного полушария Земли продолжителен (более 12 часов) и высок, отчего обогрев этого полушария значителен и в нем длятся теплые сезоны года. В зоне вокруг Северного полюса Земли Солнце не заходит (полярный день), в зоне вокруг Южного полюса – не восходит (полярная ночь), а в средней полосе южного полушария дневной путь Солнца низок и непродолжителен (меньше 12 часов), обогревание местности слабее, и там длятся холодные сезоны года. В день летнего солнцестояния (22 июня) терминатор удаляется от географических полюсов Земли на $23^\circ 26',5$ и именно поэтому в этот день склонение Солнца становится наибольшим $\delta_{\max} = +23^\circ 26',5$ (см. рис. 25, положение $\odot 2$), точки его восхода (*a*) и захода (*b*) максимально смещены в сторону точки севера (*N*), и в северном полушарии Земли наступает самый продолжительный день (в южном полушарии – самый короткий день). Затем терминатор начинает приближаться

к географическим полюсам Земли, из-за чего склонение Солнца уменьшается, продолжительность дня в северном полушарии постепенно сокращается, а в южном полушарии возрастает.

В период между днями осеннего и весеннего равноденствий Южный полюс Земли повернут к Солнцу, плоскость экватора проходит севернее него, и поэтому оно находится в южной полусфере неба. Склонение Солнца отрицательно, точки его восхода (f) и захода (g) смещены в сторону точки юга (S), и теперь уже в южном полушарии Земли дневной путь Солнца продолжителен и высок, и там наступают теплые сезоны года, а в северном полушарии – холодные. В день зимнего солнцестояния (22 декабря) терминатор снова удаляется от полюсов Земли на $23^{\circ}26',5$, и поэтому склонение Солнца становится наименьшим $\delta_{\min} = -23^{\circ}26',5$ (см. рис. 25, положение $\odot 3$): в южном полушарии Земли самый продолжительный день, в северном полушарии – самый короткий. Отсюда возник термин «солнцестояние» – в эти дни рост или уменьшение склонения Солнца останавливается.

На земном экваторе день всегда продолжительнее ночи примерно на 7 минут.

Границы тепловых (климатических) поясов на Земле проведены по астрономическим признакам. В жарком поясе, границы которого простираются по обе стороны экватора, Солнце в истинный полдень обязательно проходит в зените тех местностей, географическая широта φ которых равна его склонению δ в данный день ($\varphi = \delta$). Так как склонение Солнца не бывает больше $\varepsilon = 23^{\circ}26',5$, то и границы жаркого пояса, называемые *тропиками*, расположены на географических параллелях с такой же широтой $\varphi = \delta = 23^{\circ}26',5$. В зените северного тропика ($\varphi = +23^{\circ}26',5$) Солнце проходит только в день летнего солнцестояния, а в зените южного тропика ($\varphi = -23^{\circ}26',5$) – в день зимнего солнцестояния. На земном экваторе Солнце в полдень проходит в зените в дни равноденствий ($\varphi = \delta = 0^{\circ}$). В пределах жаркого пояса Солнце при $\delta < \varphi$ кульминирует к югу от зенита, а при $\delta > \varphi$ к северу от зенита.

Холодные пояса ограничены полярными кругами, положение которых определяется условиями незаходящего и невосходящего солнца при экстремальных значениях его склонения $\delta = \varepsilon$:

$$\varphi = \pm(90^{\circ} - \varepsilon) = \pm(90^{\circ} - 23^{\circ}26',5) = \pm 66^{\circ}33',5.$$

В пределах холодных поясов Солнце в весенне-летний период бывает незаходящим [при $\delta \geq (90^\circ - \varphi)$], а в осенне-зимний период – невосходящим [при $\delta < -(90^\circ - \varphi)$]. На Северном полярном круге ($\varphi = +66^\circ 33',5$) Солнце не должно было бы заходить только в день летнего солнцестояния, а на Южном полярном круге ($\varphi = -66^\circ 33',5$) – в день зимнего солнцестояния, но из-за атмосферной рефракции Солнце на полярных кругах не заходит при $\delta \geq 22^\circ,6$, то есть на протяжении месяца (15 суток до и после солнцестояния). В день солнцестояния оно не заходит на географической широте $\varphi \geq 65^\circ,6$, а полярная ночь распространяется от полюсов до $\varphi = 67^\circ,4$, и на самих полярных кругах ее не бывает.

В умеренных тепловых поясах полярных дней и ночей не бывает, и Солнце никогда не проходит в зените.

Суточное движение Солнца на различных географических параллелях происходит так же, как и суточное движение звезд (см. § 15).

Глава III. Системы счета времени

§ 25. Принципы измерения времени

Течение времени может измеряться каким-либо регулярно повторяющимся в природе процессом. Этот процесс должен быть равномерным, чтобы установленные из его наблюдений единицы счета времени сохраняли свою продолжительность, иначе ими нельзя будет пользоваться. Вся наша жизнь связана с периодическими астрономическими явлениями природы – с чередованием дня и ночи и сезонов года, то есть с вращением Земли и ее обращением вокруг Солнца. Поэтому из астрономических наблюдений установлены две основные единицы счета времени – *сутки* и *год*.

В пределах суток течение времени регистрируется искусственными механизмами – часами, показания и ход которых контролируются в своей основе по астрономическим явлениям. Разработано несколько систем счета времени, каждая из которых имеет свое применение. Следует иметь в виду, что в астрономии ради краткости термин «система счета времени» часто заменяется термином «время». Но нужно твердо помнить, что в природе время едино и объективно, а разные его названия лишь обозначают его измерение в различных системах счета времени.

§ 26. Звездное время

Самая простая система счета времени называется *звездным временем*. Она основана на вращении Земли вокруг оси, которое можно считать равномерным, так как обнаруженные отклонения от равномерного вращения не достигают 0,005 с за сутки.

Представим себе, что мы ночью отметили момент верхней кульминации некоторой звезды и в следующую ночь повторили это наблюдение. Очевидно, что промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями звезды равен периоду вращения Земли, часто называемому *звездными сутками* (в первом приближении это верно). За время поворота Земли на 360° часовой любой звезды изменяется тоже на 360° , и поэтому в пределах звездных суток звездное время можно было бы измерять часовым углом какой-либо звезды (см. рис. 6). Однако принято измерять звездное время часовым углом точки весеннего равноденствия, так как ее экваториальные координаты (α и δ) всегда равны нулю и, кроме того, эта точка связана с Землей, поскольку она лежит на линии пересечения плоскости земного (небесного) экватора с плоскостью земной орбиты (плоскостью эклиптики), и ее положение на небе определяется прямым восхождением Солнца. Поэтому, строго говоря, звездными сутками называется промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями точки весеннего равноденствия. Из-за прецессии, то есть медленного смещения точки весеннего равноденствия к западу, звездные сутки короче периода вращения Земли на 0,0084 с, и этим различием в первом приближении можно пренебречь. Звездные сутки подразделяются на 24 звездных часа, каждый звездный час – на 60 звездных минут, а звездная минута содержит 60 звездных секунд. Они обозначаются либо русскими буквами «ч», «м», «с», либо латинскими буквами h – (час), m – (минута) и s – (секунда), проставляемыми около чисел наподобие показателя степени.

Итак, звездное время (S) измеряется часовым углом точки весеннего равноденствия ($t^\wedge$), выраженным в единицах времени, то есть, всегда

$$S = t_{\gamma^\wedge}. \quad (3.1)$$

За начало звездных суток ($S = 0^h 0^m 0^s$) принимается момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия ($t_{\gamma} = 0^h 0^m 0^s$).

При описании экваториальной системы координат с часовым углом (см. § 12) было показано, что в любой момент звездного времени S у светила с прямым восхождением α часовой угол

$$t = S - \alpha. \quad (3.2)$$

В момент верхней кульминации светила его часовой угол $t = 0$, и поэтому в этот момент звездное время

$$S = \alpha. \quad (3.3)$$

Следовательно, в каждом месте земной поверхности в произвольный момент суток в верхней кульминации находятся те светила, прямое восхождение которых равно звездному времени в этот момент, или, другими словами, звездное время в любой момент суток всегда равно прямому восхождению светил, находящихся в этот момент в верхней кульминации. Это позволяет определять прямое восхождение звезд, заранее зная расположение созвездий относительно небесного меридиана и проверять показания часов, установленных и идущих по звездному времени (они называются *звездными часами*).

В каждом пункте земной поверхности географический и небесный меридианы лежат в одной плоскости (см. § 8). Из разных пунктов земной поверхности направления на точку весеннего равноденствия параллельны между собой. Поэтому, в один и тот же физический момент звездное время на одном географическом меридиане одинаково, а на разных меридианах различно. Если в пунктах D , E и F (рис. 26), лежащих на *гринвичском меридиане* (его географическая долгота $\lambda_0 = 0^\circ = 0^h$), точка весеннего равноденствия (γ) находится в верхней кульминации, то на этом меридиане звездное время $S = t_{0\gamma} = 0^h 0^m 0^s$ (За начало счета географической долготы принят меридиан, проходящий через Гринвич и поэтому называемый *гринвичским меридианом*. В настоящее время Гринвич вошел в черту Лондона и находится на его окраине).

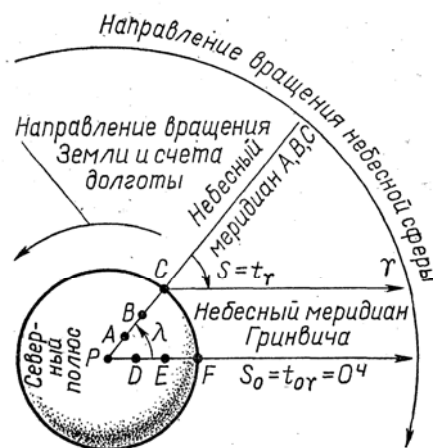


Рис. 26. Связь звездного времени с географической долготой

В этот же момент на меридиане пунктов A , B и C с географической долготой λ , отсчитываемой к востоку от Гринвича (в сторону вращения Земли), звездное время $S = t_{\gamma} = t_{0\gamma} + \lambda$, или

$$S = S_0 + \lambda, \quad (3.4)$$

то есть звездное время в любой местности отличается от звездного гринвичского времени на географическую долготу этой местности. Написав равенство (3.4) для двух пунктов с географической долготой λ_1 и λ_2 и вычтя одно из другого, получим:

$$S_2 - S_1 = \lambda_2 - \lambda_1, \quad (3.5)$$

то есть звездное время двух пунктов земной поверхности отличается на разность их географической долготы.

Из формул (3.4) и (3.5) следуют выводы: географическую долготу удобно выражать в единицах времени (как прямое восхождение и часовые углы светил); в восточных районах звездное время всегда больше, чем в западных, и если численно оно окажется меньше, то там начались новые звездные сутки; счет географической долготы проще вести от Гринвича только в одну сторону, к востоку, в направлении увеличения звездного времени.

Звездное время широко используется в астрономии и в геодезии (например, для определения географической долготы, изучения вращения Земли и т.д.), но в общественно-производственной жизни им пользоваться нельзя, так как смена дня и ночи зависит от положения Солнца относительно горизонта, а Солнце непрерывно перемещается по эклиптике, и поэтому на протяжении года начало звездных суток ($S = 0^h$) последовательно приходится на различные моменты дня и ночи. Так, в день весеннего равноденствия $S = 0^h$ вблизи полдня, а в день осеннего равноденствия – вблизи полночи. В общественно-производственной жизни счет времени ведется по Солнцу.

§ 27. Истинное солнечное время

Промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми кульминациями Солнца (точнее, центра солнечного диска) называется истинными солнечными сутками. Истинное солнечное время ($T_{\odot}$) измеряется часовым углом Солнца ($t_{\odot}$), увеличенным на 12 часов:

$$T_{\odot} = t_{\odot} + 12^h. \quad (3.6)$$

В момент верхней кульминации Солнца, называемый *истинным полднем* (середина дня), часовой угол Солнца $t_{\odot} = 0^h$ и истинное солнечное время $T_{\odot} = 12^h$. В момент нижней кульминации Солнца, называемый *истинной полночью* (середина ночи), $t_{\odot} = 12^h$, а истинное солнечное время $T_{\odot} = 24^h = 0^h$, то есть оканчиваются текущие и начинаются новые солнечные сутки.

Истинные солнечные сутки продолжительнее звездных суток примерно на 4 минуты. Допустим, что в момент весеннего равноденствия Земля находилась в положении 1 (рис. 27) и в этот момент в пункте O ее поверхности наступил истинный полдень, то есть Солнце (C) вместе с точкой весеннего равноденствия (Υ) находилось в меридиане (видимое положение Солнца на небе отмечено знаком $\odot 1$).

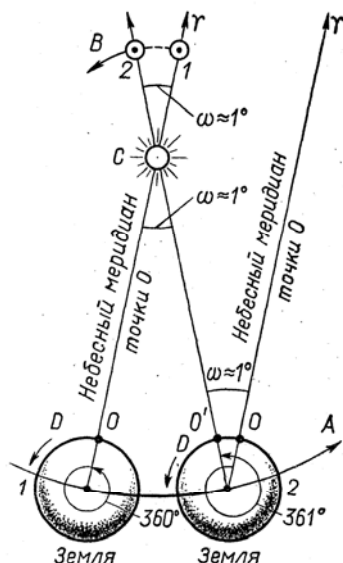


Рис. 27. Продолжительность звездных и истинных солнечных суток

По прошествии звездных суток Земля повернется (по стрелке D) на 360° и переместится по своей орбите (по стрелке A) на угол $\omega \approx 1^\circ$ в положение 2. Тогда точка весеннего равноденствия снова окажется в меридиане, а Солнце до него еще не дойдет, так как за звездные сутки оно сместилось по эклиптике к востоку (по стрелке B) на тот же угол $\omega \approx 1^\circ$, в положение $\odot 2$. Чтобы в пункте O снова наступил истинный полдень, Земле необходимо повернуться еще на угол $\omega \approx 1^\circ$ (пункт O займет положение O'), на что требуется около 4^m (вспомним, что $1^\circ = 4^m$). Таким образом, продолжительность истинных солнечных суток соответствует повороту Земли примерно на 361° .

Так как часовые углы отсчитываются по небесному экватору, то истинные солнечные сутки продолжительнее звездных суток на ту величину $\Delta\alpha$, на которую ежесуточно возрастает прямое восхождение Солнца. В разные дни года $\Delta\alpha$ неодинаково по двум причинам: во-первых, Солнце перемещается по эклиптике неравномерно, а во-вторых, эклиптика наклонена к небесному экватору под углом $\varepsilon = 23^\circ 26' 5$. Вторая причина более существенна, так как

даже при равных приращениях $\Delta\lambda$ эклиптической долготы Солнца соответствующие им приращения прямого восхождения $\Delta\alpha$ различны: вблизи точек равноденствий $\Delta\alpha < \Delta\lambda$ (рис. 28), значение $\Delta\alpha = 3^m,6$ и длительность истинных солнечных суток наименьшая; вблизи точек солнцестояний $\Delta\alpha > \Delta\lambda$ (расстояния между кругами склонения увеличиваются по мере их приближения к небесному экватору) и поэтому продолжительность истинных солнечных суток возрастает. В результате действия обеих причин продолжительность истинных солнечных суток на протяжении года изменяется в пределах около 1^m . Наибольшая продолжительность истинных солнечных суток, превышающая длительность звездных суток на $4^m,5$, бывает в декабре, вблизи дня зимнего солнцестояния, когда Солнце смещается по эклиптике быстрее, чем в июне (см. § 22).

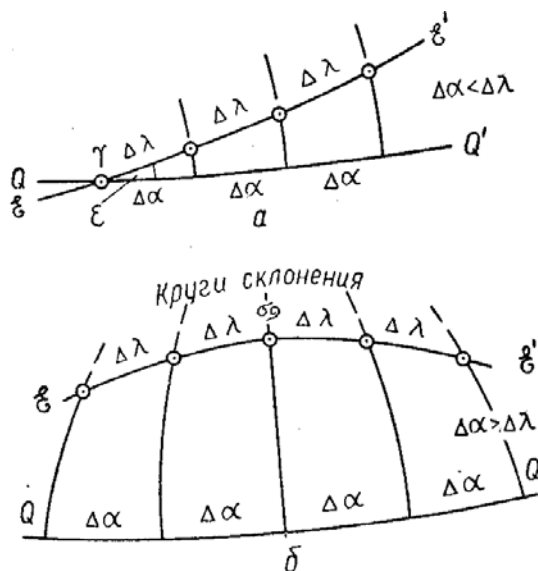


Рис. 28. Приращение $\Delta\lambda$ и $\Delta\alpha$ вблизи равноденствий (а) и вблизи солнцестояний (б): QQ' - дуга небесного экватора; $\xi\xi'$ - дуга эклиптики

Из-за непостоянства длительности истинных солнечных суток истинное солнечное время не может быть использовано в повседневной жизни, но в астрономии оно применяется для вычислений моментов восхода и захода Солнца, а также в исключительных случаях (когда нет других возможностей) для проверки часов.

Истинные солнечные сутки служат основой для создания системы счета времени, в которой продолжительность солнечных суток неизменна.

§ 28. Среднее солнечное время

На протяжении тропического года ($T\Upsilon = 365^{\text{д}},2422$) прямое восхождение Солнца изменяется на $24^{\text{ч}}$, и поэтому его среднее суточное приращение $\Delta\alpha = 24 \times 60^{\text{м}} : 365^{\text{д}},2422 = 3^{\text{м}},9426 = 3^{\text{м}}56^{\text{с}},56$, то есть средняя продолжительность истинных солнечных суток превышает длительность звездных суток на $3^{\text{м}}56^{\text{с}}$ (точнее, на $3^{\text{м}}56^{\text{с}},56$).

Средняя продолжительность истинных солнечных суток принята за единицу счета времени и названа *средними солнечными сутками* или *средними сутками*. Длительность средних суток практически неизменна, и они продолжительнее звездных суток на $3^{\text{м}}56^{\text{с}}$. Средние сутки содержат 24 средних часа, 1 средний час равен 60 средним минутам, а 1 средняя минута равна 60 средним секундам. Эти единицы счета времени, имеющие постоянную продолжительность, используются в повседневной жизни, но только прилагательные «средний» и «средняя» опускаются. Средние сутки содержат $1440^{\text{м}}$ и $86\,400^{\text{с}}$.

Полезно запомнить, что в средних единицах времени период суточного вращения Земли равен не $24^{\text{ч}}$, а $24^{\text{ч}} - 3^{\text{м}}56^{\text{с}} = 23^{\text{ч}}56^{\text{м}}04^{\text{с}}$ и, следовательно, за один календарный год продолжительностью в 365 средних суток протекает 366 звездных суток (Земля поворачивается вокруг своей оси 366 раз).

Чтобы построить систему счета среднего времени, вводят понятие *среднего экваториального солнца* – математической точки, которая равномерно перемещается по небесному экватору (в том же направлении, как и Солнце по эклиптике) и полный оборот по нему завершает за тропический год. Следовательно, среднее экваториальное солнце (В дальнейшем мы будем его называть *средним солнцем*) ежедневно смещается к востоку на $3^{\text{м}}56^{\text{с}}$. Если в какой-то момент времени среднее солнце пришло в точку весеннего равноденствия, то в этот момент его прямое восхождение $\alpha_{\text{м}} = 0^{\text{ч}}$, а затем за каждые последующие средние сутки возрастает на $3^{\text{м}}56^{\text{с}}$. Поэтому можно заранее вычислить прямое восхождение $\alpha_{\text{м}}$ среднего солнца для любого момента времени.

Среднее солнце всегда находится вблизи Солнца, которое, перемещаясь неравномерно, то несколько обгоняет среднее солнце, то немного отстает от него.

Среднее время (T_λ) измеряется часовым углом среднего солнца (t_m), увеличенным на 12^h , то есть

$$T_\lambda = t_m + 12^h. \quad (3.7)$$

Момент верхней кульминации среднего солнца называется *средним полднем*, и в этот момент $t_m = 0^h$, а среднее время $T_m = 12^h 0^m 0^s$.

Момент нижней кульминации среднего солнца называется *средней полночью*, в которую $t_m = 12^h$ и среднее время $T_m = 24^h = 0^h$. Этот момент принят за начало средних суток.

Средние сутки могут быть определены как промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями среднего солнца.

Связь между обеими системами солнечного времени устанавливается через *уравнение времени* (η), представляющее собой разность между средним временем и истинным солнечным временем.

$$\eta = T_\lambda - T_\odot. \quad (3.8)$$

(В астрономической литературе западных стран уравнением времени считается разность $T_\odot - T_\lambda$). Иными словами, уравнение времени – это поправка, которую нужно придать к истинному солнечному времени, чтобы получить среднее время.

Из формул (3.6)–(3.8) видно, что в любой момент уравнение времени

$$\eta = T_\lambda - T_\odot = t_m - t_\odot, \quad (3.9)$$

а согласно формуле (3.2)

$$t_m = S - \alpha_m \text{ и } t_\odot = S - \alpha_\odot,$$

и поэтому

$$\eta = \alpha_\odot - \alpha_m, \quad (3.10)$$

то есть уравнение времени равно разности между прямым восхождением Солнца и прямым восхождением среднего солнца.

Значения уравнения времени для каждого дня года заранее вычисляются и публикуются в астрономических календарях-ежегодниках. Непосредственно измеряя часовой угол $t_{\odot}$ Солнца и заимствуя уравнение времени η из астрономического ежегодника, легко найти среднее время

$$T_{\lambda} = T_{\odot} + \eta = t_{\odot} + 12^{\text{ч}} + \eta.$$

В истинный полдень $t_{\odot} = 0^{\text{ч}}$ и среднее время

$$T_{\lambda} = 12^{\text{ч}} + \eta. \quad (3.11)$$

Из формул (3.9) – (3.11) легко видеть, что в те дни года, когда Солнце обгоняет среднее солнце, $\alpha_{\odot} > \alpha_m$, уравнение времени $\eta > 0$, $T_{\lambda} > T_{\odot}$ и средний полдень наступает раньше истинного полдня. В дни же, когда Солнце отстает от среднего солнца, $\alpha_{\odot} < \alpha_m$, $\eta < 0$, $T_{\lambda} < T_{\odot}$ и средний полдень наступает позже истинного полдня. Наибольшие расхождения происходят 12 февраля ($\eta = +14^{\text{м}}17^{\text{с}}$ и 3–4 ноября ($\eta = -16^{\text{м}}24^{\text{с}}$). Четыре раза в год, 15–16 апреля, 13–14 июня, 1 сентября и 25 декабря, уравнение времени $\eta = 0$.

Среднее время на географическом меридиане Гринвича называют *средним, гринвичским временем* или *всемирным временем* и обозначается символом T_0 .

Это время называют также мировым или универсальным временем и часто обозначают символом UT . Заменяя на рис. 26 точку весеннего равноденствия (Υ) средним солнцем, найдем, что в любом месте земной поверхности с географической долготой λ среднее время

$$T_{\lambda} = T_0 + \lambda, \quad (3.12)$$

а различие в среднем времени T_{λ_1} и T_{λ_2} двух пунктов с географическими долготами λ_1 и λ_2 равно разности их географической долготы:

$$T_{\lambda_2} - T_{\lambda_1} = \lambda_2 - \lambda_1. \quad (3.13)$$

Формулы (3.12) и (3.13) используются в практике определения географической долготы.

Почти до конца прошлого века каждая местность пользовалась своим средним временем. В удаленных друг от друга населенных пунктах использование местного среднего времени приемлемо, но для близко расположенных пунктов крайне неудобно, так как оно различается в пределах даже одного административно-территориального деления. Например, в Московской области это различие между ее восточными и западными окраинами составляет 20^м.

§ 29. Поясное время

В практической жизни необходима такая система счета времени, которая сохраняет преимущества для удаленных друг от друга населенных пунктов и ликвидирует неудобства для близлежащих. Поэтому в 1879 г. была предложена система счета среднего времени, получившая название *поясной системы* или *поясного времени*.

В поясной системе счета времени поверхность земного шара разделена на 24 *часовых пояса*, границы которых проходят от Северного до Южного полюса Земли.

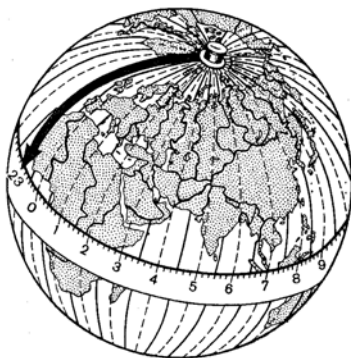


Рис. 29. Часовые пояса

Ширина каждого часового пояса в среднем близка к 15° по долготе (рис. 29). Центральные меридианы часовых поясов (показанные на рисунке прерывистыми линиями) проведены строго по географическим меридианам, отстоящим друг от друга точно на 15° , или 1 час, причем за *начальный (нулевой) меридиан* принят гринвичский ($\lambda = 0^\circ = 0^ч$). Границы часовых поясов проведены вдоль географических меридианов только в ненаселенных местностях, а в населенных – по государственным и административным границам с таким расчетом, чтобы каждое крупное административно-территориальное подразделение целиком находилось в одном часовом поясе.

Нумерация часовых поясов идет с запада к востоку, в пределах от 0 до 23: гринвичский, или западноевропейский, часовой пояс считается нулевым ($n = 0$), соседний с ним к востоку средневропейский часовой пояс считается первым ($n = 1$), далее к востоку лежит второй, или восточноевропейский, пояс ($n = 2$) и т.д. Последний, 23-й часовой пояс расположен к западу от нулевого пояса. Единицы измерения времени остаются прежними – средние сутки, час (средний), минута (средняя) и секунда (средняя).

Так как центральные меридианы часовых поясов отстоят друг от друга по долготе ровно на $1^ч(15^\circ)$, то географическая долгота (λ) центрального меридиана каждого часового пояса равна номеру (n) этого пояса, то есть целому числу часов.

На всей территории часового пояса принято одинаковое поясное время, которое является местным средним временем центрального меридиана пояса. В пределах каждого часового пояса поясное время

$$T_n = T_0 + n. \quad (3.14)$$

Разность во времени между двумя пунктами, расположенными в разных часовых поясах, определяется разностью номеров n_2 и n_1 часовых поясов:

$$T_{n_2} - T_{n_1} = n_2 - n_1, \quad (3.15)$$

причем эта разность всегда равна целому числу часов.

Из сопоставления формул (3.12) и (3.14) видно, что поясное время T_n и местное среднее время T_λ любого пункта с географической долготой λ , находящегося в часовом поясе n , связаны соотношением

$$T_n - T_\lambda = n - \lambda.$$

В принципе разность между поясным и местным средним временем не должна была бы превышать 30^m , но из-за извилистости границ часовых поясов она может достичь целого часа.

В поясной системе счета времени имеется *поясной полдень* ($T_n = 12^u$) и *поясная полночь* ($T_n = 0^u$), в которую начинается новая календарная дата. В пределах одного часового пояса поясной полдень (и поясная полночь) наступает одновременно. На центральном меридиане часового пояса поясной полдень совпадает со средним полднем ($T_n = T_\lambda = 12^u$), а поясная полночь – со средней полночью ($T_n = T_\lambda = 0^u$). На остальной территории часового пояса такого совпадения нет: в восточных районах поясные моменты наступают позже средних, а в западных районах – раньше средних.

Поясная система счета времени была принята на Международной конференции в 1884 г. и к 1888 г. введена в западных странах Европы. В России поясное время введено лишь при Советской власти с 1 июля 1919 г. По территории России проходили 11 часовых поясов от $n = 2$ по $n = 12$ включительно.

Согласно постановлению Правительства России № 725 от 31 августа 2011 г. на территории Российской Федерации вместо 11 часовых поясов установлено 9 часовых зон, вместо термина **часовой пояс** применительно к России вводится термин **часовая зона**.

§ 30. Декретное время

Для экономии электроэнергии на освещение помещений и более рационального ее распределения между промышленными и бытовыми предприятиями декретом Советского правительства от 16 июня 1930 г. часы почти на всей территории нашей страны с 16 июля 1930 г. переведены на 1 час вперед. Этот счет времени получил название *декретного времени*. В каждом часовом поясе n декретное время

$$T_d = T_b + 1^u = T_0 + n + 1^u, \quad (3.16)$$

а различие в декретном времени $T_{д_2}$ и $T_{д_1}$, двух часовых поясов n_2 и n_1 определяется разностью

$$T_{д_2} - T_{д_1} = n_2 - n_1. \quad (3.17)$$

В любой местности с географической долготой λ декретное время $T_{д}$ связано с местным средним временем T_{λ} , зависимостью

$$T_{д} - T_{\lambda} = (n - \lambda) + 1^{\text{ч}}.$$

В системе декретного времени имеются *декретный полдень* ($T_{д} = 12^{\text{ч}}$) и *декретная полночь* ($T_{д} = 0^{\text{ч}}$), с которой начинается новая календарная дата. Декретный полдень и декретная полночь наступают на 1 час раньше поясных и всегда раньше средних.

Дополнительная значительная экономия электроэнергии достигалась введением на весенне-летние месяцы года «летнего» времени, для чего ежегодно на период с 1 апреля по 30 сентября включительно стрелки часов по всей стране переводятся на 1^ч вперед. В этот период московское время

$$T_{\text{м}} = T_0 + 4^{\text{ч}},$$

но разность во времени между часовыми поясами сохраняется прежней.

Регулярное использование летнего времени в России практиковалась с 1981 г.

В настоящее время понятия декретное время и летнее время применительно к России выводятся из употребления.

Летнее время 2-го часового пояса называется *московским временем* $T_{\text{м}}$, которое отличается от гринвичского (всемирного) времени T_0 ровно на 4^ч:

$$T_{\text{м}} = T_0 + 4^{\text{ч}}. \quad (3.18)$$

Все виды междугородного транспорта и междугородней связи на территории России работают только по московскому времени.

§ 31. Атомное время

Быстрое развитие науки и техники с середины XX в. привело к созданию принципиально новых методов счета времени. Для этой цели созданы специальные приборы, в которых происходят автономные колебательные процессы высокой стабильности. Во всех этих приборах, часто называемых *стандартами частоты*, измерение времени основано на подсчете числа колебаний, возникающих в системе прибора. Так в *кварцевых часах* происходят высокочастотные колебания кварцевой пластинки под действием переменного электрического напряжения, что обеспечивает счет времени с точностью до 10^{-6} с. В *атомных часах* используется строго определенная частота электромагнитных колебаний, излучаемых атомами при квантовых переходах между энергетическими уровнями, и точность отсчета времени повышена до 10^{-11} – 10^{-12} с.

Применение в астрономии принципиально новых и притом стабильных приборов для счета времени обнаружило небольшие нарушения равномерности вращения Земли. Во-первых, из-за гравитационного воздействия Луны и Солнца период вращения Земли медленно увеличивается на $0^{\circ},0014$ за 100 лет; во-вторых, сезонные перераспределения воздушных и водных масс на Земле могут за год изменять продолжительность суток на $\pm 0^{\circ},001$; в-третьих, иногда к изменению длительности суток в пределах $\pm 0^{\circ},004$ приводят внезапные или нерегулярные нарушения равномерности вращения Земли, причины которых пока еще не выяснены. И хотя неравномерность вращения Земли ничтожна, все же длительность средних солнечных суток не строго постоянна, и эта единица времени с ее подразделениями уже не может служить эталоном в тех научных исследованиях, где необходимо знать время с точностью не ниже $10''$ с.

Поэтому разработана система измерения времени, основанная на сверхстабильном эталоне частоты, где используются электромагнитные колебания, излучаемые атомами изотопа металла цезия ^{133}Cs . Время, измеряемое в этой системе, получило название *атомного времени*. За единицу времени принята *атомная секунда*, равная продолжительности 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте квантового перехода сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия ^{133}Cs (это решение принято в 1967 г. XIII Генеральной конференцией мер и весов.)

Атомная секунда принята за единицу времени в Международной системе единиц измерений. В России основной цезиевый эталон атомного времени находится в Главном метрологическом центре Государственной службы времени и частоты.

Атомное время не зависит от вращения Земли и контролируется международным бюро времени по сравнениям показаний атомных эталонов учреждений, ведающих службой времени. Однако длительность тропического года и календарного года, которым пользуются в практической жизни, определяется из астрономических наблюдений. Небольшие аperiодические неравномерности во вращении Земли приводят к незначительным расхождениям между астрономическим средним временем и атомным временем. Поэтому регулярно 31 декабря (а иногда и 30 июня) в самом конце суток в счет времени вносится поправка, добавляющая к продолжительности года одну секунду либо исключаяющая ее.

§ 32. Преобразование систем счета времени

Все астрономические явления регистрируются либо по всемирному времени, либо по поясному или декретному времени. Вид же звездного неба зависит от звездного времени (см. § 25). Поэтому приходится выражать моменты времени астрономических явлений в различных системах счета, для чего необходимо установить связь между единицами звездного времени и единицами среднего времени.

Звездные сутки с точностью до $0^{\circ},001$ на $3^{\text{м}}56^{\text{с}},555$ короче средних суток. Следовательно, в интервале времени, равном одним средним суткам, содержится $24^{\text{ч}}$ среднего времени и $24^{\text{ч}}3^{\text{м}}56^{\text{с}},555$ или $24^{\text{ч}},065710$ звездного времени, откуда интервалы среднего времени равны:

$1^{\text{ч}} = 1^{\text{ч}},002738$ зв. времени = $1^{\text{ч}}0^{\text{м}}09^{\text{с}},856$ зв. времени,

$1^{\text{м}} = 1^{\text{м}},002738$ зв. времени = $1^{\text{м}}0^{\text{с}},164$ зв. времени, $1^{\text{с}} = 1^{\text{с}},003$ зв. времени, а интервалы звездного времени равны:

$24^{\text{ч}} = 0^{\text{д}},997270$ средн. времени = $23^{\text{ч}}56^{\text{м}}04^{\text{с}},128$ средн. времени,

$1^{\text{ч}} = 0^{\text{ч}},997270$ средн. времени = $0^{\text{ч}}59^{\text{м}}50^{\text{с}},172$ средн. времени,

$1^{\text{м}} = 0^{\text{м}},997270$ средн. времени = $0^{\text{м}}59^{\text{с}},836$ средн. времени,

$1^{\text{с}} = 0^{\text{с}},997$ средн. времени.

На основе этих соотношений вычислены таблицы для перевода интервалов среднего времени в интервалы звездного времени и

обратно; такие таблицы опубликованы в астрономических календарях и справочниках.

Чтобы найти звездное время в произвольный момент среднего времени какой-либо даты, необходимо знать значение звездного времени в полночь этой даты. Эти сведения публикуются в астрономических календарях-ежегодниках для гринвичской полночи, то есть для момента $T_0 = 0^h$ по всемирному времени.

Пусть требуется для некоторой календарной даты найти звездное время S в момент T по принятому времени в пункте с географической долготой λ . Прежде всего, используя одну из формул (3.14), (3.16) и (3.18), необходимо найти всемирное время T_0 , которое одновременно представляет собой интервал ΔT , протекший от гринвичской полночи. Этот интервал ΔT среднего времени переводится по таблицам в интервал ΔS звездного времени. Выписав из астрономического календаря-ежегодника значение звездного времени s_0 в гринвичскую полночь заданной даты, найдем для момента T_0 звездное время в Гринвиче $S_0 = s_0 + \Delta S$, и тогда согласно формуле (3.4) искомое звездное время $S = S_0 + \lambda$.

Если требуется найти время T по заданному звездному времени S , то задача решается в обратном порядке:

$S_0 = S - \lambda$; $\Delta S = S_0 - s_0$; ΔS переводится по таблицам в $\Delta T = T_0$ и затем вычисляется T .

При приближенном (с точностью до 5^m) решении подобных задач можно принять, что в среднюю полночь 22 сентября $s = 0^h$; 22 декабря $s = 6^h$; 23 марта $s = 12^h$ и 22 июня $s = 18^h$, а за каждые средние сутки звездное время уходит вперед примерно на 4^m . Тогда в любой момент местного среднего времени T_λ звездное время $S = s + T_\lambda$.

§ 33. Служба времени

Задачей службы времени является определение и хранение точного времени и передача сигналов точного времени по радио. В России эти обязанности возложены на Государственную службу времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ). Каждая астрономическая обсерватория тоже имеет свою службу времени, следящую за правильным ходом и показаниями имеющихся на обсерватории часов.

В астрономических обсерваториях используются часы различных конструкций – *стационарные* (маятниковые, кварцевые, молекулярные, атомные) и *переносные* – *хронометры* (От греческих слов «хронос» – время и «метрео» – измеряю). Стационарные часы питаются электрической энергией, а хронометры снабжены спиральной пружиной и балансиром. Для предохранения от возможных толчков при переносе каждый хронометр помещен в деревянный футляр и укреплен в нем на карданном подвесе. Хронометры всегда используются при астрономических наблюдениях в экспедициях, а часто и в самих обсерваториях.

Часы и хронометры снабжены электрическими контактами, к которым подключаются хронографы – приборы, регистрирующие моменты времени. Конструкции хронографов разнообразны, вплоть до печатающих, которые отмечают моменты времени на движущейся ленте непосредственно числами.

В каждой астрономической обсерватории имеется несколько часов и хронометров. Одни из них устанавливаются по звездному времени (звездные часы и звездные хронометры), а другие – по среднему солнечному (декретному или поясному) времени (средние часы и средние хронометры). Для этого часы (хронометры) тщательно регулируются. Однако идеальная регулировка часов (кроме атомных) невозможна, и хранение времени в любой системе счета состоит в определении *поправки*, то есть разности между моментом точного времени и показанием часов в этот же момент.

Обозначим через T момент времени в любой системе счета, а через T' – показание часов в этот момент. Тогда поправка часов

$$u = T - T'. \quad (3.19)$$

Поскольку $T = T' + u$, *поправкой часов* называют величину, которую следует придать к показанию часов, чтобы получить точное время. При $u > 0$ часы отстают, а при $u < 0$ часы спешат. Поправка даже самых хороших часов постепенно изменяется, что заставляет ее определять не менее двух раз в сутки. Изменение поправки часов за определенный интервал времени называется *ходом часов*:

$$\omega = \frac{u_2 - u_1}{T'_2 - T'_1},$$

где T_1 – показание часов и u_1 – их поправка в предшествующий момент времени T_1 , а T_2 и u_2 – те же величины в последующий момент времени T_2 .

Если интервал $(T_2 - T_1)$ выражен в сутках, то ход часов называется *суточным ходом* ω_c , а если в часах, то *часовым ходом* ω_q . Очевидно, что $\omega_q = \omega_c : 24$. При $\omega > 0$ часы отстают и их поправка увеличивается, а при $\omega < 0$ уходят вперед и их поправка уменьшается. Для астрономических работ пригодны только часы и хронометры с постоянным или почти неизменным суточным ходом, не превышающим $\omega_c = 2^c$ ($\omega_q = 0^c,083$), что позволяет вычислять их поправку u и момент точного времени T при любом показании часов T , заключенном в интервале $(T_2 - T_1)$, так как

$$u = u_1 + \omega_q (T' - T_1), \quad (3.20)$$

где интервал $(T' - T_1)$ выражен в часах.

Поправка u_s звездных часов проще всего определяется по их показаниям S' в моменты верхней кульминации звезд с известным прямым восхождением α , так как в эти моменты звездное время $S = \alpha$ и поэтому

$$u_s = S - S' = \alpha - S'. \quad (3.21)$$

Для этой цели отобрано около 40 ярких звезд, расположенных вдоль всего экваториального пояса неба и называемых главными или часовыми звездами; к ним относятся α Тельца (Альдебаран), α Малого Пса (Процион), α Льва (Регул), α Девы (Спика), α Орла (Альтаир), α Волопаса (Арктур) и некоторые другие звезды, прямое восхождение которых систематически определяется независимым (абсолютным) способом (см. § 34).

В астрономических обсерваториях регистрация показаний часов в момент верхней кульминации звезды осуществляется либо нажатием клавиши, подающей электрический сигнал на хронограф (полуавтоматическая регистрация), либо фотоэлементным устройством, установленным на астрономическом инструменте (на котором ведутся наблюдения) и срабатывающим от света звезды (автоматическая регистрация). В экспедиционных условиях, где наблюдения проводятся в универсальный инструмент, момент верхней кульминации отмечается по звездному хронометру.

Поправка u_{s0} тех же звездных часов к гринвичскому звездному времени S_0 может быть найдена различными способами. Географическая долгота λ астрономической обсерватории хорошо известна, и поэтому согласно формулам (3.21) и (3.4)

$$u_{s0} = S_0 - S' \quad (3.22)$$

и $u_s = S - S' = S_0 + \lambda - S'$, откуда $u_{s0} = u_s - \lambda$.

В экспедиционных условиях, когда географическая долгота λ места экспедиции неизвестна (и именно ее приходится определять), отмечается показание S' звездного хронометра в момент приема радиосигнала всемирного времени T_0 из Гринвича или московского времени $T_m = T_0 + 3^h$ (в весенне-летний период $T_m = T_0 + 4^h$), а затем для этого момента вычисляется гринвичское звездное время S_0 (см. § 31) и по формуле (3.22) находится поправка u_{s0} .

Поправки средних часов находят по их показаниям T' в момент приема радиосигнала московского времени T_m . Поправка часов к московскому времени $u_m = T_m - T'$, а поправка к всемирному времени $u_0 = T_m - 3^h - T'$ (в весенне-летний период ($u_0 = T_m - 4^h - T'$)).

§ 34. Определение прямого восхождения светил и географической долготы местности

Астрономические часы служат точным инструментом для определения прямого восхождения светил и географической долготы пунктов земной поверхности.

Для определения прямого восхождения небесных светил существуют *абсолютный* и *относительный (дифференциальный) методы*. Абсолютный метод применим к определению прямого восхождения только сравнительно ярких звезд (в том числе и часовых звезд), видимых в оптические инструменты днем. Такие определения проводятся в астрономических обсерваториях на меридианном круге по тщательно отрегулированным звездным часам. По показаниям S'_1 и S'_2 этих часов в моменты верхней кульминации одной и той же звезды в две последовательные ночи сразу находится суточный ход часов $\omega_c = S'_2 - S'_1$, и часовой ход ω_c . В момент верхней кульминации Солнца отмечается показание часов $S'_\odot$ и измеряется его зенитное расстояние, по которому вы-

числяется прямое восхождение $\alpha_{\odot}$ Солнца (см. § 19), а по нему поправка часов $u_s = \alpha_{\odot} - S'_{\odot}$.

Затем отмечается показание часов S' в момент верхней кульминации звезды с искомым прямым восхождением α , и так как в этот момент согласно формуле (3.20) поправка часов стала равной $u_s + \omega_q(S' - S'_{\odot})$, то звездное время

$$S = \alpha = S' + u_s + \omega_q(S' - S'_{\odot}),$$

откуда

$$\alpha = \alpha_{\odot} + (S' - S'_{\odot}) + \omega_q(S' - S'_{\odot}).$$

Относительный метод основан на том же принципе, но только вместо прямого восхождения Солнца используется уже известное прямое восхождение часовых звезд. Этот метод используется и при фотографических наблюдениях. Измеряя на негативе расстояния между изображениями светила и звезд с известным прямым восхождением α_i , находят разности $\Delta\alpha_i$ их прямых восхождений, и тогда прямое восхождение светила

$$\alpha = \alpha_i + \Delta\alpha_i.$$

Географическая долгота λ местности проще всего определяется по звездным часам, для чего достаточно найти их поправки u_s , к местному звездному времени S и u_o к гринвичскому звездному времени S_o . Тогда согласно формулам (3.4) и (3.23) географическая долгота

$$\lambda = S - S_o = u_s - u_{so}.$$

§ 35. Вычисление моментов времени и азимутов восхода и захода светил

Эти задачи решаются по экваториальным координатам α и δ светил и по географическим координатам λ и φ местности, задаваемым с точностью до 1'. Решение имеет смысл только при условии $-(90^\circ - \varphi) < \delta < +(90^\circ - \varphi)$, так как в иных случаях светило является либо незаходящим, либо невосходящим (см. § 14).

Часовые углы t светила при его восходе ($t < 0$) и заходе ($t > 0$) вычисляются по формуле (1.13):

$$\cos t = \frac{\cos z - \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta}, \quad (3.24)$$

а азимуты A точек восхода ($A < 0$) и захода ($A > 0$) – по формуле (1.14):

$$\sin A = \frac{\cos \delta}{\sin z} \cdot \sin t, \quad (3.25)$$

но при t , близких к $\pm 90^\circ$, предпочтительнее формула (1.15):

$$\cos A = \frac{\sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t - \cos \varphi \cdot \sin \delta}{\sin z}. \quad (3.26)$$

Точечные светила (звезды и планеты) при восходе и заходе видны на истинном горизонте, и их видимое зенитное расстояние $z' = 90^\circ$, а истинное зенитное расстояние $z = 90^\circ + \rho$, где $\rho = 35'$ – средняя рефракция в горизонте. Поэтому в формулах (3.24) – (3.26) следует полагать $z = 90^\circ 35'$.

Моменты восхода и захода сначала вычисляются по звездному времени

$$S = \alpha + t, \quad (3.2)$$

а затем переводятся в принятую систему счета времени.

Моментами восхода и захода Солнца считаются моменты появления из-за истинного горизонта и исчезновения за истинным горизонтом его верхнего края, видимое зенитное расстояние которого $z' = 90^\circ$ (рис. 30). В эти моменты центр солнечного диска находится на истинном зенитном расстоянии $z = 90^\circ + \rho + r_\odot$, где рефракция $\rho = 35'$ и радиус солнечного диска $r_\odot = 16'$. Поэтому в формулах (3.24) – (3.26) следует принимать $z = 90^\circ 51'$.

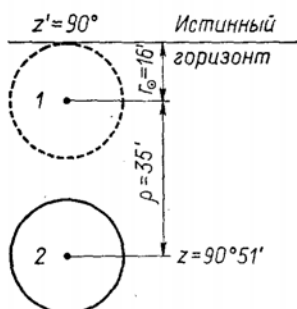


Рис. 30. Видимое (1) и истинное (2) положение Солнца в моменты его восхода и захода

Моменты восхода ($t_{\odot} < 0$) и захода ($t_{\odot} > 0$) Солнца сначала вычисляются по среднему солнечному времени

$$T_{\lambda} = t_{\odot} + 12^{\text{ч}} + \eta,$$

а затем переводятся в принятую систему счета времени. Уравнение времени η заимствуется из астрономических календарей-ежегодников на момент полдня заданной календарной даты.

При вычислении моментов восхода и захода Луны приходится еще учитывать ее кажущееся (параллактическое) смещение на небе из-за близости к Земле (рис. 31).

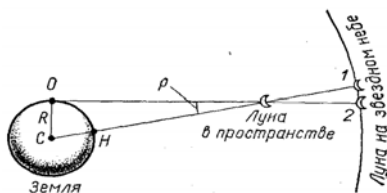


Рис. 31. Параллактическое смещение Луны

Экваториальные координаты α и δ Луны вычисляются для наблюдателя, находящегося в центре (С) Земли, или, что одно и то же, для наблюдателя которому Луна видна в зените. Хотя наблюдатель О видит восходящую Луну в горизонте (положение 2), в действительности Луна находится над горизонтом (положение 1)

на высоте $h = p$, где угол p называется горизонтальным параллаксом (у Солнца и планет горизонтальные параллаксы очень малы, а у звезд равны нулю). Таким образом, в противоположность рефракции параллакс понижает видимое положение Луны, и в формулах (3.24)–(3.26) следует принимать

$$z = 90^\circ + \rho + r - p. \quad (3.27)$$

Значение рефракции остается прежним $\rho = 35'$, но из-за обращения Луны вокруг Земли по эллиптической орбите ее видимый радиус r изменяется в пределах от $14',7$ до $16',8$ (средний $r = 15',5$), а горизонтальный параллакс p – от $53',9$ до $61',5$ (средний $p = 57'$), причем всегда $p = 3,67 r$. Поэтому формулу (3.27) можно заменить на

$$z = 90^\circ 35' - 2,67 r.$$

Моменты восхода и захода Луны вычисляются так же, как у звезд, но все вычисления приходится проводить (иногда и дважды) раздельно для восхода и захода, так как на протяжении суток экваториальные координаты Луны значительно изменяются.

Поскольку при вычислениях принимается средняя рефракция, а истинная рефракция может быть иной, точность найденных моментов восхода и захода всех светил не может превосходить 1^m . При приближенном решении этих же задач можно полагать

$$z = z' = 90^\circ.$$

§ 36. Сумерки, белые ночи, полярные дни и ночи

Промежуток времени от восхода до захода Солнца считается *продолжительностью дня*. Светлому и темному времени суток предшествуют *утренние* и *вечерние сумерки*, вызываемые рассеянием солнечного света земной атмосферой, освещаемой Солнцем, находящимся под горизонтом. Сумерки, при которых не видны даже самые яркие звезды, называются *гражданскими*. Ночь начинается с окончанием вечерних гражданских сумерек и оканчивается с началом утренних при положении центра Солнца под горизонтом на глубине 7° , то есть на высоте $h = -7^\circ$ ($z = 97^\circ$).

Астрономические вечерние сумерки оканчиваются с наступлением полной темноты, когда на небе появляются очень слабые звезды, а начинаются с первыми признаками рассвета, при высоте Солнца $h = -18^\circ$ ($z = 108^\circ$).

Продолжительность сумерек τ зависит от географической широты φ местности, а также от сезонов года и может быть вычислена по формуле

$$\cos(t + \tau) = \frac{\cos z - \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta},$$

где δ – склонение и t – часовой угол Солнца в момент захода (восхода), а z – его зенитное расстояние при окончании сумерек.

На земном экваторе, где Солнце поднимается и опускается перпендикулярно к горизонту, сумерки непродолжительны: гражданские – около 23^m , а астрономические – не более $1^h 16^m$. В удаленных же от экватора местностях суточный путь Солнца имеет сравнительно небольшой наклон к горизонту, и сумерки длятся значительно дольше. На географических полюсах длительность гражданских сумерек достигает полмесяца, а астрономических – 7 недель.

Если Солнце в нижней кульминации опускается под горизонт не более чем на 7° ($z < 97^\circ$), то с вечера до утра длятся гражданские сумерки, называемые *белыми ночами*.

Положив в формуле (1.24) $h_{\text{н}} = -7^\circ$, найдем, что в местностях с географической широтой φ белые ночи наступают при склонении Солнца $\delta \geq 83^\circ - \varphi$, и так как $\delta \leq 23^\circ, 5$, то они бывают в местностях с $\varphi \geq 59^\circ, 5$. Приняв $h_{\text{н}} = -18^\circ$, получим, что астрономические сумерки длятся всю ночь при $\delta \geq 72^\circ - \varphi$, а летние темные ночи вблизи солнцестояния возможны лишь на $\varphi \geq 48^\circ, 5$.

При $h_{\text{н}} \geq -0^\circ, 9$ ($z_{\text{н}} \leq 90^\circ 51'$) Солнце становится незаходящим, и на широте $\varphi \geq 65^\circ, 6$ бывает *полярный день*, который возможен при $\delta \geq 89^\circ$, 1 – φ . *Полярная ночь*, во время которой Солнце не восходит, наступает при полуденной высоте $S = \alpha + t$, распространяется южнее $\varphi = 67^\circ, 4$.

По астрономическим календарям-ежегодникам легко установить даты, в которые склонение Солнца удовлетворяет рассмо-

тренным выше условиям, и по ним определить длительность белых ночей, полярного дня и полярной ночи на широте ф.

§ 37. Линия перемены даты и ее учет в счете суток

В каждом месте Земли новая календарная дата наступает в полночь по принятому там времени. Из-за вращения Земли с запада к востоку новый календарный день наступает в восточных районах и постепенно переходит в западные. Но Земля – шар, и по отношению к любому месту ее поверхности всегда существуют восточные и западные районы. В каких же районах новая календарная дата впервые вступает на Землю?

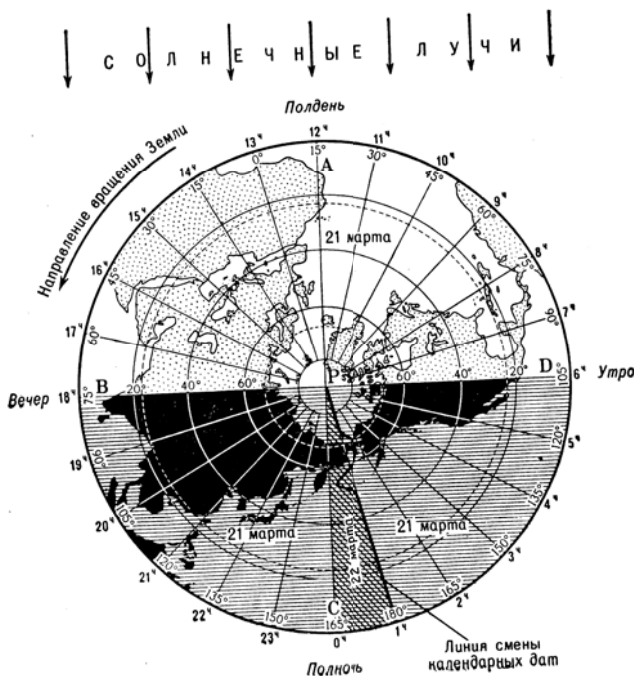


Рис. 32. Линия перемены даты

Этот вопрос весьма существен. Представим себе Землю (со стороны ее Северного полюса P), освещаемую солнечными луча-

ми (рис. 32). Пусть на географическом меридиане PA – полдень ($T_A = 12^h$) какой-то даты, например 21 марта. Тогда на меридиане PB , расположенном к востоку от PA , полдень прошел 6 часов назад, и поэтому там местное время $T_B = 18^h$ той же даты 21 марта. На меридиане же PC наступила полночь, то есть $T_C = 24^h$ старой даты 21 марта или $T_C = 0^h$ новой даты 22 марта. На меридиане PB , расположенном к западу от PA , полдень еще не наступил и местное время там $T_D = 6^h$ даты 21 марта. Далее, к западу, в направлении к меридиану PC , время еще меньше (но дата та же, 21 марта), и, наконец, получается, что на самом меридиане PC время $T_C = 0^h$ 21 марта. Какая же дата начинается на меридиане PC 21 марта или 22 марта?

Чтобы не было этой путаницы, международным соглашением установлена условная линия, называемая *линией перемены* (или *смены*) даты. Она проходит по водным просторам, нигде не касаясь суши, либо точно по земному меридиану (с $\lambda = 180^\circ$), либо в относительной близости к нему: по Чукотскому морю, Берингову проливу, Берингову морю и далее по Тихому океану (жирная линия на рис. 32). Новая календарная дата начинается на этой линии и постепенно распространяется к западу.

Западнее линии перемены даты считается одна календарная дата, а восточнее нее – предыдущая, старая дата. Так, Чукотка и Аляска разделены Беринговым проливом шириной всего лишь 85 км, и полдень там наступает почти одновременно, но календарная дата на Чукотском полуострове опережает дату Аляски на одни сутки. Отсюда следует, что каждая календарная дата существует на Земле 48 часов: она вступает на Землю на Чукотском полуострове и сходит с Земли на Аляске.

Стоит путешественнику пересечь линию перемены даты к востоку, как он попадает в старую календарную дату, образно говоря, во вчерашний день; если же он пересечет эту линию к западу, то попадет в «завтрашний» день. Пересекая линию перемены даты, необходимо учитывать это обстоятельство, иначе можно ошибиться в счете дней. В самом деле, при кругосветном путешествии в направлении с запада к востоку, в сторону вращения Земли, мы совершаем дополнительный оборот вокруг земной оси, лишний раз встречаем восход Солнца и считаем лишние сутки, которых на Земле в действительности не было. При кругосветном

путешествии в обратном направлении мы поворачиваемся вокруг земной оси на один оборот меньше, чем Земля, и недосчитываемся одних суток.

Впервые с этим столкнулись спутники Ф. Магеллана (1480–1521), возвращавшиеся в 1522 г. из кругосветного путешествия, совершенного ими в западном направлении. Подойдя с востока к островам Зеленого Мыса (вблизи западного берега Африки), они обнаружили, что прибыли туда в четверг 20 июля, в то время как в корабельном журнале значилась среда 19 июля.

Чтобы избежать подобных ошибок, в морской навигации принято следующее правило: когда корабль пересекает линию перемены даты в направлении с запада к востоку (корабль переходит в старую дату), то в судовом (вахтенном) журнале отмечается момент пересечения, но сама дата не исправляется, а на следующий день ее повторяют. Например, после 15 августа снова считают 15 августа, а затем уже 16 августа, так что двое суток значатся под одной календарной датой. При пересечении же линии перемены даты в западном направлении (корабль переходит в новую дату) на следующий день в вахтенном журнале проставляется не очередная дата, а следующая за ней (например, после 18 июля проставляется 20 июля), то есть одна календарная дата выбрасывается из счета. Этого же правила придерживается и гражданская авиация.

§ 38. Календари

Календарем (или летосчислением) называется система счета длительных промежутков времени. Свое название она получила латинского слова «календэ» (*calendae*), которым в Древнем Риме обозначался первый день каждого месяца года. В свою очередь *calendae* происходит от лат. *calare* – объявлять (о начале каждого месяца и нового года оповещалось все население).

Основой любого календаря служат длительные промежутки, определяемые по периодическим явлениям природы – лунных фаз и смене сезонов года (лунной фазой – от греч. «фазис» – проявление) называется вид Луны). Календари, основанные на лунных фаз, называются *лунными*, основанные на смене сезонов года – *солнечными*, а на обоих этих явлениях – *лунно-солнечными*. Каждый календарь обязан установить определенный порядок счета дней (солнечных суток), число суток в длительных периодах времени и

указать начало счета самих периодов. Первая задача не вызывает затруднений, третья решается тоже весьма просто, так как за начало счета можно принять любое реальное или мифическое событие. Вторая же задача решалась бы легко, если бы период смены лунных фаз, называемый *лунным месяцем*, и тропический год (период смены сезонов года) содержали в точности целое число суток. Но все три периода несоизмеримы между собой: тропический год $T_{\gamma} = 365^{\text{д}},24220 = 365^{\text{д}}5^{\text{ч}}48^{\text{м}}46^{\text{с}},08$, а лунный (или *синодический*) *месяц* $S = 29^{\text{д}},53059 = 29^{\text{д}}12^{\text{ч}}44^{\text{м}}02^{\text{с}},98$. В то же время *календарный месяц* и *календарный год* должны содержать целое число суток, чтобы начало каждого месяца и года совпадало с началом суток. Поэтому создание идеально точного календаря невозможно, и время от времени в него приходится вводить поправки.

Первый лунный календарь появился в середине третьего тысячелетия до нашей эры в Древнем Вавилоне. Тогда же была введена и *семидневная неделя*, по числу перемещающихся по созвездиям светил – Солнцу, Луне и пяти известным в те времена планетам. Эти светила обожествлялись, и дни недели посвящались им.

В дальнейшем лунный календарь был усовершенствован и ныне под названием *мусульманского календаря* принят в ряде стран Азии. Мусульманский календарный год содержит 354 дня и подразделяется на 12 месяцев, длительность которых чередуется по 30 и 29 дней и в среднем составляет 29,5 суток, то есть близка к периоду смены лунных фаз. Началом каждого месяца считается день первого появления на вечернем небе узкого лунного серпа. Для создания календаря с лунными фазами мусульманский календарный год иногда удлиняется до 355 дней, и так как он в среднем на 11 дней короче солнечного (тропического) года, то его начало последовательно смещается по всем сезонам года и приводит к тому, что за каждые 33 наших календарных года проходит 34 мусульманских года (3311 дней = 363 дня).

В Древнем Египте за три тысячелетия до нашей эры был создан солнечный календарь. Из наблюдений было установлено, что первое предутреннее появление ярких звезд после периода их невидимости повторяется примерно через 360 суток. Поэтому первый древнеегипетский календарь содержал 360 дней и состоял из 12 месяцев, по 30 дней в каждом. Для удобства счета времени эклиптика была разделена по числу дней в календарном году на

360 частей – градусов, и такое деление окружности сохранилось до наших дней.

Во втором тысячелетии до нашей эры египетские жрецы по предутреннему появлению звезд уточнили продолжительность солнечного года до 365 суток, а позднее – до 365,25 суток.

В различных системах лунно-солнечных календарей, разрабатывавшихся в древних греческих, еврейских и китайских государствах, ставилась задача согласования лунных месяцев с длительностью солнечного года. Все эти календари очень сложны.

Современный европейский календарь, принятый также и на американском континенте, является солнечным календарем и ведет свое начало от римского календаря. В VIII в. до н.э. в Древнем Риме календарный год состоял из 10 месяцев и начинался весной, с марта – месяца, названного в честь особо чтимого божества римлян, бога войны Марса. Название второго месяца года (апрель) произошло от латинского *apricus* – солнечный, так как в этом месяце становится тепло. Третий месяц – май назван именем Майи – богини Земли, а четвертый – июнь – в честь богини неба Юноны. Остальные месяцы обозначались порядковыми числительными: квинтилис (пятый), секстилис (шестой), септембер (седьмой), октобер (восьмой), новембер (девятый) и децембер (десятый).

В VII в. до н.э. римляне перешли на лунный календарь, в котором год продолжительностью 355 суток содержал 12 месяцев. Одиннадцатый месяц был назван январем в честь двуликого бога времени Януса; двенадцатый месяц февраль символизировал обряд очищения (*februarius* – месяц очищения), проводившийся незадолго до начала нового года.

Римский лунный календарь расходился с сезонами года, и, чтобы новый календарный год всегда начинался весной, в календарь через каждый год вставлялся добавочный месяц длительностью 22 или 23 дня. Помимо этого, верховные жрецы самовольно удлинляли и укорачивали продолжительность календарного года, чем окончательно запутали счет времени.

Конец путанице был положен римским диктатором Юлием Цезарем (100–44 гг. до н.э.), который в 46 г. до н.э. поручил египетскому астроному Созигену разработать новый календарь.

Созиген принял среднюю продолжительность календарного года равной по египетскому счислению 365,25 суток (365²⁶ч), на-

звав ее *юлианским годом* (в честь Юлия Цезаря). Поскольку календарный год должен содержать целое число суток, было принято считать в трех последовательных годах по 365 дней (простые), а в каждом четвертом году – 366 дней (*удлиненные* или *вискозные* года). В календарном году сохранилось 12 месяцев с прежними названиями, но с чередованием по 31 дню в нечетных по счету месяцах и по 30 дней в четных, за исключением последнего месяца года – февраля, на долю которого в простом году оставалось 29 дней, а в високосном – 30 дней.

Термин «високосный год» возник потому, что в Древнем Риме не было последовательного счета календарных дат, а нумерация дней в каждом месяце шла сначала по числу дней, оставшихся до середины месяца, и затем до начала следующего месяца (календ). Поэтому современная нам дата 24 февраля считалась у римлян шестым днем до мартовских календ. Дополнительный же день вставлялся перед 24 февраля и именовался вторым шестым днем до мартовских календ. От латинских слов *bis* (повторный) и *sextus* (шестой) произошло название удлиненного года – *bissextilis*, которое в русском языке превратилось в слово «високосный».

Юлианский календарь был введен в действие с 1 января 45 г. до н.э., которое объявлялось началом календарного года, и, таким образом, укороченный месяц февраль оказался вторым по счету. Через год римский сенат переименовал месяц квинтилис в июль (в честь Юлия Цезаря), а в 8 г. н.э. восьмой месяц (секстилис) – в август (в честь императора Августа), и ему вместо прежних 30 приписали 31 день, отняв один день от февраля. Попутно изменили число дней в четырех последних месяцах года и окончательно установили современную продолжительность месяцев.

Правило счета простых и високосных годов в юлианском календаре несложно: годы, номера которых делятся на 4, считаются високосными, а остальные – простыми. Например, 1600, 1700, 1800, 1980, 1984 годы високосные (по 366 дней), а 1603, 1807, 1981, 1985 – простые (по 365 дней).

Постепенно юлианский календарь, ныне известный под названием *старого стиля*, был принят во всех странах, где господствовала христианская религия.

В юлианском календаре сохранена древневавилонская семидневная неделя. Русские названия дней недели самобытны. Вос-

кресенье долгое время называлось седмицей (седьмым днем) или неделей (день отдыха, в который ничего не делают), понедельник – день, следующий после недели (дня отдыха), вторник – второй день, среда – середина недели, четверг – четвертый и пятница – пятый день. И только современные названия двух дней навязаны христианской религией: суббота – от древнееврейского «шаббат» (отдых, покой) и воскресенье – в честь мифического Христа, воскресшего из мертвых. У многих славянских народов (например, у украинцев и белорусов) названия шести дней недели такие же, а воскресенье до сих пор называется неделей.

§ 39. Современный европейский календарь

Юлианским календарем (старым стилем) пользовались в Европе свыше 1600 лет. Но так как тропический год ($365^{\text{д}}, 2422^{\text{ч}} = 365^{\text{д}} 5^{\text{ч}} 48^{\text{м}} 46^{\text{с}}$) короче юлианского ($365^{\text{д}}, 25 = 365^{\text{д}} 6^{\text{ч}} 0^{\text{м}} 0^{\text{с}}$ на $11^{\text{м}} 14^{\text{с}} = 0^{\text{д}}, 0078$, то по этому календарю моменты равноденствий и солнцестояний ежегодно наступают на $11^{\text{м}} 14^{\text{с}}$ раньше, чем в предыдущем году, и за каждые 128 лет переходят на предыдущую дату ($0^{\text{д}}, 0078 \cdot 128 = 0^{\text{д}}, 9984 \approx 1^{\text{д}}$). В 325 г. н.э., когда римский император Константин созвал в г. Никее (в Малой Азии) съезд высших священнослужителей для установления христианских религиозных праздников (этот съезд известен в истории под названием Никейского вселенского собора), весеннее равноденствие наступило 21 марта, а к 1570 г., то есть за 1245 лет, сместилось на 10 суток и произошло 11 марта. Такое смещение вызвало расхождение между принятыми датами религиозных праздников и явлениями природы, по которым эти праздники были установлены. Особенно это касалось пасхи – праздника, не имеющего строго фиксированной даты, а отмечаемого в первое воскресенье после полнолуния, следующего за новолунием, наступающим вслед за днем весеннего равноденствия. Поэтому в Риме был объявлен конкурс на проект реформы календаря. Наилучшим оказался и был принят проект, разработанный итальянским математиком и врачом Луиджи Лилио (1520–1576), опубликованный в 1576 г. В нем предлагалось исключить из счета 10 дней и тем самым вернуть весеннее равноденствие на 21 марта, а чтобы впредь удерживать его на этой дате, выбрасывать через каждые 400 лет из счета дней по 3 суток.

Своим распоряжением (буллой) от 24 февраля 1582 г. римский папа Григорий XIII ввел новый календарь в действие, приказав следующий день после четверга 4 октября 1582 г. считать пятницей 15 октября (вместо 5 октября) 1582 г., и, таким образом, в 1583 г. днем весеннего равноденствия снова стало 21 марта.

Реформированный календарь называется *григорианским календарем* или *новым стилем*. В нем чередование простых и високосных годов в пределах каждого столетия ведется точно так же, как и в юлианском календаре, но последний год столетия считается високосным только в том случае, если номер столетия делится на 4. Таким образом, годы 1600, 2000, 2400 по обоим календарям значатся високосными, но годы 1700, 1800, 1900 и 2100 в юлианском календаре считаются високосными (по 366 дней), а в григорианском календаре простыми (по 365 дней), и тем самым за 400 лет, например с 1600 по 2000 г., исключается трое суток.

После 1582 г. расхождение в счете дат по обоим календарям произошло в 1700 г. (до 11 дней), в 1800 г. (до 12 дней) и в 1900 г. (до 13 дней), так как в эти годы 1 марта по новому стилю считалось 29 февраля по старому стилю. Очередное расхождение в 14 дней наступит лишь 1 марта 2100 года.

Григорианский календарь был принят далеко не сразу. С 15 октября 1582 г. его ввели только в Италии, Испании, Португалии и Польше, а в других странах – в последующие годы XVI–XX столетий. В России он был узаконен лишь при Советской власти: декретом Советского правительства от 25 января 1918 г. (по старому стилю) было предписано после 31 января следующий день считать 14 февраля 1918 г., и тем самым наша страна перешла на григорианский календарь, принятый большинством культурных стран мира.

В интервале в 400 лет по григорианскому календарю содержится 303 простых года и 97 високосных лет, то есть продолжительность григорианского года составляет $(303 \times 365^a + 97 \times 366^a) : 400 = 365^d,2425$, что лишь на 0,0003 суток (на $25^c,9$) превышает длительность тропического года, и, следовательно, смещение равноденствий и солнцестояний на 1 день вперед происходит только за 3333 года ($1 \text{ день} : 0,0003 \text{ дня / год} = 3333 \text{ года}$).

Недостатком современного календаря является различное число дней в месяцах и кварталах, что несколько осложняет планиро-

вание производства. Предложено много проектов календарной реформы, из которых наиболее подходящими можно считать только два. В одном проекте предлагается разделить календарный год на 13 месяцев по 4 недели и по 28 дней в каждом. Тогда любой месяц будет начинаться с понедельника, а каждая дата – соответствовать определенному дню недели. Первый день нового года в счет дней месяца не входит, как и дополнительный день, включаемый между июнем и июлем .в високосные годы. Другой проект предлагает оставить 12 месяцев в году, но в каждом квартале первый месяц должен содержать 31 день, а два остальных – по 30 дней. Тогда каждый квартал будет начинаться с понедельника. День нового года и дополнительный день, включаемый в високосные годы, считаются нулевыми днями месяцев. Конечно, реформа календаря может быть проведена только по международному соглашению.

§ 40. Происхождение нашей, или новой, эры (н.э.)

Каждый календарь должен указать начало счета годов, называемое *эрой*. В разных календарях эры устанавливались по различным событиям, как реальным, так и мифическим. В Древнем Египте эры считались по годам воцарения фараонов, в Древнем Китае – от начала царствования императоров, в Древнем Риме – сначала по именам консулов, затем «от основания Рима» (соответствует 753 г. до н.э.) и, наконец, по императорам. В еврейском календаре за начало летосчисления принят день мифического «сотворения мира» (3671 г. до н.э.), а в средневековой Греции и на Руси счет годов тоже исчислялся от «сотворения мира», но оно было отнесено к 5508 г. до н.э. Все это сильно затрудняло хронологию событий и связи между государствами по мере их развития. Необходимо было ввести единую эру хотя бы в странах, исповадовавших христианскую религию.

Поэтому в 248 г. эры римского императора Диоклетиана римский ученый монах Дионисий Младший предложил считать годы от новой эры, названной им эрой «от Рождества Христова». Дионисий объявил, что 248 год эры Диоклетиана соответствует 532 году новой эры, и рекомендовал следующий год нумеровать 533 годом. Так возникла *новая, или наша, эра*, от которой ведется

счет лет до настоящего времени. Первый год эры Диоклетиана соответствует 284 году нашей эры.

Число 532 было взято Дионисием потому, что по нему легко предвычислять даты празднования пасхи, чем Дионисий и занимался. Как ему было известно, еще в 432 г. до н.э. древнегреческий астроном и математик Метон установил, что 235 лунных месяцев содержат 6940 дней и столько же суток заключено в 19 тропических годах. Поэтому в лунно-солнечных и солнечных календарях через каждые 19 лет одинаковые лунные фазы приходятся на одни и те же календарные числа месяца. Этот 19-летний период известен в астрономии под названием круга Луны или метонова цикла.

Так как полнолуния наступают в одни и те же календарные даты через 19 лет, пасха празднуется только в воскресенье, которое бывает раз в 7 дней, а период високоса равен 4, то Дионисий просто нашел общее наименьшее кратное этих чисел: $19 \cdot 7 \cdot 4 = 532$. Следовательно, через каждые 532 года пасха приходится в воскресенье одной и той же даты. Составив на основе этого таблицу, можно заранее знать даты пасхи на много лет вперед. Такая таблица существует и называется пасхалией.

Таким образом, новая, или наша, эра не связана ни с каким историческим событием и является такой же мифической, как и эра «от сотворения мира». Новая эра завоевала себе признание далеко не сразу. В Риме она начала внедряться с 533 г., но окончательно утвердилась лишь в середине XV в., во Франции впервые введена в VIII в., а в России – лишь с 1 января 1700 г. До этого на Руси счет годов велся «от сотворения мира», и новый календарный год начинался 1 марта (мартовский стиль), а с 1492 г. – 1 сентября (сентябрьский стиль). Указом Петра I (1672–1725) начало года было перенесено на 1 января (как и в европейских странах), но только по юлианскому календарю, и введена новая эра.

§ 41. Даты равноденствий и солнцестояний

Равноденствия и солнцестояния не всегда наступают в строго определенные даты (см. § 19). Это объясняется тем, что, во-первых, тропический год продолжительнее простого календарного года и за три таких года моменты равноденствий и солнцестояний запаздывают почти на 17^ч,5, а в високосные годы могут прийти на предыдущую дату. Так, в 1970 г. весеннее равноденствие

наступило 21 марта в $0^{\text{ч}}50^{\text{м}}$ по всемирному времени, в следующем, 1971 г. – 21 марта в $6^{\text{ч}}38^{\text{ч}}$ (то есть через $365^{\text{д}}5^{\text{ч}}48^{\text{м}}$), а в високосном 1972 г. вместо 21 марта в $12^{\text{ч}}26^{\text{м}}$ оно наступило 20 марта в $12^{\text{ч}}26^{\text{м}}$, так как один календарный день был отдан февралю.

Во-вторых, одна и та же календарная дата не сразу наступает на всей Земле, и, если весеннее равноденствие произойдет, скажем, 21 марта в $21^{\text{ч}}16^{\text{м}}$ по всемирному времени, то в России будет уже 22 марта и притом в разных часовых поясах различные часы суток. Поэтому моменты равноденствий и солнцестояний (как, впрочем, моменты всех астрономических явлений) должны указываться в определенной системе счета времени. Такой системой служит всемирное время, используемое в астрономических календарях-ежегодниках. В «Школьном астрономическом календаре» моменты явлений указываются по московскому времени.

Глава IV. Размеры и форма Земли

§ 42. Триангуляция

В первом приближении Земля шарообразна. Принцип определения ее размеров, называемый *градусными измерениями*, был впервые предложен и осуществлен в III в. до н.э. древнегреческим астрономом и географом Эратосфеном Александрийским (ок. 276–194 г. до н.э.). Пусть на одном географическом меридиане земной поверхности находятся пункты O_1 и O_2 с географической широтой φ_1 и φ_2 и взаимным линейным расстоянием l (рис. 33). Тогда длина единичной дуги (то есть дуги в 1°)

$$1^\circ = \frac{l}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{\pi R_\lambda}{180^\circ},$$

откуда радиус кривизны этой дуги

$$R_\lambda = \frac{180^\circ}{\pi(\varphi_2 - \varphi_1)} l,$$

где $(\varphi_2 - \varphi_1)$ выражено в градусах и их десятичных долях

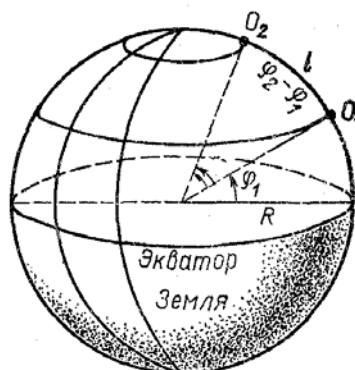


Рис. 33. Принцип градусных измерений

Если радиусы кривизны R_λ различных участков земного меридиана одинаковы, то он является полуокружностью и Земля имеет форму шара. В противном случае форма Земли отличается от шаровой.

Определение географических координат φ_1 , φ_2 и $\lambda_1 = \lambda_2$ не вызывает затруднений (см. § 18 и § 33), но непосредственное измерение значительных линейных расстояний вдоль географического меридиана невозможно из-за естественных преград: рек, болот, гор, лесов и прочего. Для

этой цели применяется метод *триангуляции* (от латинского *triangulum* – треугольник), предложенный в 1615 г. и примененный в 1617 г. голландским физиком В. Снеллем (1580–1626). В концевых пунктах O_1 и O_2 дуги, длину которой необходимо определить (рис. 34), и по обе стороны от нее (пункты $A, B, C, \dots$) устанавливают специальные вышки – геодезические сигналы (рис. 35), служащие вершинами образованной на местности сети треугольников, называемой *триангуляционной сетью*.

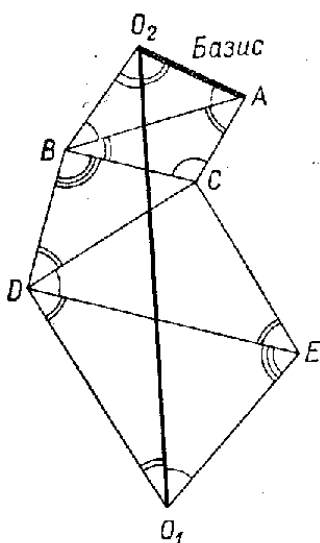


Рис. 34. Триангуляция

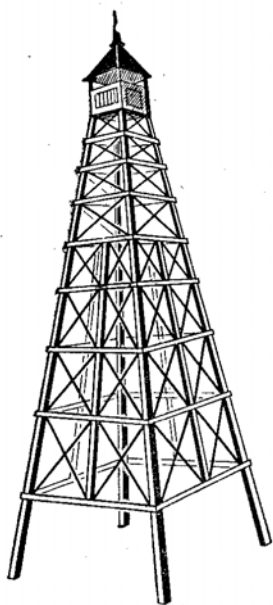


Рис. 35. Геодезический сигнал

Геодезические сигналы высотой от 20–25 м (на открытой местности) до 40–45 м (в лесной местности) устанавливаются на взаимных расстояниях 20–30 км с таким расчетом, чтобы с наблюдательной площадки каждого сигнала были видны такие же площадки соседних вышек. С этих площадок угломерными инструментами измеряются углы (с точностью до $0^{\circ},5$) между направлениями на соседние вышки, а с концевых точек (O_1 и O_2) также и углы между географическим меридианом и направлениями на ближайшие сигналы, то есть их азимуты. Сторона AO_2 треугольника, примыкающего к одной из концевых точек триангуляционной сети, располагается на ровной местности и непосредственно измеряется в линейных мерах; она называется *базисом триангуляционной сети*. Измеренные углы в треугольниках и длина базиса позволяют по формулам тригонометрии вычислить стороны треугольников и длину l искомой дуги с учетом ее кривизны.

В XVII–XIX вв. градусные измерения проводились в различных странах; в России с 1816 г. по 1855 г. под руководством

В. Я. Струве (1793–1864) была промерена дуга меридиана длиной 2800 км от устья Дуная ($\varphi = 45^\circ 20'$) до Северного Ледовитого океана ($\varphi = 70^\circ 40'$). Высочоточные градусные измерения проведены в СССР под руководством проф. Ф. Н. Красовского (1878–1948) в 30-е гг. XX в.

До 60-х гг. XX в. протяженность базиса выбиралась небольшой, от 6 до 10 км, и его длина промерялась мерными проволоками из инвара, натянутыми с постоянной по величине силой на специальных штативах. Инвар – сплав железа с никелем, обладающий ничтожно малым коэффициентом теплового расширения ($9 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). В настоящее время такие измерения почти полностью вытеснены лазерной локацией, что позволило увеличить длину базиса до 25–30 км (в пределах *видимости геодезического сигнала*) и *повысить точность измерений до ± 2 мм на каждые 10 км длины*. Длина базиса

$$b = c \frac{t_2 - t_1}{2},$$

где скорость света (радиоволн) в земной атмосфере $c = 299\,708$ км/с, t_1 – момент послылки светового или радиосигнала и t_2 – момент приема отраженного сигнала, причем длительность интервала ($t_2 - t_1$) составляет не более $2 \cdot 10^{-4}$ с, а точность отсчета моментов времени – не менее 10^{-10} с.

В настоящее время созданы триангуляционные сети со сложной радиолокационной и лазерной аппаратурой, установленной на наземных пунктах, и с отражателями на искусственных спутниках Земли (*геодезические спутники*), что позволяет одновременно измерять расстояния спутников от наземных пунктов, вычислять расстояния между пунктами и надежно изучать движение земных материков.

§ 43. Размеры и форма Земли

Многочисленными градусными измерениями установлено, что длина 1° и кривизна единичной дуги различных участков земных меридианов плавно меняются от экватора к географическим полюсам: на $\varphi = 0^\circ$ $l^\circ = 110,576$ км, на $\varphi = 45^\circ$ $l^\circ = 111,143$ км, а на $\varphi = 90^\circ$ $l^\circ = 111,696$ км. Следовательно, форма Земли близка к

двухосному эллипсоиду. Различие в полярном и экваториальном диаметрах Земли сравнительно небольшое, и поэтому земной эллипсоид принято называть *сфероидом*, то есть фигурой, мало отличающейся от шара.

На XVI съезде Международного астрономического союза, состоявшемся в Гренобле (Франция) в августе 1976 г., приняты следующие элементы земного сфероида:

экваториальный (наибольший) радиус $R_0 = 6378,140$ км,

полярный (наименьший) радиус $R_n = 6356,755$ км,

различие в радиусах $R_0 - R_n = 21,385$ км,

сжатие $\varepsilon = (R_0 - R_n) : R_0 = 1 : 298,257$.

В геодезии и особенно в гравиметрии принято считать, что фигура Земли несколько отличается от сфероида и близка к поверхности спокойного океана, продолженной под материками. (Геодезия изучает форму и размеры Земли и проводит измерительные работы на ее поверхности.) Гравиметрия изучает распределение силы тяжести на земной поверхности и, как следствие, форму Земли.) Такая фигура названа *геоидом* и представляет собой *поверхность равновесия*, или *уровненную поверхность*, в каждой точке которой нормаль совпадает с отвесной линией, что на материках бывает далеко не всегда из-за различной плотности слагающих их разнообразных пород. Однако понятие геоида для астрономии несущественно, так как разность между уровнями поверхностей геоида и земного сфероида не превышает 200 м, в то время как горы возвышаются над уровнем океана до 8000 м.

Часто вполне достаточно принимать $R_0 = 6378$ км, $R_n = 6357$ км, $\varepsilon = 1 : 298$, среднее значение $l^\circ = 111,2$ км, земной экватор за окружность длиной 40 075 км, а земные меридианы – эллипсами длиной 40 008 км. Во многих задачах астрономии Земля считается шаром, радиус которого определяется по реальному объему Земли и называется ее средним радиусом, который равен $R_c = 6371$ км.

Период вращения Земли $P = 23^{\circ}56'04'' = 86\,164^{\circ}$ (среднего времени), и поэтому линейная скорость вращения точек земного экватора

$$v_0 = \frac{2\pi R_0}{P} = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 6378140}{86164} = 465 \text{ м / с},$$

а на произвольной географической широте φ линейная скорость вращения

$$v = v_0 \cos \varphi = 465 \cos \varphi \text{ м/с.}$$

Угловая скорость вращения ω всех точек земной поверхности одинакова:

$$\omega = 15'',041 \text{ с}^{-1} = 7,2921 \cdot 10^{-5} \text{ рад / с.}$$

На ровной земной поверхности видимый горизонт всегда расположен ниже истинного горизонта (рис. 36). Дальность видимого горизонта d , то есть его расстояние от наблюдателя и угол σ между направлением между направлением к видимому горизонту и плоскостью истинного горизонта σ – *угол понижения горизонта*, зависят от высоты H наблюдателя над земной поверхностью.

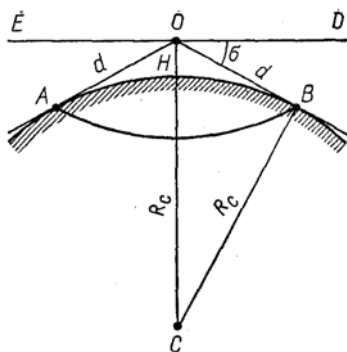


Рис. 36. Дальность видимого горизонта

Наглядное представление об этом дает следующая таблица.

Высота H , м	2	20	100	500	1000	10000
Дальность d , км	5,4	17,0	38,0	85,0	120	380
Угол понижения σ	2',5	8'	18'	40'	56'	3°

РАЗДЕЛ II. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КИНЕМАТИКЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Глава V. Строение Солнечной системы

§44. Солнечная система и планетная система

Солнечной системой называется совокупность небесных тел, движущихся вокруг Солнца, которое является динамическим центром этой системы. В Солнечную систему входят восемь *больших планет* со своими спутниками, свыше десяти *планет-карликов*, свыше 2300 *малых планет (астероидов)*, несколько десятков тысяч *комет*, множество *метеоритных тел* (камней самых разнообразных размеров) и потоки мелкой пыли (метеорные рои).

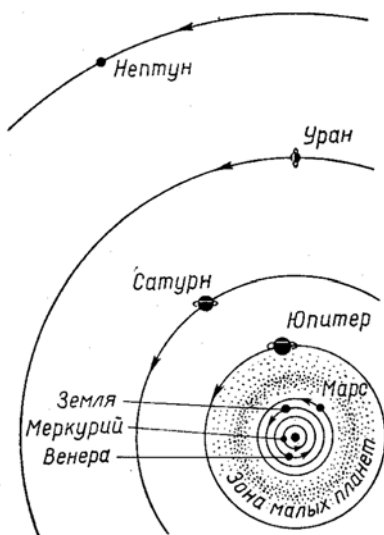


Рис. 37. Планетная система

Большие планеты удалены от Солнца в следующем порядке: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун (рис. 37). Все они темные шарообразные тела, сопоставимые по размерам с Землей. Очень часто их называют планетами, опуская прилагательное «большие». Астероиды – сравнительно небольшие твердые тела размерами, в десятки, сотни и тысячи раз меньшими диаметра Земли, и в подавляющем большинстве неправильной формы. Почти все малые планеты движутся вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера, образуя своеобразное кольцо, называемое *поясом* или *зоной* астероидов. Юпитер, Сатурн, Уран, и Нептун, движущиеся за поясом астероидов, считаются *внешними* планетами, а Меркурий, Венера, Земля и Марс – *внутренними* планетами.

Планеты и астероиды видны потому, что освещаются Солнцем. Даже самые крупные из малых планет видны только в телескоп и выглядят светящимися точками, как звезды, за что и получили название астероидов (по-гречески – звездообразных объектов). Далекие планеты Уран и Нептун, скудно освещаемые Солнцем, также доступны наблюдениям лишь в телескопы. Блеск Урана почти 6^m , Нептуна близок к 8^m . Более близкие к Солнцу планеты, обильно освещаемые солнечными лучами, видны невооруженным глазом. Поэтому уже древним народам было известно пять планет: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер Сатурн, и их заметное перемещение по звездному небу дало основание назвать их планетами (от греч. «планэтэс» – блуждающая).

Все планеты и астероиды обращаются вокруг Солнца в направлении движения Земли, которое считается прямым. Они образуют планетную систему, являющуюся частью Солнечной системы. Радиус планетной системы близок к $4,5 \cdot 10^9$ км и определяется расстоянием Нептуна от Солнца, превышающим расстояние между Землей и Солнцем почти в 30 раз. И все же радиус планетной системы почти в 9000 раз меньше расстояния до ближайшей яркой звезды α Центавра.

В 1992 г. астрономами за орбитой Плутона был обнаружены несколько объектов с размерами сравнимыми с размерами Плутона (их вместе с Плутоном отнесли к разряду планет-карликов) и протяженный пояс малых небесных тел с размерами сотни километров, которые вместе с планетами обращаются вокруг Солнца.

В пространстве соседние планеты отделены друг от друга расстояниями в десятки и сотни миллионов километров.

Планеты перемещаются на небе по зодиакальным созвездиям вблизи эклиптики, что доказывает очень малые наклонения их орбит к плоскости земной орбиты, и поэтому в первом приближении планетная система может считаться плоской.

§ 45. Видимое движение планет

Большую часть времени планеты перемещаются по зодиакальным созвездиям в направлении с запада к востоку (*прямое движение*), но постепенно их движение замедляется, они останавливаются (наступает *стояние*), затем некоторое время движутся с востока к западу (*попятное движение*), снова останавливаются и после этого продолжают прямое движение. Таким образом, видимый путь планеты на небе петлеобразен (рис. 38). Размеры описываемых планетами петель различны.

У Меркурия дуга попятного движения составляет около 13 дней (22^a), у Венеры – примерно 16° (40^a), у Марса близка к 15° (79^a), у Юпитера – немногим более 10° (120^a), у Сатурна – приблизительно 7° (136^a). В скобках приведена средняя продолжительность попятного движения.

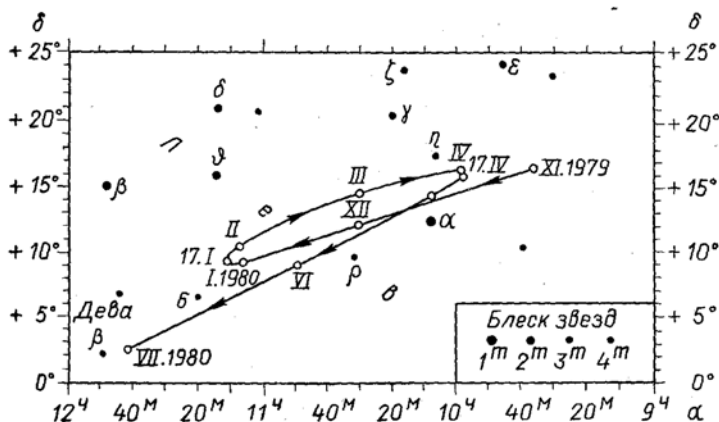


Рис. 38. Видимый петлеобразный путь Марса по созвездию Льва в 1979-1980 гг. (римские цифры обозначают первые числа месяцев)

Петлеобразные участки видимого пути планет могут располагаться в разных зодиакальных созвездиях, но в их расположении имеется существенное различие. Весь пояс зодиакальных созвездий Марс обходит за 687 суток, Юпитер – почти за 12 лет, а Сатурн – за 29,5 года. Эти три планеты периодически бывают вблизи Солнца и тогда не видны, затем постепенно отходят от него к западу и описывают петлю в области неба, противоположной Солнцу. Эти планеты бывают видны в различные часы темного времени суток. Аналогично движутся Уран, Нептун и Плутон.

Меркурий и Венера всегда находятся вблизи Солнца, удаляясь от него попеременно к западу и к востоку не более 28° (Меркурий) и 48° (Венера) и вместе с ним за год обходят весь Зодиак. Благодаря близости к Солнцу эти две планеты бывают видны либо в восточной области неба под утро, либо в западной стороне по вечерам. Их попятное движение происходит тоже вблизи Солнца. Таким образом, видимое движение Меркурия и Венеры отличается от видимого движения остальных планет.

§ 46. Геоцентрические системы мира

Древнегреческие мыслители, пытаясь представить себе строение мира (Вселенной) и объяснить видимые движения небесных светил, создавали геометрические модели (построения), известные под названием *геоцентрических систем мира*, в которых центром Вселенной считалась неподвижная Земля. Такой взгляд на природу в те времена был вполне закономерен, так как непосредственно вытекал из наблюдения равномерного суточного вращения неба. Равномерное движение по окружности считалось совершенным (идеальным) и приписывалось всем небесным светилам. Чтобы объяснить перемещение Солнца, Луны и петлеобразное движение планет и рассчитывать их положение среди звезд, приходилось создавать сложные построения из геометрических сфер, различных по своим размерам. Каждое из этих светил считалось находящимся на своей собственной равномерно вращающейся сфере, центр которой располагался на поверхности другой равномерно вращающейся сферы. При необходимости число сфер увеличивалось, и последняя сфера наибольшего радиуса считалась вращающейся вокруг Земли.

Древнегреческий математик и астроном Евдокс (около 408–355 гг. до н.э.) объяснял петлеобразные движения планет комбинацией 26 геометрических сфер. Выдающемуся философу Аристотелю (384–322 гг. до н.э.) для повышения точности предсказания положения планет пришлось увеличить число сфер до 56, причем он считал их реально существующими прозрачными и непрозрачными. Считая шарообразную Землю центром Вселенной, ограниченной хрустальной сферой со звездами, Аристотель учил о резком отличии всего небесного от земного: небесные светила состоят из эфира – особого светящегося, невесомого, неизменного вещества и движутся равномерно по кругам; движущееся тело не может быть центром кругового движения других тел, поскольку их пути тогда не будут круговыми.

В III в. до н.э. Аристарх Самосский (около 310–230 гг. до н.э.) из наблюдений и сложных геометрических построений нашел, что Солнце по объему больше Земли примерно в 340 раз, и на основе этого выдвинул учение об обращении Земли вокруг Солнца и ее суточном вращении. Но состояние науки того времени и авторитет Аристотеля не позволили воспринять правильного учения Аристарха.

Многовековые астрономические наблюдения были подытожены во II в. н.э. (около 140 г.) выдающимся александрийским астрономом Клавдием Птолемеем (около 87–165 гг.), который построил свою геоцентрическую систему мира и разработал математическую теорию движения Солнца, Луны и планет, позволившую предвычислять видимые положения этих светил с большой для того времени точностью.

Разработанная Птолемеем геоцентрическая система мира очень сложна. Ее упрощенная схема представлена на рис. 39. В соответствии со скоростью видимого перемещения светил Птолемеи расположил их в следующей последовательности от Земли: Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн и звезды, находящиеся на сфере, ограничивающей Вселенную. С тех пор Меркурий и Венера, расположенные в системе Птолемея ниже Солнца, стали называться *нижними* планетами, а остальные планеты – *верхними*. Это разделение планет на нижние и верхние сохранилось до сих пор, но только теперь их разграничивает орбита Земли. Нельзя отождествлять нижние планеты с внутренними и верхние – внешними (см. § 44).



Рис. 39. Геоцентрическая система мира Птолемея

В системе Птолемея восход и заход светил объясняется точным вращением сферы со звездами вокруг Земли. Солнце и Луна равномерно движутся вокруг Земли в прямом направлении (с запада к востоку) по большим кругам – *деферентам*, а планеты тоже равномерно и в прямом направлении – по малым кругам – *эпициклам*, центры которых равномерно движутся тоже в прямом направлении по деферентам. Петлеобразное движение планет объяснялось сочетанием их движения по эпициклам с движением эпициклов по деферентам. Чтобы объяснить видимое движение нижних планет, Меркурия и Венеры, Птолемей вынужден был расположить центры их эпициклов на одной прямой, соединяющей Землю с Солнцем, и считать периоды их обращения по деферентам, равными, как и у Солнца, одному году. Эпициклы же верхних планет располагались иначе, и периоды их обращения по деферентам были различными, но зато планета должна была двигаться по ближайшей к Земле дуге эпицикла (попятное движение) именно в тот период времени, когда сам эпицикл располагался в стороне неба, противоположной Солнцу. Таким образом, в системе Птолемея движение всех планет фактически связывалось с Солнцем, а не с Землей.

Христианство, быстро распространявшееся во II–IV в. н.э. в Европе, постепенно превратилось в государственную религию многих европейских государств, стало мощным орудием правящего класса феодалов и надолго затормозило развитие живой мысли в Европе. Руководители церкви объявили учение Аристотеля о противоположности земного небесному и геоцентрическую систему мира Птолемея непререкаемыми научными истинами, подтверждающими Священное писание о божественном сотворении Земли и всего мира ради человека.

Развивающееся мореплавание требовало для ориентировки кораблей вдали от берегов составления астрономических таблиц, в которых были бы указаны видимые положения планет на много лет вперед. Такие планетные таблицы вычислялись по геоцентрической системе Птолемея, но со временем, при возрастающей точности наблюдений, обнаруживались большие расхождения между вычисленными и наблюдаемыми положениями планет. К середине XIII в. несостоятельность системы Птолемея стала очевидной.

§ 47. Эпоха Возрождения и революция в астрономии

На рубеже XIII и XI вв. в недрах феодального общества начали зарождаться предпосылки нового общественного строя – капитализма. К концу XIV – началу XV в. в Европе стали складываться новые общественные, капиталистические отношения. Богатеющим предпринимателям, купцам и ремесленникам нужны новые рынки для приобретения сырья и сбыта товаров. Началась борьба крепнущей буржуазии против феодального строя, сковывавшего развитие капиталистических отношений. Эта борьба развертывалась не только в экономике, но и в идеологии, в мировоззрении, так как на основе старого мировоззрения невозможно было победить феодализм. В Европе наступила эпоха Возрождения.

Величайший прогрессивный переворот был произведен и в астрономии – науке, не только необходимой для производственной жизни, но и идеологической, ниспровергающей мистически-религиозные вымыслы о строении Вселенной. Этот переворот, положивший начало революционным преобразованиям в естествознании, совершил великий польский ученый Николай Копер-

ник (1473–1543), создавший качественно новую, *гелиоцентрическую систему мира*.

Свою теорию Коперник обосновал в книге «О вращении небесных сфер», законченной к 1535 г. и изданной в 1543 г. Сущность теории Коперника состоит в следующем:

1) Земля не центр мира, а самая обычная планета, не отличающаяся от других планет;

2) центром мира является Солнце, вокруг которого по круговым орбитам в прямом направлении равномерно движутся планеты, в том числе и Земля (рис. 40);

3) видимое годичное движение Солнца по эклиптике нереально и есть лишь отражение действительного годового обращения Земли вокруг Солнца;

4) Земля вращается с запада к востоку вокруг своей оси, наклоненной к плоскости земной орбиты;

5) вокруг Земли движется только Луна;

6) петлеобразное движение верхних планет и их стояние лишь кажущиеся явления и объясняются сочетанием прямого движения планет с прямым движением Земли, с которой ведутся наблюдения.



Рис. 40. Гелиоцентрическая система мира Коперника

По периодически повторяющимся расположениям планет на небе относительно Солнца и по размерам петель их попятных движений Коперник вычислил расстояния планет от Солнца, приняв за единицу измерения радиус земной орбиты: Меркурий – 0,38; Венера – 0,72; Земля – 1,00; Марс – 1,52; Юпитер – 5,22; Сатурн – 9,18. Эти значения расстояний близки к современным.

Правда, прямых доказательств суточному вращению Земли и ее годовому обращению вокруг Солнца Коперник привести не мог, так как уровень развития науки того времени не позволял этого сделать, но гениально простое объяснение видимого движения Солнца и планет убеждало в справедливости его теории.

Учением Коперника Земля из центра мира была «разжалована» в обычную планету, чем подрывались привычные многовековые религиозные представления о мире и учение Аристотеля о различии земного и небесного, активно поддерживавшееся церковью.

Главная и величайшая заслуга Коперника перед человечеством четко выражена Фридрихом Энгельсом (1820–1895): «Революционным актом, которым исследование природы заявило о своей независимости... было издание бессмертного творения, в котором Коперник бросил... вызов церковному авторитету в вопросах природы. Отсюда начинается свое летоисчисление освобождение естествознания от теологии... с этого времени пошло гигантскими шагами также и развитие наук...».

§ 48. Борьба за гелиоцентрическое мировоззрение

Простота и стройность коперниковой системы мира быстро нашла себе сторонников. Пока они были немногочисленными, а само новое учение широко не пропагандировалось, церковные власти не обращали на него особого внимания, и в 1566 г. книга Коперника вышла вторым изданием. Но когда к концу XVI в. коперниковские идеи стали широко распространяться, церковники увидели в них подрыв христианской веры, поддерживавшей феодальный строй.

Одним из наиболее страстных распространителей учения Коперника был итальянский философ Джордано Бруно (1548–1600), бывший монах, лично убедившийся в лживости религии. Он вел открытую борьбу против философии Аристотеля, геоцентризма Птолемея и лицемерия духовенства, пропагандируя и развивая учение Коперника. В своих публичных выступлениях и книгах Бруно высказывал необычные для той эпохи воззрения на природу звезд, справедливо полагая их далекими солнцами, движущимися в беспредельном пространстве Вселенной. По мысли Бруно,

многие звезды окружены планетами, на которых, как и на Земле, существует разумная жизнь.

За пропаганду материалистических идей Бруно был арестован инквизицией и после восьмилетнего заключения и пыток сожжен 17 февраля 1600 г. на костре в Риме в присутствии главы католической церкви папы Климения VIII. В 1889 г. на площади Цветов в Риме был установлен памятник Джордано Бруно с надписью: «9 июня 1889 г. Джордано Бруно. От предвиденного им столетия, на том месте, где был зажжен костер».

Дальнейшее развитие и пропаганда коперниканского учения в ту эпоху связано с именами двух великих ученых – итальянского физика и астронома Галилео Галилея (1564–1642) и австрийского математика и астронома Иоганна Кеплера (1572–1630).

Галилей был первым ученым, кто применил телескоп к изучению небесных светил. В мае 1609 г. он узнал о появлении в Голландии зрительных труб и вскоре сам изготовил из оптических линз несколько небольших телескопов. Наилучший из них имел диаметр 54 мм, длину 1245 мм и давал увеличение в 30 раз. С этим телескопом Галилей сделал свои знаменитые астрономические открытия, подтвердившие учение Коперника и разрушившие авторитет Аристотеля и Птолемея. В августе 1609 г. он открыл на поверхности Луны горы и темные низменности, впоследствии названные морями. Такие названия низменностям дал польский астроном Ян Гевелий (1611–1686) в своей книге «Селенография», опубликованной в 1647 г. Рухнуло учение Аристотеля о коренном отличии небесного от Земного, о светоносном веществе – эфире, из которого якобы состоят небесные светила. Луна оказалась таким же материальным холодным телом, как и Земля. В конце 1609 г. и начале 1610 г. Галилей исследовал в телескоп Млечный Путь, объявленный Аристотелем туманным кольцом в земной атмосфере, и опроверг это мнение: Млечный Путь оказался сгущением колоссального множества слабых звезд. 7 января 1610 г. Галилей в телескоп обнаружил у Юпитера четырех спутников, примерно 5-й звездной величины, и до 26 января 1610 г. тщательно следил за их движением. Это открытие доказывало возможность движущегося тела (Юпитер) быть центром движения других тел и опровергало учение Аристотеля о том, что центром движения может быть только неподвижное тело. Следовательно, и Земля может об-

рашаться вокруг Солнца, хотя сама является центром движения Луны. Эти свои открытия Галилей опубликовал в марте 1610 г. в «Звездном вестнике», в котором смело доказывал справедливость коперниканского учения.

Осенью 1610 г. Галилей открыл пятна на Солнце и несколько позже (по их перемещению) обнаружил его осевое вращение. Той же осенью Галилей обнаружил фазы Венеры (рис. 41). Сами фазы свидетельствовали о сходстве Венеры с Землей и Луной, а последовательность их смены доказывала обращение планеты вокруг Солнца.

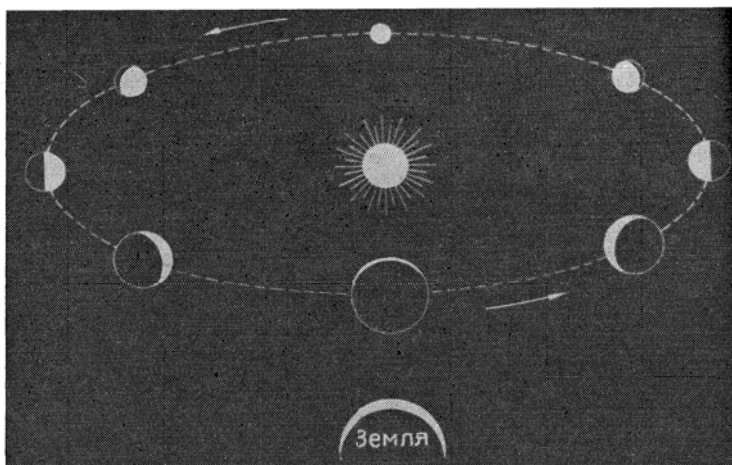


Рис. 41. Фазы Венеры

Открытия Галилея нанесли мощный удар по религиозно-схоластическому геоцентрическому мировоззрению и открыли путь к признанию учения Коперника. Свои открытия Галилей пропагандировал не только в публикуемых им книгах, но и непосредственной демонстрацией в телескоп. Это встревожило духовенство, так как речь уже шла не о личных взглядах ученого на природу, а о массовой пропаганде гелиоцентрического мировоззрения. В 1616 г. книги Коперника, Бруно, Галилея и их последователей были запрещены. Но Галилей продолжал борьбу за материалистическое мировоззрение, за что в 1633 г. уже почти

в 70-летнем возрасте, был арестован и предан суду инквизиции. Церковный суд заставил Галилея отречься от своих «заблуждений» и приговорил его к пожизненному заключению, замененному запрещением выезда, изменения места жительства. До конца своей жизни Галилей находился под гласным надзором шпионов инквизиции. Лишь в 1835 г. по настоянию ученых католическая церковь сняла запрет с книг коперниканцев, а суровый приговор Галилею отменила в 1972 г.(!).

С учением Коперника боролась и православная церковь. Рукописное описание гелиоцентрической системы мира появилось в России в середине XVII в., но было запрещено к печати церковной цензурой. Только в 1717 г. по распоряжению Петра I был издан перевод книги голландского физика и астронома Х. Гюйгенса (1629–1695) с изложением коперниканского учения, и церковники вынуждены были несколько ослабить борьбу против коперниканства. После смерти Петра I православное духовенство резко активизировало преследование сторонников гелиоцентризма. Святейший синод (высший орган церковного управления в России) запретил пропагандировать в любой форме учение Коперника. Первым открыто выступил против этого запрещения М. В. Ломоносов (1711–1765), который добивался свободы научных мнений от цензуры духовенства. Во многих своих произведениях, например в «Письме о пользе стекла» (1752), он открыто пропагандировал гелиоцентрическую систему мира. В 1755 г. по инициативе Ломоносова Академия наук начала издавать научно-популярный журнал «Ежемесячные сочинения, к пользе и увеселению служащие», в котором печатались статьи по естественным наукам, в том числе и по астрономии. Синод объявил этот журнал безбожным, а в 1757 г. подал императрице Елизавете просьбу о наказании Ломоносова за «богопротивную» деятельность. Эта просьба осталась без последствий.

Активная деятельность Ломоносова по защите и пропаганде учения Коперника привела к тому, что оно получило признание в России и с 1762 г. стало излагаться в книгах и статьях для широкого круга читателей.

Гелиоцентрическое мировоззрение получило подтверждение открытием И. Кеплером законов движения планет.

§ 49. Законы движения планет

Иоганн Кеплер был горячим сторонником гелиоцентрической системы мира и вначале пытался ее усовершенствовать чисто геометрическими способами, изложенными им в своей первой книге «Предвестник космографических сочинений», известной также под названием «Тайна космографии» (1596). Попытки Кеплера оказались неудачными, но сложные расчеты, содержащиеся в книге, дали Кеплеру имя и обратили на него внимание знаменитого датского астронома Тихо Браге (1546–1601), переехавшего в 1597 г. из Дании в Прагу. До этого времени Браге с 1576 г. работал в астрономической обсерватории «Ураниборг» («Небесный замок») на острове Хвене в Зундском проливе. В июне 1600 г. Кеплер по приглашению Тихо Браге прибыл в Прагу, чтобы принять участие в составлении новых планетных таблиц. Материалом для таблиц послужили наблюдения планет, проведенные Тихо Браге в 1580–1597 гг. в Ураниборге и в 1599–1600 гг. в Бенатеке, недалеко от Праги. К этим наблюдениям Кеплер добавил свои наблюдения Марса, выполненные в 1602 г. и 1604 г. В итоге Кеплер располагал записями наблюдений Марса за 12 периодов его обращения вокруг Солнца.

Используя вычисления Коперника, Кеплер сначала изобразил орбиту Земли окружностью с радиусом 1, а чтобы объяснить неравномерное движение Солнца по эклиптике, сместил его из центра земной орбиты на $1/59$ (или 0,017) долю ее радиуса. Далее он принял, что Марс должен находиться в том же месте пространства, если между наблюдениями прошел звездный период обращения $T = 1,881$ года. Поэтому, если в некоторый момент времени, когда Земля находилась в точке $З_1$, Марс наблюдался в направлении $т_1$, а по прошествии 1,881 года, когда Земля находилась в точке $З_2$ – наблюдался в направлении $т_2$, то точка пересечения М обоих направлений $З_1т_1$ и $З_2т_2$ дает положение Марса в пространстве (см. Рис. XXX). Так шаг за шагом Кеплеру удалось построить наблюдаемую орбиту Марса, которая оказалась не окружностью. Лучшее других подошла эллиптическая орбита с Солнцем в одном из ее фокусов и эксцентриситетом $e = 0,091$. Измеряя расстояние от одной до другой точки орбиты он нашел, что скорость движения Марса по орбите неравномерная. Тогда Кеплер отверг многовековое убеждение в круговом и равномерном движении планет.

Далее он отверг предположение о движении Земли по окружности со смещенным центром и определил, что Земля тоже движется по эллиптической орбите с небольшим эксцентриситетом $e = 0,017 = 1/59$ и ее движение, как и Марса, неравномерное. То же относится и к другим планетам.

Открытые Кеплером закономерности в движении планет были им опубликованы в книге «Новая астрономия» (1609) и ныне известны под названием *первого и второго эмпирических законов Кеплера*.

Первый закон. *Все планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце.*

Следовательно, орбиты всех планет имеют один общий фокус, расположенный в центре Солнца, а плоскости орбит наклонены друг к другу и пересекаются по прямым линиям, проходящим через него.

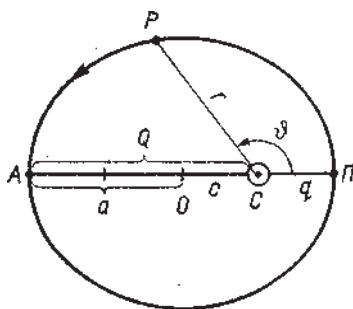


Рис. 42. Эллиптическая орбита

На рис. 42 изображена эллиптическая орбита с Солнцем (C) в одном из ее фокусов. Ее большая ось $AP = 2a$, центр – O, *большая полуось* $AO = OP = a$ и полуфокальное расстояние $OC = c$. Ближайшая к Солнцу точка (П) орбиты называется *перигелием*, а наиболее удаленная (A) – *афелием*; обе эти точки лежат на большой оси орбиты и именуются *апсидами*, а сама большая ось – *линией апсид*. (Названия происходят от греческих слов «пери» – около, «апо» – вдали» «гелиос» – Солнце и «апсис» – свод, выступ, «афелий» – искаженное «апогелий».)

При движении планеты (P) вокруг Солнца ее *гелиоцентрическое расстояние* (расстояние от Солнца), называемое *радиус-вектором* ($r = CP$), изменяется, и в любой момент времени положение планеты на орбите определяется радиус-вектором (r) и *истинной аномалией* ($\theta = \angle PCP$), то есть угловым удалением от перигелия, отсчитываемым в сторону движения планеты. Радиус-вектор r и истинная аномалия θ связаны между собой уравнением эллипса:

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}, \quad (5.1)$$

где a – большая полуось и $e = c/a$ – эксцентриситет орбиты.

За сидерический период обращения истинная аномалия θ изменяется в пределах от 0 до 360° , а радиус-вектор r от наименьшего значения q (при $\theta = 0^\circ$), называемого *перигельным расстоянием* ($q = CP$), до наибольшего значения Q (при $\theta = 180^\circ$) – *афелийного расстояния* ($Q = CA$). Легко видеть, что перигельное расстояние

$$q = a - c = a(1 - e), \quad (5.2)$$

афелийное расстояние

$$Q = a + c = a(1 + e), \quad (5.3)$$

a – большая полуось орбиты

$$a = \frac{q + Q}{2}$$

и представляет собой среднее расстояние планеты от Солнца.

Среднее гелиоцентрическое расстояние Земли, равное большой полуоси (a_0) ее орбиты, принимается за единицу измерения расстояний в Солнечной системе и называется *астрономической единицей* (а. е.). По современным измерениям астрономическая единица $a_0 = 1$ а. е. = $149,6 \cdot 10^6$ км.

Второй закон (закон площадей). Радиус-вектор планеты описывает площади, прямо пропорциональные промежуткам времени. Если за промежуток времени Δt_1 планета пройдет путь P_1P_2 (рис. 43), а за промежуток времени Δt_2 – путь P_3P_4 , то за те же промежутки времени радиус-вектор планеты опишет площади σ_1 (площадь сектора P_1CP_2) и σ_2 (площадь сектора P_3CP_4), причем

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}. \quad (5.4)$$

Площадь, описываемая радиус-вектором планеты в единицу времени, называется ее *секториальной скоростью*. Из равенства (5.4) следует, что секториальная скорость

$$v = \frac{\sigma_1}{\Delta t_1} = \frac{\sigma_2}{\Delta t_2} = \dots = \frac{\sigma_n}{\Delta t_n} = \text{const.}$$

Поэтому второй закон Кеплера часто формулируют так: *секториальная скорость планеты есть величина постоянная*.

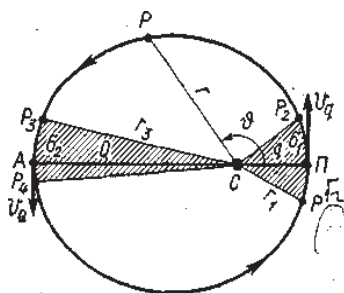


Рис. 43. Второй закон Кеплера

Так как за сидерический период обращения T планеты ее радиус-вектор описывает площадь эллипса

$$\sigma = \pi a b = \pi a^2 \sqrt{1 - e^2},$$

то секториальная скорость

$$v = \frac{\sigma}{T} = \frac{\pi a^2 \sqrt{1-e^2}}{T}.$$

Второй закон Кеплера является частным случаем более общего закона сохранения момента количества движения (момента импульса). Поэтому наибольшей скоростью v_q планета обладает в перигелии, а наименьшей v_o – в афелии. Между апсидами скорость планеты плавно изменяется, уменьшаясь с увеличением ее радиус-вектора.

Оба закона Кеплера решают задачу движения каждой планеты в отдельности. Естественно, что у Кеплера возникла мысль о существовании закономерности, связывающей все планеты в единую стройную планетную систему. Лишь в 1618 г. он нашел и опубликовал в книге «Гармонии мира» (1619) эту закономерность, известную под названием третьего эмпирического закона Кеплера.

Третий закон. *Квадраты сидерических периодов обращения планет прямо пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца (кубам больших полуосей их орбит).*

Если у одной планеты сидерический период обращения T_1 среднее гелиоцентрическое расстояние a_1 , а у другой планеты аналогичные величины T_2 и a_2 , то

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (5.5)$$

откуда

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = \frac{T_3^2}{a_3^3} = \dots = \frac{T^2}{a^3} = C \quad (5.6)$$

есть величина постоянная для всей Солнечной системы и называется *постоянной третьего закона Кеплера*, численное значение, которой зависит от принятых единиц измерения. Так, если выражать T в периодах обращения Земли (в звездных годах) и a в астрономических единицах (а. е.), то для Земли $T = 1$ и $a = 1$, откуда $C = 1$, и тогда для любой планеты

$$T^2 = a^3, \quad (5.7)$$

что позволяет по известным из наблюдений периодам обращения (в звездных годах) небесных тел вокруг Солнца сразу вычислять их средние гелиоцентрические расстояния (в а. е.).

В выражение третьего закона Кеплера не входят значения эксцентриситетов орбит. Поэтому, какую бы вытянутость эллиптические орбиты ни имели, при равных больших полуосях орбит периоды обращения по ним одинаковы.

В силу исторической традиции законы Кеплера до сих пор формулируются как законы движения планет, но в действительности их применение значительно шире (см. гл. VI–VIII).

§ 50. Элементы эллиптических орбит

При изучении движения тел вокруг Солнца за основную плоскость принимается плоскость земной орбиты (плоскость эклиптики). Пусть некоторое тело движется вокруг Солнца (С) по эллиптической орбите $A\Pi g$ (A – афелий, Π – перигелий), лежащей в плоскости GF , которая пересекается с плоскостью эклиптики $\xi\xi'$ по прямой $\partial C^{\wedge} \mathcal{V}$, проходящей через Солнце и называемой *линией узлов* (рис. 44).

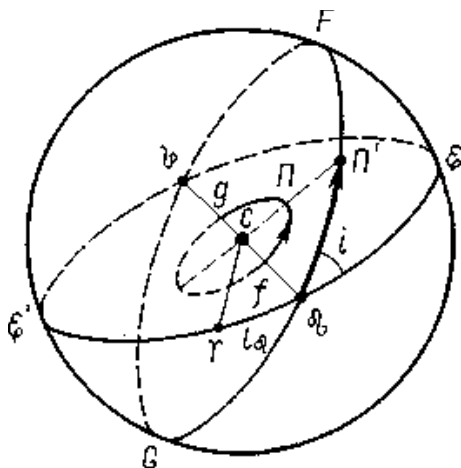


Рис. 44. Элементы эллиптической орбиты

Орбита тела характеризуется пятью элементами. Первый элемент – *наклонение* i орбиты, представляющее собой угол между плоскостью орбиты и плоскостью эклиптики. При прямом дви-

жении тела $0^\circ < i < 90^\circ$, а при обратном движении (то есть навстречу движению Земли) $90^\circ < i < 180^\circ$. Линия узлов пересекается с эклипкой в двух диаметрально противоположных точках $\varOmega$ и ϖ , называемых *узлами орбиты*. Один из них – *восходящий* узел $\varOmega$ в нем тело пересекает эклиптику при переходе из южного эклиптического полушария в северное эклиптическое полушарие. В противоположном, *нисходящем* узле ϖ тело переходит из северного эклиптического полушария в южное. Положение линии узлов определяется вторым элементом орбиты – *гелиоцентрической долготой* $l_\varOmega = \angle \varOmega$ восходящего узла, то есть углом при Солнце, измеряемым дугой эклиптики от точки весеннего равноденствия γ в восточном направлении (против часовой, стрелки).

Третий элемент орбиты указывает положение ее большой оси АСП в плоскости орбиты; он называется *аргументом перигелия* $\omega = \angle \Pi'$ и отсчитывается в плоскости орбиты от восходящего узла $\varOmega$ в сторону движения тела до проекции Π' перигелия на небесную сферу. Четвертым элементом орбиты является ее *большая полуось* a , а пятым элементом – *эксцентриситете*.

Элементы орбит небесных тел вычисляются по данным многократных наблюдений их видимых положений. Движение Земли изучается по видимому годичному движению Солнца. У земной орбиты наклонение $i = 0^\circ$, узлы отсутствуют, $a = a_0 = 1$ а. е. и $e = 0,0167$ (приближенно $e = 0,017$).

Эксцентриситет земной орбиты вычисляется по наибольшему $n_{\max}$ и наименьшему $n_{\min}$ суточному смещению Солнца по эклипике, отражающему движение Земли (см. § 22) В начале января $n_{\max} = 61'$ (Земля в перигелии), а в начале июля – $n_{\min} = 57'$ (Земля в афелии). По второму закону Кеплера в перигелии скорость Земли наибольшая $v_q = n_{\max} \times q$, а в афелии – наименьшая $v_Q = n_{\min} Q$, причем в соответствии с законом сохранения момента количества движения

$$v_q \times q = v_Q \times Q \quad \text{или} \quad n_{\max} \times q^2 = n_{\min} \times Q^2,$$

откуда, используя формулы (5.2) и (5.3), найдем:

$$\frac{1+e}{1-e} = \sqrt{\frac{n_{\max}}{n_{\min}}} = \sqrt{\frac{61'}{57'}} = 1,03397 \quad \text{и} \quad e = 0,0167.$$

Эксцентриситеты орбит планет Солнечной системы сравнительно небольшие – от 0,0068 (Венера) до 0,0934 (Марс). Исключением являются орбиты Меркурия ($e = 0,2056$) и Плутона ($e = 0,2534$).

Элементы планетных орбит приведены в приложении 1.

§ 51. Конфигурации и условия видимости планет

Видимые на небе взаимные расположения тел Солнечной системы называются их *конфигурациями*. Ниже рассмотрены только конфигурации планет относительно Солнца, так как конфигурации иных тел аналогичны.

Изобразим в плоскости эклиптики (рис. 45) Солнце (С), орбиту Земли (З), проекцию орбиты планеты (Р) и направления на точку весеннего равноденствия (Υ) с Солнца и Земли. Эклиптическая долгота, отсчитываемая при Земле от Υ , называется геоцентрической долготой λ , а отсчитываемая при Солнце – гелиоцентрической долготой l . Геоцентрическая долгота Солнца λ и гелиоцентрическая долгота Земли l связаны соотношением

$$\lambda = 180^\circ + l_0. \quad (5.8)$$

Условия видимости планет зависят от их конфигураций относительно Солнца, которые различны у нижних и верхних планет. Из-за эллиптичности орбит гелиоцентрические и геоцентрические расстояния планет даже при одинаковых конфигурациях несколько различны.

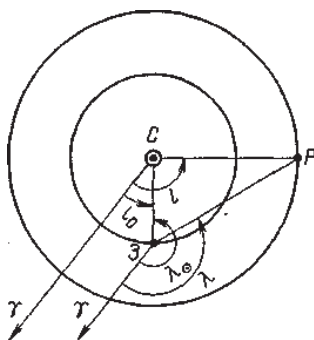


Рис. 45. Гелиоцентрическая долгота l и геоцентрическая долгота λ .

Конфигурации нижних планет. Нижние планеты, Меркурий и Венера, расположены к Солнцу ближе Земли и движутся вокруг него с большей скоростью и меньшим периодом обращения, нежели Земля. На рис. 46 изображены Солнце (С), соответствующие положения нижней планеты (1, 2, 3, ...) и Земли ($3_1, 3_2, 3_3, \dots$) на своих орбитах и направление суточного вращения неба с востока (Е) к западу (W). Конфигурация (7), при которой планета проходит между Солнцем и Землей (51), называется *нижним соединением* (с Солнцем): геоцентрическая долгота планеты $\lambda = \lambda$ – геоцентрической долготе Солнца, ее гелиоцентрическая долгота $l = l_0$ – гелиоцентрической долготе Земли, геоцентрическое расстояние (расстояние от Земли) наименьшее, а угловой (или видимый) диаметр планеты наибольший. Из-за наклона орбиты планета располагается на небе несколько севернее или южнее Солнца, но если нижнее соединение наступает вблизи узлов орбиты, то планета проецируется на солнечный диск. Такие *прохождения по диску Солнца* происходят редко: у Меркурия – только в мае и ноябре через 13 и 7 лет, причем между майским и очередным ноябрьским прохождениями может пройти 3,5 года (последние прохождения были 13 ноября 1986 г. и 6 ноября 1993 г.); у Венеры – в июне и декабре, с чередованием через 8 лет, 105,5 года, 8 лет и 121,5 года (последнее было 6 декабря 1882 г., а очередные произойдут 8 июня 2004 г. и 6 июня 2012 г.).

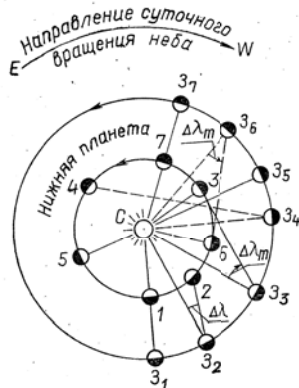


Рис. 46. Конфигурации нижних планет

Вблизи нижнего соединения планета перемещается по небу попятным движением (совпадающим с направлением прямого движения в пространстве), находится над горизонтом днем, недалеко от Солнца и поэтому невооруженному глазу не видна. К Земле обращено темное полушарие планеты, и в телескопы бывает видна ее серповидная фаза (см. рис. 41). Затем Земля смещается в положение 3_2 , а планета – в положение 2 и отходит к западу (вправо) от Солнца – наступает *западное удаление*, или *западная элонгация* (от лат. *ex* – из и *longus* – длины) планеты, при которой $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 < 0$ и $l > l_0$. Планета заходит за горизонт раньше Солнца, а восходит до его восхода и видна в восточной стороне неба в предутреннее время (*утренняя видимость* планеты). Ее серповидная фаза обращена выпуклостью к востоку (к Солнцу). С увеличением западной элонгации планеты возрастают ее фаза, продолжительность видимости и геоцентрическое расстояние, а угловые размеры уменьшаются. Вскоре наступает стояние планеты, ее попятное движение сменяется прямым, а затем настает *наибольшая западная элонгация* $\Delta\lambda_m = (\lambda - \lambda)_m$, при которой прямая, соединяющая Землю с планетой, становится касательной к планетной орбите и $l - l_0 = 90^\circ - \Delta\lambda_m$ (см. рис. 45, положение 3). Теперь видна половина диска планеты (фаза $\phi = 0,50$), а ее предутренняя видимость, как правило (но не всегда), достигает наибольшей продолжительности.

После наибольшей западной элонгации планета приближается к Солнцу с запада (положение 4), ее элонгация уменьшается, фаза растет, геоцентрическое расстояние увеличивается, а продолжительность утренней видимости сокращается, и вблизи конфигурации, называемой *верхним соединением* с Солнцем (положение 5), планета становится невидимой невооруженному глазу. В верхнем соединении планета находится за Солнцем (севернее или южнее него), ее $\lambda = \lambda_0$, $l - l_0 = 180^\circ$, геоцентрическое расстояние наибольшее, угловой диаметр наименьший, а фаза $\phi = 1$, так как к Земле повернуто все освещенное полушарие планеты. Затем планета отходит к востоку (влево) от Солнца – начинается ее *восточная элонгация*, при которой $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 > 0$ и $l < l_0$, геоцентрическое расстояние и фаза уменьшаются, а угловой диаметр возрастает; планета заходит за горизонт после за-

хода Солнца и видна по вечерам в западной области неба. При наибольшей восточной элонгации (положение 6) $\Delta\lambda_m = (\lambda - \lambda_\odot)_m$, $l_0 - l = 90^\circ - \Delta\lambda_m$, фаза $\phi = 0,50$ (выпуклость к западу, к Солнцу), и условия вечерней видимости обычно наиболее благоприятны. Далее планета постепенно сближается с Солнцем с востока, ее фаза становится серповидной, продолжительность вечерней видимости сокращается, снова наступает стояние, прямое движение сменяется попятным, и, наконец, происходит очередное нижнее соединение (положение 7).

Основные конфигурации нижних планет изображаются схемой (рис. 47), где стрелками на орбите планеты показана совпадающая с направлением движения планеты последовательность смены ее конфигураций: 1 – нижнее соединение; 2 – наибольшая западная элонгация; 3 – верхнее соединение; 4 – наибольшая восточная элонгация.

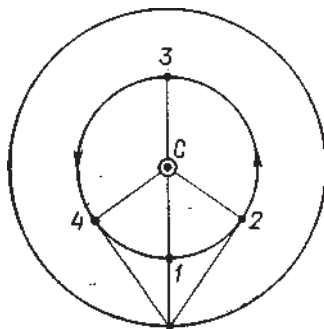


Рис. 47. Схема конфигураций нижних планет

На протяжении смены конфигураций диаметр диска Меркурия меняется от 5 до 12», а блеск – в 100 раз, примерно от $+3^m$ (в нижнем соединении) до -2^m (ярче Сириуса); у Венеры соответственно от 10 до 63" и от $-2^m,7$ до $-4^m,4$.

Из-за эллиптичности планетных орбит наибольшие элонгации не имеют постоянного значения. У Меркурия они заключены в пределах от 18° (планета в перигелии) до 28° (планета в афелии), при среднем значении $\approx 23^\circ$, а у Венеры – от 45 до 48° (среднее значение $\approx 46^\circ$). Обе планеты не отходят далеко от Солн-

ца, и поэтому ночью не видны. Продолжительность их утренней и вечерней видимости не превышает у Венеры четырех часов, а у Меркурия – полутора часов, и эта планета часто видна только на фоне зари. Обычно наилучшие условия утренней видимости создаются весной, когда эклиптика по вечерам высоко поднимается над горизонтом, а утренней видимости – осенью, как тогда эклиптика занимает аналогичное положение утром. Однако если склонение планеты меньше склонения Солнца, то даже при наибольшей элонгации продолжительность видимости планеты заметно сокращается, а Меркурий иногда совсем не виден, так как восходит и заходит в светлое время суток.

Конфигурации верхних планет. Эти планеты движутся за орбитой Земли, и их скорость меньше земной. В конфигурации, называемой *соединением* планета находится за Солнцем несколько севернее или южнее него, ее $\lambda = \lambda_{\odot}$ и $l - l_0 = 180^\circ$ (рис. 48, положение 1 планеты и положение 3₁ Земли; C – Солнце). Если соединение произойдет вблизи узла орбиты, то планета пройдет за диском Солнца. Вблизи соединения планета восходит и заходит почти одновременно с Солнцем и поэтому не видна. Ее геоцентрическое расстояние наибольшее, диаметр диска наименьший.

Из-за движения Земли Солнце смещается по эклиптике к востоку быстрее планеты, которая, перемещаясь в том же прямом направлении, отстает от Солнца к западу (положение 2) и становится видимой в восточной стороне неба незадолго до его восхода. С увеличением западного удаления планета с каждым днем восходит раньше, продолжительность ее видимости возрастает, геоцентрическое расстояние уменьшается, а угловой диаметр увеличивается. Когда западное удаление достигает $\Delta\lambda = \lambda_{\odot} - \lambda = 90^\circ$, наступает конфигурация, называемая *западной квадратурой* (положение 3), при которой планета восходит около полуночи. Перемещаясь в прямом направлении и постепенно отставая от Солнца ($\Delta\lambda = \lambda_{\odot} - \lambda > 90^\circ$), планета оказывается в противоположной ему стороне неба – наступает эпоха противостояния планеты. При конфигурации, называемой *противостоянием* или *оппозицией* (от лат. орроз. – противоположение), планета отстоит от Солнца на $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_{\odot} = 180^\circ$ и ее $l = l_0$ (положение 4).



Рис. 48. Конфигурации верхних планет

Эпоха противостояния наиболее благоприятна для наблюдений планеты: она восходит вечером, видна всю ночь, максимально сближается с Землей и поэтому имеет наибольший угловой диаметр. В эту эпоху Земля обгоняет планету, и с Земли кажется, что планета останавливается (*стояние* планеты), затем некоторое время перемещается попятно, снова останавливается и после этого продолжает прямое движение. На рис. 49 одинаковыми цифрами отмечены положения Земли и планеты на орбитах в определенные моменты времени, а также соответствующие им видимые положения планеты на звездном небе: прямое движение планеты (1→2→3) сменяется попятным (3→4→5), после чего оно снова восстанавливается (5→6→7). В момент противостояния планета находится в середине дуги попятного движения (положение 4). Из-за наклона орбиты планеты ее видимый путь выглядит петлеобразным. Таким образом, петлеобразное движение верхних планет не реальное, а лишь кажущееся (параллактическое), причем размеры петли обратно пропорциональны геоцентрическому расстоянию.

После оппозиции планета постепенно сближается с Солнцем (которое приближается к ней с западной стороны), располагается

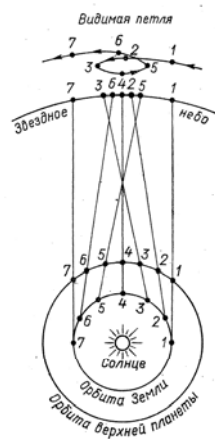


Рис. 49. Объяснение попятного движения верхней планеты

на небе восточнее (левее) него и видна по вечерам после его захода. С каждым днем заход планеты наступает раньше, ее геоцентрическое расстояние возрастает, а видимые размеры уменьшаются. Когда восточное удаление планеты от Солнца сократится до $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_{\odot} = 90^\circ$, конфигурация называется *восточной квадратурой*, при которой планета заходит около полуночи (см. рис. 48, положение 5). Наконец, она становится видимой уже на фоне вечерней зари, а затем скрывается в солнечных лучах – наступает ее очередное соединение с Солнцем (положение 7).

Основные конфигурации верхней планеты изображены на рис. 50, где стрелками показана последовательность их смены: 1 – соединение, 2 – западная квадратура, 3 – противостояние, 4 – восточная квадратура. Эта последовательность противоположна направлению орбитального движения планеты.

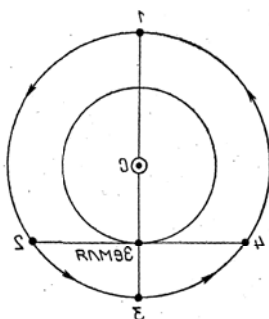


Рис. 50. Схема конфигураций верхних планет

Условия видимости верхних планет зависят от их положения на эклиптике в соответствующих зодиакальных созвездиях. Даже в эпохи противостояний эти условия резко различны: наилучшие бывают в зимние противостояния, когда планеты перемещаются по созвездиям Тельца, Близнецов и Рака, высоко поднимаются и большую часть суток видны над горизонтом, чему способствуют длинные зимние ночи. Летние же противостояния самые неблагоприятные, так как наступают в созвездиях Скорпиона, Стрельца и Козерога, суточный путь которых над горизонтом сравнительно низок, а короткие летние ночи сокращают видимость планет

§ 52. Уравнение синодического движения

Одноименные конфигурации планет наступают в разных точках их орбит. Промежуток времени, за который планета совершает полный оборот по орбите, называется *звездным* или *сидерическим периодом обращения*. Период смены конфигураций называется *синодическим* (от греческого «синодос» – соединение) *периодом обращения* планеты и отличается от ее звездного периода. Пусть T – сидерический период обращения планеты, а T_0 – сидерический период обращения Земли (звездный год). Среднее значение дуги, проходимой планетой по орбите за одни сутки, называется средним движением $n = 360^\circ : T$, и аналогично среднее движение Земли $n_0 = 360^\circ : T_0$.

У нижних планет $T < T_0$ и $n > n_0$. Одноименные (например, нижние) соединения планеты (рис. 51) наступают через синодический период обращения S , за который Земля проходит дугу

$$L_0 = n_0 \cdot S = \frac{360^\circ}{T_0} \cdot S,$$

а планета, уйдя вперед, совершает один оборот (360°) вокруг Солнца и затем догоняет Землю, то есть проходит угловой путь

$$L = n \cdot S = 360^\circ + L_0 = \frac{360^\circ}{T} \cdot S.$$

Вычитая первое равенство из второго, получим уравнение синодического движения нижних планет

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}. \quad (5.9)$$

У верхних планет $T > T_0$, $n < n_0$, и поэтому уравнение синодического движения

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}. \quad (5.10)$$

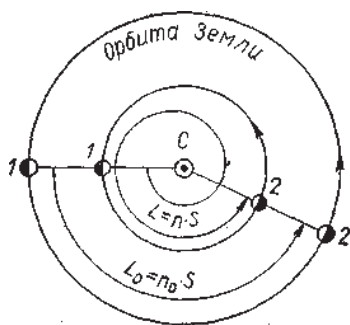


Рис. 51. Последовательные нижние соединения (1 и 2) нижней планеты (через синодический период обращения)

Оба эти уравнения дают средние значения синодических периодов обращения планет, а реальные их значения несколько иные из-за неравномерного движения планет: у Меркурия $S = 116$ сут. с изменениями от 104 до $132^{\text{д}}$, у Венеры $S = 584^{\text{д}} \pm 7^{\text{д}}$, у Марса $S = 780^{\text{д}}$ с колебаниями от 765 до $811^{\text{д}}$, у Юпитера $S = 399^{\text{д}} \pm 4^{\text{д}}$ и у Сатурна $S = 378^{\text{д}} \pm 2^{\text{д}}$.

С такими же синодическими периодами происходит смена конфигураций Земли в небе этих планет; для Меркурия и Венеры Земля является верхней планетой, а для всех остальных – нижней.

§ 53. Великие противостояния

В противостоянии верхней планеты ее геоцентрическое расстояние может меняться в пределах примерно от $r_n = q - a_0 = a(1 - e) - a_0$ (планета в перигелии) до $r_m = Q - a_0 = a(1 + e) - a_0$ (планета в афелии), где a – большая полуось и e – эксцентриситет планетной орбиты, а $a_0 = 1$ а. е. – среднее расстояние Земли от Солнца. Здесь небольшой эксцентриситет земной орбиты ($a_0 = 0,017$) не учтен, поскольку линии апсид планетных орбит не совпадают с большой осью земной орбиты.

У далеких планет изменение геоцентрического расстояния в различных противостояниях сравнительно невелико, так как a значительно больше a_0 . Для близкого Марса ($a = 1,524$ а. е.), обращающегося по значительно вытянутой орбите ($e = 0,093$), различия в геоцентрических расстояниях существенны и с учетом эксцентриситета земной орбиты могут быть в пределах

от $r_m = 0,677$ а. е. $= 100,3 \times 10^6$ км до $r_n = 0,370$ а. е. $= 55,3 \cdot 10^6$ км ($r_m : r_n = 1,83$). Оппозиции Марса, наступающие при геоцентрическом расстоянии, не превышающем $0,40$ а. е. $\approx 60 \cdot 10^6$ км, называются *великими противостояниями*, во время которых диаметр диска планеты увеличивается до $25''$, а блеск – до $-2^m,6$.

Так как при великих противостояниях планета движется вблизи своего перигелия, то они повторяются через промежутки времени, кратные сидерическому T и синодическому S периодам обращения планеты, то есть через $kT = mS$, где k и m – целые числа.

У Марса $T = 687^д = 1,881$ года и среднее значение $S = 780^д = 2,136$ года. Равенство $1,881k = 2,136m$ удовлетворяется числами $k = 8$ и $m = 7$, а также $k = 9$ и $m = 8$. Первая пара чисел дает в произведениях $15,05$ и $14,95$ года, а вторая – $16,93$ и $17,09$ года. Поэтому великие противостояния повторяются дважды через 15 лет и затем через 17 лет, но, в разных точках близкого к Земле участка его орбиты и возможны в интервале с 5 июля по 5 октября. На рис. 52 изображены орбиты Марса и Земли, показаны геоцентрические расстояния Марса в миллионах километров при его оппозициях в разные годы и номера месяцев, в какие Земля проходит участки своей орбиты; утолщенной линией отмечены те участки обеих орбит, на которых бывают великие противостояния. Наиболее часто они наступают в августе и сентябре: предыдущие были 10 сентября 1956 г. и 10 августа 1971 г. в конце июля 1986 г.

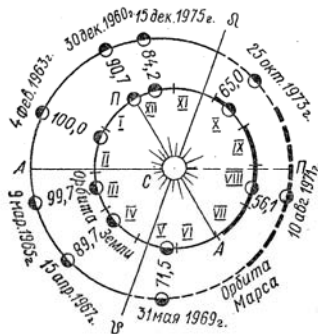


Рис. 52. Противостояния Марса: C – Солнце; Q – линия узлов орбиты Марса

Великие противостояния бывают и у тех астероидов, которые периодически близко подходят к Земле. Так, астероид Эрос ($a =$

1,458 а. е., $e = 0,222$, $T = 1,761$ года и $S = 2,315$ года) в среднем противостоянии проходит на расстоянии $r = a - a_0 = 0,458$ а. е. = 68,5 млн. км от Земли, но через каждые 44 года (иногда через 37 лет) сближается с нею до 0,135 а. е. = 20,2 млн. км, как это было в январе 1931 и 1975 гг.

Аналогично повторяются наибольшие сближения с Землей Меркурия ($a = 0,387$ а. е., $e = 0,206$) в его нижнем соединении. По $T = 88^д$ и $S = 116^д$ легко найти, что они повторяются через 7 и 13 лет.

§ 54. Измерение геоцентрических расстояний

Классическим методом определения геоцентрических расстояний тел Солнечной системы является тригонометрический метод. Эти тела значительно ближе звезд и поэтому из разных пунктов земной поверхности видны по несколько различающимся направлениям (рис. 53): из пункта O земной поверхности светило M видно в точке M_0 небесной сферы, а из центра Земли C – в точке M_c . Видимое с земной поверхности положение светила (M_0) называется топоцентрическим (от греческого «топос» – место), а видимое из центра Земли – геоцентрическим положением (M_c) или геоцентрическим местом светила. Угол (p') при светиле между топоцентрическим (OMM_0) и геоцентрическим ($СММ_c$) направлениями на него называется суточным параллаксом светила. Следовательно, суточный параллакс – это угол (p'), под которым со светила виден земной радиус (R) пункта наблюдения (O).

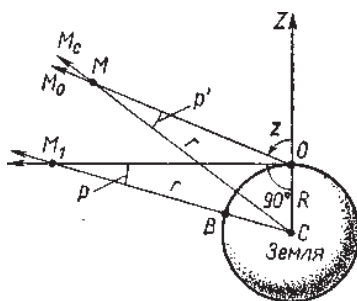


Рис. 53. Суточный и горизонтальный параллаксы светил

Суточный параллакс p' светила – величина переменная: если светило находится в зените (Z), то $p' = 0$; если же – на горизонте (M_V), то p' наибольший и называется *горизонтальным параллаксом* p . Следовательно, горизонтальный параллакс светила – это наибольший угол, под которым со светила виден радиус Земли.

Если известен горизонтальный параллакс p светила, то его геоцентрическое расстояние

$$r = R : \sin p. \quad (5.11)$$

Однако непосредственно измерить горизонтальный параллакс нельзя, так как рефракция в горизонте внесет в измерения огрешности, в десятки и сотни раз превышающие измеряемую величину. Поэтому горизонтальный параллакс p вычисляется по суточному параллаксу p' и зенитному расстоянию z светила. Из треугольника COM следует, что

$$r = R \frac{\sin(180^\circ - z)}{\sin p'} = R \frac{\sin z}{\sin p'}$$

откуда, заменяя r из формулы (5.11), получим:

$$\sin p' = \sin p \cdot \sin z,$$

а поскольку углы p' и p небольшие (даже у близкой Луны $p \leq 61',5$), то их функции можно заменить самими углами и тогда

$$p' = p \times \sin z. \quad (5.12)$$

Из двух пунктов O_1 и O_2 земной поверхности с географической широтой φ_1 и φ_2 (рис. 54), расположенных на одном географическом меридиане, измеряют зенитные расстояния z_1 и z_2 светила M в верхней кульминации (CO_1Z_1 и CO_2Z_2 – направления в зенит пунктов O_1 и O_2). Тогда согласно формуле (5.12) суточные параллаксы светила

$$p'_1 = p \sin z_1 \quad \text{и} \quad p'_2 = p \sin z_2.$$

В четырехугольнике CO_2MO_1
 $\angle O_2CO_1 = \varphi_2 - \varphi_1$; $\angle CO_2M = 180^\circ - z_2$; $\angle O_2MO_1 = p'_2 - p'_1$ и
 $\angle CO_1M = 180^\circ + z_1$; а сумма этих углов $(\varphi_2 - \varphi_1) + (180^\circ - z_2) + (p'_2 - p'_1) + (180^\circ + z_1) = 360^\circ$, откуда

$p'_2 - p'_1 = p (\sin z_2 - \sin z_1) = (\varphi_1 - z_1) - (\varphi_2 - z_2)$ и тогда горизонтальный параллакс

$$p = \frac{(\varphi_1 - z_1) - (\varphi_2 - z_2)}{\sin z_2 - \sin z_1}. \quad (5.13)$$

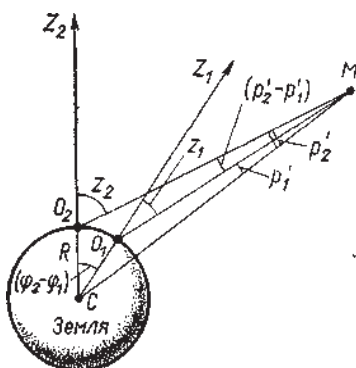


Рис. 54. К определению горизонтального параллакса

У сфероидальной Земли радиусы R различны, и, чтобы исключить неопределенность в вычислении геоцентрических расстояний, за базис измерения принят экваториальный радиус Земли R_0 , соответствующий ему горизонтальный параллакс называется *горизонтальным экваториальным параллаксом*:

$$p_0 = p \frac{R_0}{R}.$$

Именно эти параллаксы небесных тел Солнечной системы приводятся в астрономической литературе. Тогда согласно формуле (5.11) геоцентрическое расстояние

$$r = \frac{R_0}{\sin p_0}. \quad (5.14)$$

Значения r получаются в экваториальных радиусах Земли (полагая $R_0 = 1$) или в километрах (принимая $R_0 = 6378$ км). При вычислении расстояний в астрономических единицах (а. е.) используется горизонтальный экваториальный параллакс Солнца $p_\odot = 8'',794$, соответствующий расстоянию в 1 а. е. (см. § 55). Поскольку параллаксы обратно пропорциональны расстояниям, то а астрономических единицах

$$r = \frac{p_\odot}{p''_0} = \frac{8'',794}{p''_0},$$

где p''_0 – горизонтальный экваториальный параллакс в секундах дуги.

В настоящее время тригонометрический метод применяется для определения геоцентрических расстояний далеких планет, астероидов и комет.

Для определения расстояний до близких крупных тел с твердой поверхностью (Луны, Меркурия, Венеры и Марса) успешно применяется радиолокационный, или радарный, метод: к небесному телу посылают короткие радиоимпульсы, фиксируя с высокой точностью (не ниже 10^{-6} с) моменты их посылки (t_1) и возвращения (t_2) после отражения. Тогда искомое расстояние в километрах

$$r = c \frac{t_2 - t_1}{2}, \quad (5.15)$$

где $(t_2 - t_1)$ в секундах и $c = 299\,792,5$ км/с – скорость распространения радиоволн в вакууме.

§ 55. Астрономическая единица длины и солнечный параллакс

Найти длину астрономической единицы в километрах непосредственной радиолокацией Солнца невозможно, так как неизвестно, от какого глубинного слоя газообразного Солнца отразится посланный к нему радиосигнал и, кроме того, неизвестно, не будет ли он заглушен мощным радиоизлучением Солнца. Астрономическая же единица представляет собой среднее расстояние

между центрами Земли и Солнца. Поэтому ее длина определена радиолокацией нижних планет вблизи их нижнего соединения. Покажем принцип такого определения по радиолокации Венеры.

Пусть вблизи нижнего соединения (рис. 55) Венера (В) находится на расстоянии r от Солнца (С), а Земля (З) – на расстоянии r_0 от него. Геоцентрическое расстояние Венеры обозначим через r_1 , а разность гелиоцентрической долготы обеих планет – через $(l - l_0)$. Согласно уравнению эллипса (5.1)

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos \theta} \quad \text{и} \quad r_0 = \frac{a_0(1 - e_0^2)}{1 + e_0 \cdot \cos \theta_0},$$

где r , a и a_0 выражены в километрах и пока еще неизвестны.

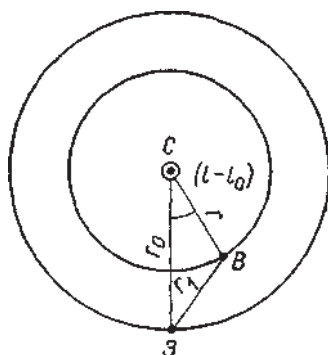


Рис. 55. К вычислению длины астрономической единицы

Расстояние r_1 определяется радиолокацией по формуле (5.15) непосредственно в километрах, значения $e = 0,0068$ и $e_0 = 0,0167$ известны из наблюдений, а θ , θ_0 и $(l - l_0)$ вычисляются по движению планет и на момент измерения r_1 тоже известны. Тогда

$$r_1^2 = a^2 \left[\frac{1 - e^2}{1 + e \cdot \cos \theta} \right]^2 + a_0^2 \left[\frac{1 - e_0^2}{1 + e_0 \cdot \cos \theta_0} \right]^2 - 2a a_0 \left[\frac{(1 - e^2)(1 - e_0^2)}{(1 + e \cdot \cos \theta)(1 + e_0 \cdot \cos \theta_0)} \cos(l - l_0) \right],$$

причем численные значения безразмерных величин в квадратных скобках определены: обозначим их через ζ , η и ξ . Вынося a_0 за скобки, получим:

$$r_1^2 = a_0^2 \left[\zeta^2 \left(\frac{a}{a_0} \right)^2 + \eta^2 - 2\xi \frac{a}{a_0} \right],$$

откуда искомая длина астрономической единицы в километрах

$$a_0 = \frac{1}{\sqrt{\zeta^2 \left(\frac{a}{a_0} \right)^2 + \eta^2 - 2\xi \frac{a}{a_0}}},$$

где $\frac{a}{a_0}$ – известно из третьего закона Кеплера и, в частности, для Венеры $\frac{a}{a_0} = 0,7233$.

Многочисленные определения, выполненные у нас в стране, Англии и в США в 1961–1963 гг., показали, что длина астрономической единицы (a_0) близка к значению 149 600 000 км. Поэтому в 1976 г. XVI съезд Международного астрономического союза (МАС) принял с учетом более поздних определений $a_0 = 149\,597\,870$ км с ошибкой, не превышающей 10 км (до этого пользовались значением $a_0 = 149,6 \times 10^6$ км), чему соответствует солнечный параллакс $p = 8'',794$. Горизонтальный экваториальный параллаксом астрономы ради краткости называют параллаксом (без прилагательных), что мы тоже будем использовать в дальнейшем. Расстояние в 1 а. е. свет проходит за $499^с = 8^м19^с$, и этот интервал времени называется *световой единицей* или *световой астрономической единицей*.

§ 56. Годичная абберация и параллактическое смещение звезд

Во второй половине XIX в. астрономы Пулковской обсерватории определили длину астрономической единицы в $149,6 \times 10^6$ км, то есть с точностью современных радарных определений. Для этого они использовали явление, открытое в 1726–1728 гг. английским астрономом Дж. Брадлеем (1693–1762) и известное под названием *годовой абберации звезд* или *годовой абберации*.

ции света (от лат. *aberratio* – уклонение). Это явление состоит в том, что из-за конечной скорости света видимые положения всех звезд несколько смещены в сторону движения Земли. Представим себе (рис. 56, а) Землю E , движущуюся в направлении A со скоростью v_0 . Точка эклиптики, к которой в данный момент направлена скорость Земли, называется *апексом* (от лат. *apex* – вершина). Скорость Земли, оставаясь касательной к земной орбите, последовательно меняет направление, а поэтому апекс непрерывно перемещается по эклиптике с угловой скоростью Земли в сторону ее движения (с запада к востоку) и всегда удален на 90° к западу от Солнца, то есть эклиптическая долгота апекса $\lambda_A = \lambda_\odot - 90^\circ$. Если от звезды S находящейся на угловом расстоянии u от апекса A , идет в сторону Земли световой луч SD , то эта звезда должна бы быть видна на небе в точке S_0 , но из-за движения Земли световые кванты смещаются на встречу Земле и по отношению к ней распространяются по лучу SE , а поэтому звезда видна в точке S_1 , сдвинутой от S_0 на небольшой угол σ в сторону апекса.

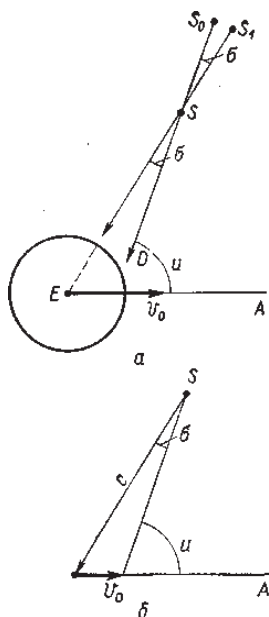


Рис. 56. Абберационное смещение звезды (а) и его величина (б)

Очевидно (см. рис. 56, б), что при скорости света c

$$\sin \sigma = \frac{v_0}{c} \sin(180^\circ - u) = \frac{v_0}{c} \sin u.$$

По малости угла σ функция $\sin \sigma = \sigma_{\text{радиан}}$, и так как 1 радиан = 206 265", то абберационное смещение звезды

$$\sigma = 206\,265'' \frac{v_0}{c} \sin u = \kappa \cdot \sin u, \quad (5.16)$$

где $\kappa = 206\,265'' v_0/c$ называется *абберационной постоянной* и является одной из фундаментальных астрономических величин, получаемой из наблюдений видимых положений звезд, расположенных вблизи полюса эклиптики. У таких звезд эклиптическая широта β близка к 90° , то есть они удалены от эклиптики и, следовательно, от апекса почти точно на $u = 90^\circ$; поэтому их видимые положения смещены всегда на величину $\sigma = \kappa$, отчего наблюдателю представляется, что на протяжении года звезды описывают на небе маленькие окружности радиусом $\kappa = 20'',5$. На рис. 57, а одинаковыми цифрами обозначены четыре положения Земли на орбите и соответствующие им видимые положения звезды S на небе, которые смещены в направлении скорости Земли; истинное положение S_0 звезды на небе находится в центре абберационной окружности. Впервые Брэдли обнаружил именно такую абберацию звезды γ Дракона, находящуюся вблизи полюса эклиптики.

Пулковские астрономы из наблюдений видимых положений звезд за 1840–1880 гг. вывели значение абберационной постоянной $\kappa = 20'',493$ и, приняв $c = 3 \cdot 10^5$ км/с, вычислили скорость Земли:

$$v_0 = \frac{c \cdot \kappa}{206265} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 20'',493}{206265} = 29,78 \text{ км/с},$$

а зная период обращения Земли вокруг Солнца $T_0 = 31,558 \times 10^6$ с, нашли длину астрономической единицы

$$a_0 = \frac{v_0 T_0}{2\pi} = \frac{29,78 \cdot 31,558 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,1416} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ км.}$$

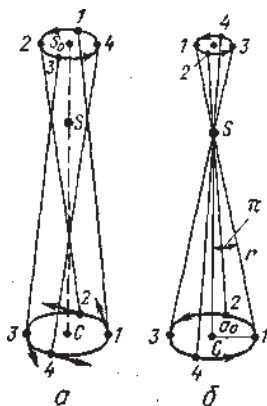


Рис. 57. Аберрационное (а) и параллактическое (б) смещение звезды на протяжении года: *C* - Солнце

Современное значение $\kappa = 20'',496$ и $c = 299\,792,5$ км/с, что тоже соответствует средней скорости Земли $v_0 = 29,78$ км/с.

Годичные аберрационные смещения звезд с эклиптической широтой β имеют вид эллипсов, большая полуось которых $\sigma = \kappa = 20'',5$, а малая полуось $\sigma' = \kappa \times \sin\beta = 20'',5 \sin\beta$. Центр эллипса соответствует действительному положению звезды, называемому ее *средним местом*.

Если звезда находится на эклиптике ($\beta = 0$), то ее угловое расстояние от апекса $u = \lambda - \lambda_A$, где λ — эклиптическая долгота звезды и λ_A — долгота апекса, изменяющаяся на протяжении года от 0 до 360° . Следовательно, согласно формуле (5.16) у такой звезды аберрационное смещение

$$\sigma = \kappa \times \sin(\lambda - \lambda_A) = 20'',5 \times \sin(\lambda - \lambda_A)$$

и имеет вид дуги размером $41''$.

Помимо аберрационного смещения, присущего всем звездам, у сравнительно близких звезд наблюдается еще *параллактическое смещение*, вызванное перемещением Земли по орбите (см. рис. 57, б). Положения Земли на орбите и видимые с Земли положения звезды *S* на небе обозначены одинаковыми цифрами. На-

блюдателю кажется, что на протяжении года близкая звезда описывает на фоне слабых (далеких) звезд очень маленький эллипс (называемый *параллактическим эллипсом*) в направлении движения Земли. Если большую полуось параллактического эллипса обозначить через π , то его малая полуось $b = \pi \sin \beta$. Среднее место звезды находится в центре параллактического эллипса.

Впервые параллактическое смещение ($\pi = 0'',125$) было обнаружено у звезды Веги (α Лиры) в 1835–1837 гг. выдающимся русским астрономом В. Я. Струве (1793–1864).

В отличие от абберационного смещения параллактическое смещение звезд всегда направлено в сторону Солнца (на 90° восточнее апекса) и зависит от их расстояния, но даже у самой близкой яркой звезды α Центавра не превышает $\pi = 0'',75$.

Абберационные и параллактические смещения звезд служат неопровержимыми доказательствами обращения Земли вокруг Солнца. В настоящее время эти смещения измеряются по фотографическим снимкам.

Публикуемые в звездных каталогах экваториальные координаты (α и δ) звезд определяют их средние места, освобожденные от влияния абберации и параллакса.

§ 57. Линейные размеры тел Солнечной системы

Линейные размеры небесных тел вычисляются по их геоцентрическим расстояниям r (или параллаксам p_0) и измеряемым видимым (угловым) размерам.

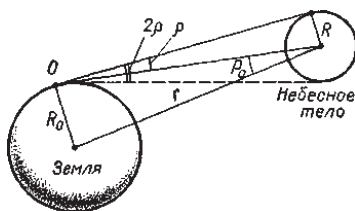


Рис. 58. Угловые и линейные размеры небесных тел: O - наблюдатель на Земле

У шаровидного тела (рис. 58) измеряется его видимый диаметр 2ρ , и тогда линейный радиус тела

$$R = r \cdot \sin p,$$

или, заменяя r из формулы (5.14)

$$R = R_0 \frac{\sin p}{\sin p_0}. \quad (5.17)$$

Видимые размеры небесных тел (кроме ярких комет) малы, и даже у Солнца и Луны угловой радиус p близок к $16'$. Поэтому

$$R = R_0 \frac{p}{p_0}, \quad (5.18)$$

где p и p_0 должны быть обязательно в одинаковых единицах измерения (как правило, в секундах дуги).

Радиусы Солнца, Луны и планет обычно вычисляются либо в экваториальных радиусах R_0 Земли (и тогда размерность не представляется), либо в километрах (с указанием размерности), а радиусы спутников планет и астероидов – в километрах. Так, радиус Солнца $R = 109,1 R_0 = 696\,000$ км, а радиус Луны $R_0 = 0,2725 R_0 = 1738$ км.

Аналогично определяется нижний предел длины хвоста кометы, истинное направление которого в пространстве отличается от видимого.

Глава VI. Движение Луны и затмения

§ 58. Движение Луны

Луна – самое близкое к Земле холодное небесное тело и является ее естественным спутником. Радиус Луны равен 1738 км ($0,2725$ экваториального радиуса Земли), а масса в $81,30$ раз меньше массы Земли.

Помимо суточного движения с востока на запад из-за вращения Земли Луна сравнительно быстро и неравномерно перемещается на фоне звезд в прямом направлении пада к востоку) по большому кругу – *лунному пути*: за один час смещается примерно на $0^\circ,5$ величину своего видимого диаметра, а за сутки – в среднем на $13^\circ,2$, из-за чего верхняя кульминация Луны ежедневно наступает

примерно на 52^m позже, чем накануне. Лунный путь проходит по зодиакальным созвездиям, наклонен к эклиптике под углом $i = 5^\circ 09'$ и пересекается с нею в двух диаметрально противоположных точках, называемых лунными узлами (рис. 59). В восходящем лунном узле (♌) Луна переходит к северу от эклиптики, а в нисходящем узле (♋) – к югу от нее.

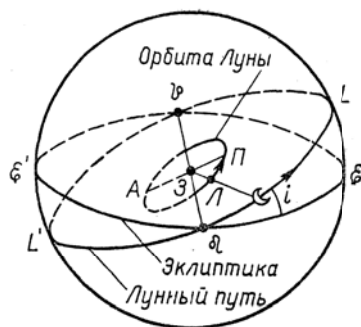


Рис. 59. Лунный путь (LL') и лунная орбита (АЛП): З - Земля; Л - Луна в пространстве; (C - видимое положение Луны на небе; наклонение $i = 5^\circ 09'$

Видимое неравномерное перемещение Луны по лунному пути отражает ее движение в пространстве вокруг Земли по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится Земля. Плоскость лунной орбиты пересекается с плоскостью земной орбиты (плоскостью эклиптики) по линии узлов, проходящей через оба лунных узла и центр Земли. Таким образом, лунный путь представляет собой большой круг, по которому плоскость лунной орбиты пересекается с небесной сферой.

Движение Луны очень сложное, так как подвержено сильным возмущениям, вызываемым главным образом гравитационным воздействием Солнца (см. § 69).

Средние, или невозмущенные, элементы лунной орбиты следующие: большая полуось $a = 384\,400$ км (или $60,270R_0$, где R_0 – экваториальный радиус Земли), эксцентриситет $e = 0,0549$ и наклонение $i = 5^\circ 09'$. Ближайшая к Земле точка лунной орбиты на-

зывается *перигеем*, а наиболее удаленная от Земли – *апогеем*. Для невозмущенной орбиты перигейное расстояние $q = 363\,300$ км ($56,961 R_0$), а апогейное расстояние ($Q = 405\,500$ км ($63,578 R_0$)). Периодические возмущения несколько изменяют эти элементы: большую полуось – от 381 540 до 386 960 км, эксцентриситет – от 0,0435 до 0,0715, наклонение – от $4^\circ 59'$ до $5^\circ 19'$, перигейное расстояние – от 356 420 до 369 960 км и апогейное расстояние – от 404 170 до 406 660 км. Горизонтальный экваториальный параллакс Луны, в среднем равный $57',0$, изменяется в пределах от $61',5$ ($61'31''$) до $53',9$ ($53'55''$), а ее видимый диаметр – от $33'32''$ в перигее до $29'20''$ в апогее.

Период обращения Луны по орбите называется *звездным* или *сидерическим* *месяцем*. Его средняя продолжительность $T = 27,32$ сут. (точнее, $T = 27^{\text{д}},3217 = 27^{\text{д}}7^{\text{ч}}43^{\text{м}}12^{\text{с}}$), но из-за возмущений он испытывает небольшие колебания в пределах полусуток.

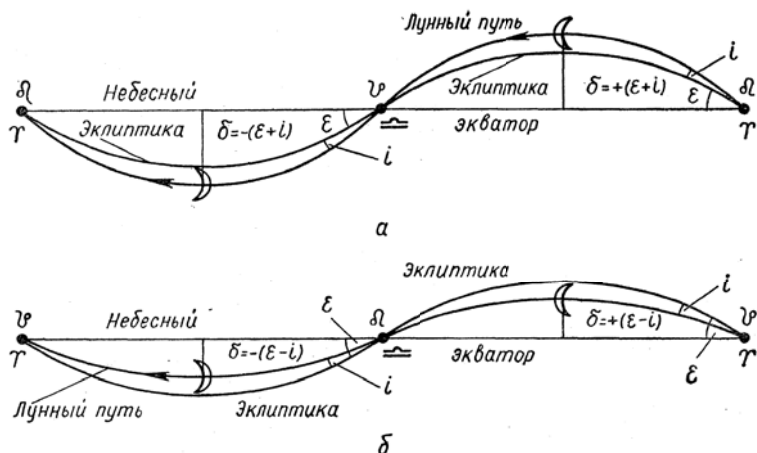


Рис. 60. Предельные положения лунного пути

Лунная орбита поворачивается в своей плоскости в прямом направлении с периодом 8 лет 10 месяцев, то есть почти на 41° за год. Сама плоскость лунной орбиты и линия узлов поворачиваются с востока к западу (навстречу движению Луны) с периодом в 18,61 года = 18 лет 7 мес. = $6798^{\text{д}}$, и поэтому лунные узлы перемещаются по эклиптике в том же направлении (узлы отступают) на

$19^{\circ},3$ за год, или почти на $1^{\circ},5$ за сидерический месяц. Из-за этого Луна возвращается к одному и тому же узлу через период, называемый драконическим месяцем, продолжительность которого

$$S_{\text{д}} = T - \frac{1^{\circ},5}{13^{\circ},2} = 27^{\circ},32 - 0^{\circ},11 = 27^{\circ},21 \text{ (точнее, } S_{\text{д}} = 27^{\circ},2122 \text{)}$$

Таким образом, на протяжении 6798 сут. Луна каждый свой оборот по небу совершает по новому пути, и только через 18 лет 7 месяцев лунный путь принимает прежнее положение.

Отступление лунных узлов значительно изменяет условия видимости Луны. Когда восходящий лунный узел  совпадает с точкой весеннего равноденствия Υ , а нисходящий узел  – с точкой осеннего равноденствия Ω (рис. 60, а), то на протяжении сидерического месяца склонение Луны изменяется в пределах $\delta = \pm(\epsilon + i) = \pm(23^{\circ}26' + 5^{\circ}09') = \pm 28^{\circ}35'$. Если же с точкой весеннего равноденствия совпадает нисходящий узел, то склонение Луны изменяется в пределах $\delta = \pm(\epsilon - i) = \pm(23^{\circ}26' - 5^{\circ}09') = \pm 18^{\circ}17'$ (см. рис. 60, б).

В соответствии со вторым законом Кеплера скорость Луны относительно Земли (геоцентрическая скорость) переменна: ее среднее значение

$$v_a = \frac{2\pi a}{T} = 1,02 \text{ км/с,}$$

в перигее скорость возрастает до 1,08 км/с, а в апогее уменьшается до 0,97 км/с.

Луна медленно вращается вокруг своей оси в прямом направлении с периодом, равным сидерическому месяцу (такое вращение называется синхронным), и поэтому с Земли видно только одно лунное полушарие. Плоскость лунного экватора образует с плоскостью эклиптики угол в $1^{\circ}30'$, а с плоскостью лунной орбиты – угол в $6^{\circ}39'$, причем все три плоскости пересекаются по линии лунных узлов – закон, открытый в 1721 г. французским астрономом Дж. Кассини (1677–1756). Ось вращения Луны отклонена от перпендикуляра к плоскости лунной орбиты на угол в $6^{\circ}39'$ и вместе с линией узлов поворачивается в пространстве, описывая за 18,61 года коническую поверхность (прецессия лунной оси).

Благодаря наклону лунной оси вращения с Земли поочередно видны то северный, то южный полюс Луны. Создается впечатление, будто Луна слегка покачивается на $6^{\circ}39'$ в направлении меридианов, проходящих через ее полюсы. Это кажущееся покачивание называется *оптической либрацией по широте* (от лат. *libro* – раскачивать) и происходит с периодом, равным драконическому месяцу ($27^д, 21$).

Другой вид оптической либрации Луны – это *либрация по долготе*, которая является следствием равномерного вращения Луны вокруг оси и неравномерного ее движения по орбите (рис. 61).

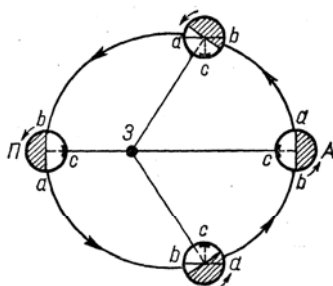


Рис. 61. Либрация Луны по долготе: З - земной наблюдатель; П - Луна в перигее; А - Луна в апогее; с - центр лунного полушария, обращенного к Земле: стрелки показывают направление вращения и обращения Луны

За четверть периода обращения Луна поворачивается вокруг оси на 90° , но проходит по орбите вблизи перигея путь более 90° , а вблизи апогея – менее 90° , причем эти отклонения достигают $7^{\circ}54'$. В результате на восточном и западном краях лунного диска поочередно появляются и снова скрываются за край небольшие участки лунной поверхности. Из-за лунных либраций с Земли видно 59% всей поверхности Луны.

§ 59. Лунные фазы

Лунной фазой называется видимая в солнечном освещении часть лунного диска. Фаза $\phi = b : d$, где b – наибольшая освещенная часть диаметра d лунного диска (рис. 62).

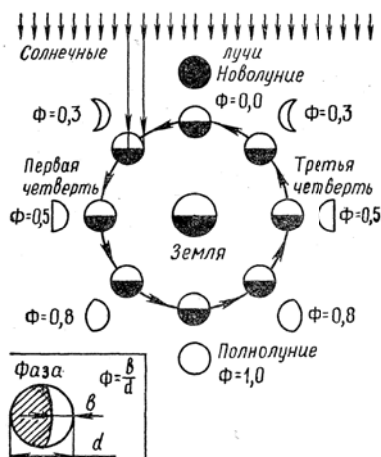


Рис. 62. Смена лунных фаз

Лунную фазу характеризуют также возрастом Луны, то есть числом суток, протекших после фазы новолуния ($\phi = 0,0$), при которой возраст Луны $= 0^{\text{д}}0$.

На рис. 62 показаны положения Луны на ее геоцентрической орбите и рядом лунные фазы, видимые с Земли. *Новолуние* наступает при соединении Луны с Солнцем, когда она проходит между ним и Землей, но из-за наклона своей орбиты несколько выше или ниже него, восходит и заходит почти одновременно с ним, ее неосвещенное полушарие обращено к Земле и не видно.

После новолуния Луна постепенно отходит к востоку от Солнца (она восходит днем) и примерно через двое суток становится видимой по вечерам в западной области неба в форме узкого серпа ($\phi \simeq 0,10$), выпуклость которого обращена к западу, где под горизонтом находится Солнце, освещающее Луну.

Часто при серповидной фазе виден слабо освещенный весь лунный диск, диаметр которого кажется меньше диаметра яркого лунного серпа. Это явление называется *пепельным светом* и объясняется тем, что лунный серп освещается непосредственно Солнцем, а остальная лунная поверхность – рассеянным солнечным светом, отраженным Землей. Видимое различие в диаметрах диска и серпа – явление кажущееся, называемое *иррадиацией* (от

лат. *irradiare* – сиять), и объясняется особенностями нашего зрения.

По мере смещения Луны к востоку от Солнца лунная фаза растет, и через неделю после новолуния, когда Луна отойдет на 90° от Солнца (Луна в восточной квадратуре), видна вся правая половина лунного диска – наступает фаза *первой четверти* ($\phi = 0,50$; возраст $v = 7^{\text{д}},4$). В этой фазе Луна восходит днем, к вечеру видна в южной области неба и заходит ночью.

Через 14–15 суток после новолуния Луна приходит в противостояние с Солнцем, и ее фаза становится полной – *полнолуние* ($\phi = 1,00$; $v = 14^{\text{д}},8$), так как солнечные лучи освещают все лунное полушарие, обращенное к Земле. Полная Луна восходит при заходе Солнца, заходит при его восходе, а в середине ночи видна в южной стороне неба.

После полнолуния Луна постепенно приближается к Солнцу с запада и освещается им слева (с востока). Примерно через неделю, когда угловое расстояние между Луной и Солнцем сократится до 90° (Луна в западной квадратуре), наступает фаза третьей, или *последней, четверти* ($\phi = 0,50$; $v = 22^{\text{д}},2$), при которой Луна восходит вблизи полуночи, к восходу Солнца оказывается в южной стороне неба и заходит днем.

При дальнейшем сближении Луны с Солнцем ее убывающие фазы становятся серповидными, она восходит и видна в восточной области неба незадолго до восхода Солнца, заходит в светлое время перед заходом Солнца, и вскоре снова вступает с ним в соединение – наступает очередное новолуние.

Период смены лунных фаз, называемый *синодическим* или *лунным месяцем*, продолжительнее сидерического месяца, так как и Луна, и Земля движутся в пространстве в прямом направлении. Помня, что звездный год $T_0 = 365^{\text{д}},26$, а звездный месяц $T = 27^{\text{д}},32$, найдем по формуле (5.9) среднюю продолжительность синодического месяца, а точнее,

$$S = \frac{T_0 \cdot T}{T_0 - T} = \frac{365,26 \cdot 27,32}{365,26 - 27,32} = 29^{\text{д}},53$$

$$S = 29^{\text{д}},5306 = 29^{\text{д}}12^{\text{ч}}44^{\text{м}}03^{\text{с}}.$$

Из-за неравномерного движения Луны и Земли продолжительность синодического месяца меняется от 29^д,25 до 29^д,83.

Поскольку синодический месяц отличается от сидерического месяца, то одинаковые фазы Луны наступают в различных точках: иной орбиты и поочередно во всех зодиакальных созвездиях.

§ 60. Солнечные затмения

В своем движении Луна часто заслоняет (покрывает) звезды зодиакальных созвездий. Значительно реже происходят покрытия Луной планет. Периодически Луна частично или полностью заслоняет Солнце – происходят *солнечные затмения*.

Освещаемая Солнцем Луна отбрасывает в пространство сходящийся конус тени и окружающий его расходящийся конус полутени. Когда лунная тень и полутень падают на земную поверхность, на ней происходит солнечное затмение (рис. 63).

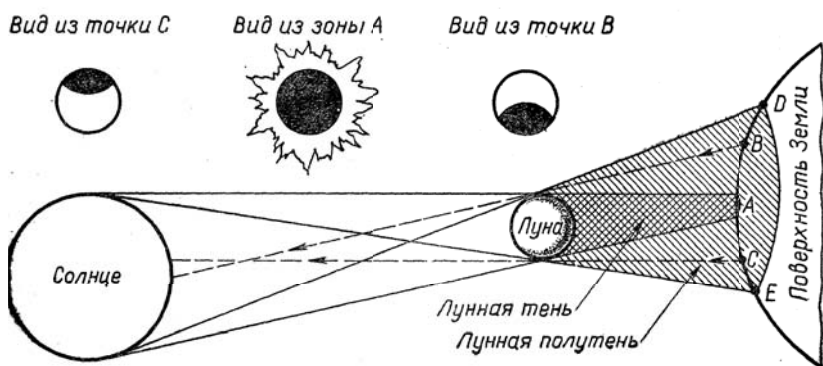


Рис. 63. Схема полного солнечного затмения

Из мест, оказавшихся в лунной тени (*A* на рис. 63), видно *полное солнечное затмение* (Солнце полностью закрыто Луной). В местностях, покрытых лунной полутенью (*B* и *C* на рис. 63), происходит *частное солнечное затмение* (солнечный диск заслонен Луной не полностью): из южной зоны (*C*) полутени видна закрытой северная (верхняя) часть солнечного диска, а из северной зоны (*B*) – южная (нижняя) его часть.


$$\Phi = d / d\odot,$$
$$d_{\odot} = 2\rho_{\odot}, \quad \text{a} \quad d' = \rho_{\odot} + \sigma - \rho_{\pi}, \quad \text{to} \quad d = 2\rho_{\odot} - d' = \rho_{\odot} + \rho_{\pi} - \sigma$$
$$\Phi = \frac{\rho_a + \rho_c - \sigma}{2\rho_c}. \quad (6.1)$$
$$\sigma = \rho_{\odot} + \rho_{\pi} \quad \text{и} \quad \text{фаза } \Phi = 0,$$

а за этой границей затмения вообще не происходит. Следовательно, солнечные затмения принадлежат к оптическим явлениям.

Лунная тень и полутень на земной поверхности имеют вид овальных пятен, форма которых зависит от положения Солнца и Луны над горизонтом: чем меньше их высота, тем более полого к земной поверхности направлена ось обоих конусов и тем более вытянуты пятна тени и полутени. Если же солнечное затмение происходит вблизи зенита, что возможно только в тропическом поясе Земли, то форма лунной тени и полутени на ней близка к круговой.



Рис. 65. Карта солнечного затмения 1 августа 2008 г.
Выделена полоса полной фазы

Из-за движения Луны с запада к востоку ее тень и полутень пробегают по земной поверхности в том же направлении, несколько уклоняясь либо к северу, либо к югу. Полоса земной поверхности, которой пробегает лунная тень, называется *полосой полной фазы* (рис. 65). В середине нее проходит центральная линия затмения с которой видно симметричное покрытие солнечного диска лунным: в середине затмения центры обоих дисков совпадают ($\sigma = 0$) и наибольшая полная фаза затмения

$$\Phi_m = (\rho_{\odot} + \rho_d)/2 \rho_{\odot} \quad (6.2)$$

При $\rho_{\odot} = \rho_{\text{л}}$ наибольшая фаза $\Phi_m = 1$ и длится одно мгновение. При самых благоприятных условиях, когда $\rho_{\text{л}} = 16',8$ (Луна в перигее) и $\rho_{\odot} = 15',8$ (Земля в афелии), что возможно только в самом конце июня и в начале июля, $\rho_{\text{л}} / \rho_{\odot} = 1,06$. И наибольшая фаза полного затмения $\Phi_m = 1,03$.

Ширина полосы полной фазы зависит от взаимных расстояний Луны, Земли и Солнца во время затмения и чаще всего бывает от 40 до 100 км, но даже при минимальном геоцентрическом расстоянии Луны (Луна в перигее) не превышает 270 км, и тогда диаметр лунной полутени близок к 6750 км.

Но уже при средних расстояниях Луны от Земли и Земли от Солнца лунный диск (диаметр $31',1$) меньше солнечного ($32',0$) и конус лунной тени не доходит до земной поверхности примерно на 4700 км (рис. 66). Поэтому Луна не закрывает Солнца полностью, и вместо полного происходит *кольцеобразное затмение*: вокруг темного лунного диска видно узкое яркое кольцо незакрытой солнечной поверхности. Наибольшая фаза кольцеобразного затмения тоже определяется по формуле (6.2), и так как $\rho_{\text{л}} < \rho_{\odot}$, то $\Phi_m < 1$; но даже при наименьшем $\rho_{\text{л}} = 14',7$ (Луна в апогее) и наибольшем $\rho = 16',3$ (Земля в перигелии), что возможно только в самом конце декабря и начале января, кольцеобразная фаза не менее $\Phi = 0,95$.

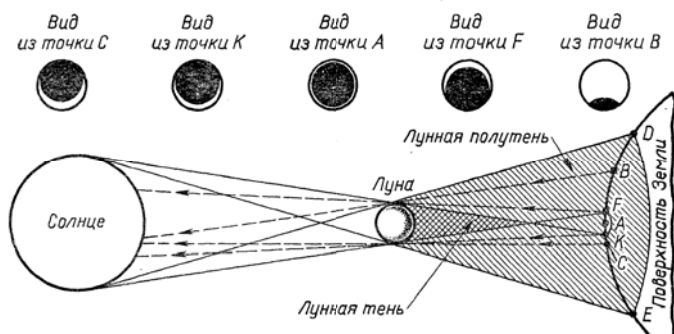


Рис. 66. Схема кольцеобразного солнечного затмения

Полные и кольцеобразные солнечные затмения часто называются *центральными*. Если на земную поверхность падает только лунная полутень, то происходит лишь *частное солнечное затмение*.

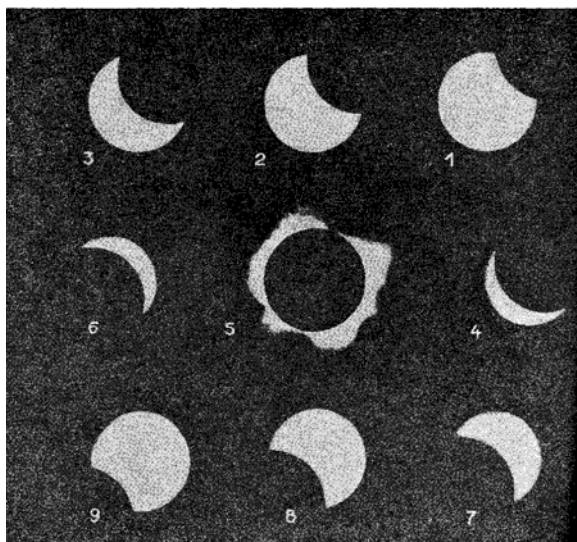


Рис. 67. Ход полного солнечного затмения

Солнечное затмение начинается с правого, западного края Солнца, на диске которого появляется небольшой ущерб, имеющий форму окружности того же радиуса. Постепенно фаза затмения увеличивается, и солнечный диск принимает вид непрерывно суживающегося серпа. Если затмение частное, то в середине затмения его фаза достигает некоторого наибольшего значения $\Phi < 1$, а затем уменьшается и затмение оканчивается на левом, восточном краю солнечного диска. В полосе полной фазы затмения начинается с частных фаз (1, 2, 3, 4, рис. 67). Когда Луна полностью закроет Солнце, наступает полумрак, как в темные сумерки, и на потемневшем небе обычно появляются самые яркие звезды и планеты, а вокруг Солнца видна солнечная корона — внешние слои солнечной атмосферы, невидимые вне затмения из-за их небольшой яркости (5, рис. 67). Вскоре, чаще всего через 2–3 мин, Луна открывает западный солнечный край, полная фаза затмения оканчивается, быстро светлеет, исчезают звезды, планеты и солнечная корона, фазы затмения убывают (6–9, рис. 67) и оно заканчивается.

В каждой местности затмение начинается и оканчивается в различные моменты времени, зависящие от расположения местности и от скорости движения по ней лунной тени (полутени).

Наибольшая продолжительность полной фазы затмения не превышает $7^m 31^s$ и возможна только в экваториальной зоне Земли при максимальном диаметре лунной тени (270 км). Условия для таких продолжительных полных затмений наступают крайне редко. На протяжении полутора тысяч лет, с VII до начала XXIII в., не было и не будет ни одного такого затмения. Ближайшее полное солнечное затмение длительностью в $7^m 29^s$ произойдет лишь 16 июля 2186 г.

Наибольшая продолжительность кольцеобразной фазы затмения достигает $12^m,3$, а частного затмения — $3^m,5$. Но большинство солнечных затмений длится до $2^m,5$, а их полная или кольцеобразная фаза всего лишь 2–3 минуты.

Общая длительность полного затмения на Земле, с момента вступления до момента схода лунной тени, составляет обычно от 1^m до $3^m,5$, и за этот промежуток времени лунная тень пробегает по Земле путь от 6000 до 12 000 км. Начинается затмение в западных районах земной поверхности при восходе Солнца и заканчивается в восточных районах при его заходе. Общая продолжительность на Земле всех фаз затмения может достигать 6 часов.

§ 61. Условия наступления солнечных затмений

Представим себе эклиптику, пересекающийся с нею в лунных узлах ($\odot$ и $\oslash$) под углом $i = 5^\circ 09'$ лунный путь и положения Солнца и Луны в различные новолуния (рис. 68).

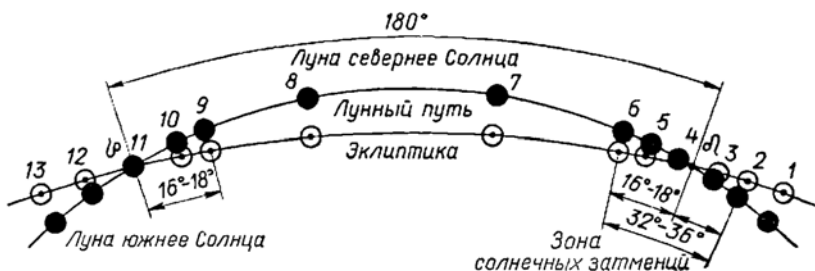


Рис. 68. Положения Луны и Солнца в различные новолуния

При новолуниях, происходящих вдали от лунных узлов (новолуния 1, 7, 8, 13), солнечные затмения невозможны – Луна проходит на небе южнее или севернее Солнца. И только при новолуниях вблизи лунных узлов наступают частные (новолуния 3, 5, 10, 12) и полные или кольцеобразные (новолуния 4, 11) солнечные затмения. Чтобы произошло частное затмение, необходимо внешнее касание солнечного и лунного дисков (новолуния 2, 6, 9).

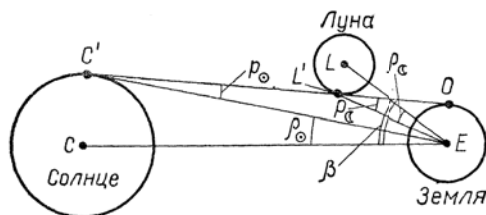


Рис. 69. Условие наступления солнечного затмения

Это условие показано на рис. 69, где C , E и L – центры Солнца, Земли и Луны, а O – точка земной поверхности, откуда видно внешнее касание дисков. Тогда CE – плоскость эклиптики, $CEL = \beta$ – эклиптическая широта Луны, $CEC' = \rho_{\odot}$ – радиус солнечного диска, $OC'E = p_{\odot}$ – солнечный горизонтальный параллакс, $LEL' = \rho_{\text{л}}$ – радиус лунного диска $OL'E = p_{\text{л}}$ – горизонтальный параллакс Луны. Очевидно,

$$-CEE = -CEC' + -C'EL' + -L'EL = \rho_{\odot} + -C'EL' + \rho_{\text{л}},$$

$$\text{а } -C'EL' = -OL'E - -OC'E = p_{\text{л}} - p_{\odot},$$

следовательно,

$$\beta = \rho_{\text{л}} + \rho_{\odot} + p_{\text{л}} - p_{\odot}.$$

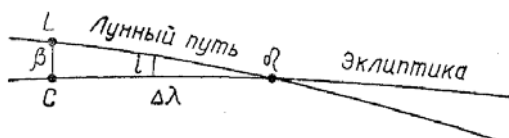


Рис. 70. Положение Луны в начале солнечного затмения

Из прямоугольного сферического треугольника (рис. 70), вершинами которого служат центр L лунного диска, центр S солнечного диска и лунный узел $\mathcal{Q}$, видно, что частное солнечное затмение начинается на расстоянии $\Delta\lambda$ от лунного узла, причем согласно формуле (1.12)

$$\sin\Delta\lambda = \operatorname{tg}\beta \operatorname{ctg}i \quad (6.3)$$

При наибольших значениях $\rho_{\odot} = 16',3$, $\rho_{\text{л}} = 16',8$ и $p_{\text{л}} = 61',5$ эклиптическая широта Луны $\beta = 94',5$ и $\Delta\lambda = 18^\circ$, а при наименьших $\rho_{\odot} = 15',8$, $\rho_{\text{л}} = 14',7$ и $p_{\text{л}} = 53',9$, $\beta = 84',3$ и $\Delta\lambda = 16^\circ$.

Следовательно, частные солнечные затмения возможны в новолуния, наступающие не далее 18° по обе стороны от лунных узлов, а при расстоянии в 16° и менее они происходят обязательно; чем ближе к узлу, тем больше максимальная фаза затмения.

Полные и кольцеобразные солнечные затмения, наступающие гари внутреннем касании дисков Луны и Солнца ($\Delta\lambda$), невозможны в новолуния, происходящие на расстоянии $\Delta\lambda > 11^\circ,5$ от лунных узлов и неизбежны при $\Delta\lambda \leq 10^\circ,1$. С уменьшением $\Delta\lambda$ наибольшая фаза и продолжительность затмения увеличиваются, достигая максимума в самом узле.

Участок эклиптики, в пределах которого происходят солнечные затмения, называется *зоной солнечных затмений*. При каждом лунном узле протяженность зоны солнечных затмений составляет от 32 до 36° (см. рис. 68). Солнце перемещается по эклиптике к востоку ежедневно примерно на 1° , а из-за отступления лунных узлов зоны затмений смещаются навстречу Солнцу и Луне на $0^\circ,053$ за сутки. Поэтому каждую зону затмений Солнце проходит за 31–34 суток. Новолуния же чередуются через синодический месяц $S = 29^{\text{д}},53$. Следовательно, в каждой зоне обязательно происходит по одному солнечному затмению разного вида, а иногда (по краям зоны) и по два частных затмения с небольшой фазой. Двух центральных затмений подряд в одной зоне быть не может, так как такие затмения происходят не далее $11^\circ,5$ от лунного узла, а зону в 23° Солнце проходит за 22 суток, в пределах которых возможно только одно новолуние.

§ 62. Лунные затмения и условия их наступления

Лунные затмения представляют собой физическое явление, при котором Луна проходит сквозь земную тень (рис. 71). В зависимости от гелиоцентрического расстояния Земли длина ее тени меняется от 1359 тыс. км (Земля в перигелии) до 1405 тыс. км (Земля в афелии), а при среднем расстоянии близка к 1382 тыс. км, то есть всегда значительно больше геоцентрического расстояния Луны. Ось ной тени лежит в плоскости земной орбиты и поэтому тень и полутень проектируются на небо в виде концентрических кругов (контуров), центр которых находится на эклиптике, в ее точке, противоположной Солнцу. Следовательно, лунные затмения возможны только при противостояниях Луны Солнцу (в полнолуния), наступающих вблизи лунных узлов.

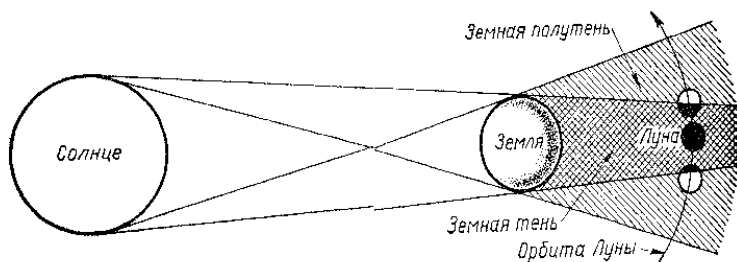


Рис. 71. Схема лунного затмения

При частичном погружении Луны в земную тень лунное затмение называется *частным тeneвым*, а при полном погружении — *полным тeneвым затмением*. Степень погружения Луны в земную тень зависит от положений Луны и контура земной тени относительно лунного узла. Частные лунные затмения возможны в зоне, границы которой на эклиптике определяются внешним касанием Луны с земной тенью. Эти границы отстоят от лунных узлов на расстоянии $\Delta\lambda$, определяемом формулой (6.3):

$$\sin\Delta\lambda = \operatorname{tg}\beta \operatorname{ctg}i,$$

где эклиптическая широта Луны $\beta = \sigma = \rho + \rho_{\text{л}}$, причем (σ – угловое расстояние между центрами лунного диска и контура земной тени, ρ – угловой радиус контура земной тени и $\rho_{\text{л}}$ – радиус лунного диска. Здесь не нужно учитывать параллакса Луны, так как она и падающее на нее пятно земной тени находятся на одинаковом расстоянии от Земли.

На среднем расстоянии Луны от Земли радиус тени $\rho = 42'$, на наименьшем расстоянии Луны $\rho = 47'$, а на наибольшем расстоянии $\rho = 38'$. При средних значениях $\rho = 42'$ и $\rho_{\text{л}} = 15',5$ частные затмения происходят при $\Delta\lambda = 11^\circ$, а при крайних значениях $\Delta\lambda$ изменяется на $\pm 1^\circ$.

Полные лунные затмения начинаются при $\sigma = \rho - \rho_{\text{л}}$ и происходят не далее $\Delta\lambda = 5^\circ \pm 0^\circ,6$ от узла. Зону частных лунных затмений в $2\Delta\lambda = 24^\circ$ земная тень проходит, как и Солнце, за 23 суток, на протяжении которых может наступить только одно полнолуние, а может быть и ни одного. Поэтому вблизи каждого лунного узла возможно только одно теневое лунное затмение.

Луна входит в земную тень своим левым краем и им же выходит из тени. Чем ближе к лунному узлу происходит затмение, тем глубже погружается Луна в земную тень и тем длительнее фаза лунного затмения

$$\Phi = \frac{\rho + \rho_{\text{л}} - \sigma}{2\rho_{\text{л}}} \quad (6.4)$$

причем в середине затмения σ становится минимальным, определяющим наибольшую фазу затмения Φ_m . При частном затмении $\rho - \rho_{\text{л}} < \sigma < \rho + \rho_{\text{л}}$ $\Phi_m < 1$. При полном затмении $\sigma \leq (\rho - \rho_{\text{л}})$ и $\Phi_m \geq 1$. В редких случаях полное лунное затмение происходит в самом узле (центральное затмение), и тогда в дине затмения $\sigma = 0$, а наибольшая фаза может достигать $\Phi_m = 1,90$.

Продолжительность лунных затмений зависит от их условий.

Частное затмение с небольшой фазой длится несколько минут; полное затмение – от одного мгновения (при $\Phi_m = 1$) до $1^{\text{ч}},8$ (при $\Phi_m = 1,90$), а вместе с частными фазами до $3^{\text{ч}},8$.

При небольших частных фазах затмения земная тень на Луне кажется черной из-за резкого контраста с яркой лунной поверхностью. В полном затмении Луна приобретает бурый, темно-красный, а иногда и красно-кирпичный цвет, так как длинновол-

новые солнечные лучи, преломляясь в земной атмосфере, все же освещают Луну.

Лунные затмения видны со всего ночного полушария Земли, где Луна находится над горизонтом, и начинаются (и оканчиваются) одновременно для всего этого полушария.

§ 63. Частота и периодичность затмений

Из-за отступления лунных узлов на $19^{\circ},3$ за год ($365^{\text{д}},3$) Солнце, смещаясь по эклиптике ежесуточно на 1° , возвращается к одному тому же узлу через промежуток времени $T_{\text{д}} = 365^{\text{д}},3 - 19^{\text{д}},3 = 346$, а точнее, через $T_{\text{д}} = 346,62$ суток, называемый *драконическим годом*. Зоны затмений расположены у диаметрально противоположных лунных узлов. Пройдя один лунный узел, Солнце вступает в другой узел через половину драконического года, то есть через 173 суток, а шесть синодических месяцев составляют $6 \cdot 29^{\text{д}},53 = 177$ суток, и Луна тоже окажется в зоне затмений. Поэтому ежегодно бывает два периода (две эпохи) затмений, разделенные интервалом в 177–178 суток. За полгода (183 суток) эпохи затмений смещаются на 5 суток вперед, на более ранние календарные даты и постепенно переходят на разные сезоны года.

В каждой зоне затмений обязательно происходит по одному солнечному затмению и не более одного лунного, которого может и не быть. Поэтому минимальное число затмений в году – два, и оба солнечных. Если еще произойдет одно или два лунных затмения, то общее число затмений за год составит 3 или 4. Но если в обеих зонах будет по два частных солнечных затмения с небольшой фазой (затмения на краях зон), то между затмениями каждой пары обязательно произойдет в середине зоны по полному лунному затмению, и общее число затмений в году увеличится до шести. Если же первое из этих четырех частных солнечных затмений наступит в начале января, то через $2 \cdot 177^{\text{д}} = 354$ дня, в конце декабря, может произойти еще одно частное солнечное затмение, и тогда наибольшее число затмений в году составит 7, из них 5 частных солнечных и 2 полных лунных. Возможна и такая комбинация – 4 частных солнечных и 3 полных лунных. Подобные комбинации затмений крайне редки, но вторая из них была в 1982 г.

Обычно на протяжении года происходит 2–3 солнечных и 1–2 лунных затмения. Все же лунные затмения наблюдаются чаще

солнечных потому, что они видны со всего ночного полушария Земли, а солнечные — только из области лунной тени и полутени, которые в разные годы пробегают по различным местам земной поверхности. В определенной местности полные солнечные затмения видны в среднем один раз за 300 лет, хотя имеются и исключения.

Солнечные и лунные затмения неизбежно повторяются, так как их наступление зависит от трех периодов: синодического месяца $S = 29^д,5306$, драконического месяца $S_{\Omega} = 27^д,2122$ и драконического года $T_{\Omega} = 346^д,6200$. В самом деле,

$$\begin{aligned} 223S &= 223 \cdot 29^д,5306 = 6585^д,32, \\ 242S_{\Omega} &= 242 \cdot 27^д,2122 = 6585^д,35, \\ 19T_{\Omega} &= 346^д,6200 = 6585^д,78. \end{aligned}$$

Следовательно, каждое затмение повторяется через период в $6585^д,3 = 18$ лет 11,3 суток (или 10,3 суток, если в этом периоде содержится пять високосных лет), названный *саросом* (по-египетски период). Но повторения происходят в несколько различных условиях, так как Солнце и Луна будут находиться на иных расстояниях от лунных узлов, чем прежде.

На протяжении сароса в среднем происходит 70–71 затмение, из которых 42–43 солнечных (14 полных, 13–14 кольцеобразных и 15 частных) и 28 лунных.

Последнее полное солнечное затмение, видимое в России произошло 1 августа 2008 г., а в Москве произойдет лишь 16 октября 2126 г.

РАЗДЕЛ III. ОСНОВЫ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ И ДИНАМИКИ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Глава VII. Основы небесной механики

§ 64. Закон всемирного тяготения Ньютона

Наука, изучающая движение небесных тел, называется *небесной механикой*. Она основывается на законе тяготения Ньютона, следствием которого являются законы Кеплера.

Закон всемирного тяготения был опубликован Ньютоном (1643–1727) в знаменитом произведении «Математические начала натуральной философии» в 1687 г.

Ньютон поставил и решил геометрическим способом следующую задачу: планета обращается по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится Солнце; требуется определить закон центростремительной силы, действующей на планету со стороны Солнца, то есть направленной к фокусу эллипса.

Аналитическое решение этой задачи состоит в следующем. Прежде всего установим, что приложенная к планете сила центральная. Из второго закона Кеплера следует, что секториальная скорость планеты неизменна, то есть

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = r^2 \dot{\theta} = C, \quad (7.1)$$

где r – гелиоцентрический радиус-вектор планеты, а θ – ее истинная аномалия. Из формулы (7.1) можно легко получить выражение

$$mr^2 \dot{\theta} \sin(r^{\wedge}v) = \text{const}, \quad (7.2)$$

где m – масса и v – скорость планеты.

Левая часть уравнения (7.2) есть модуль момента количества движения планеты относительно Солнца:

$$[\mathbf{L} \mathbf{M} \mathbf{L}] = \quad (7.3)$$

Так как согласно первому закону Кеплера орбита планеты плоская кривая, то момент количества движения будет постоянен не только по модулю, но и по направлению:

$$\vec{r} \times m\vec{v} = \vec{C}'. \quad (7.4)$$

Согласно теореме о моменте количества движения

$$\frac{d}{dt}(\vec{r} \times m\vec{v}) = \vec{r} \times \vec{F}, \quad (7.5)$$

где F – сила, действующая на планету со стороны Солнца. Левая часть уравнения (7.5) тождественно равна нулю, то есть

$$\vec{r} \times \vec{F} = 0. \quad (7.6)$$

Отсюда следует, что векторы $\vec{r}$ и $\vec{F}$ во все время движения планеты коллинеарны и, следовательно, линия действия силы $\vec{F}$ всегда проходит через центральное тело (Солнце), то есть сила является центральной. Для определения ее величины воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии

$$d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F_r dr, \quad (7.7)$$

где m – масса планеты, v – модуль ее скорости, $\vec{r}$ – ее гелиоцентрический радиус-вектор, $\vec{F}$ – сила, действующая на планету со стороны Солнца, F_r – величина ее проекции на радиус-вектор.

Пользуясь формулой (7.1), преобразуем выражение квадрата скорости планеты:

$$\begin{aligned} v^2 &= \dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2 = \left(\frac{dr}{d\theta} \cdot \dot{\theta}\right)^2 + r^2 \dot{\theta}^2 = r^4 \dot{\theta}^2 \left[\left(\frac{1}{r^2} \frac{dr}{d\theta}\right)^2 + \frac{1}{r^2} \right] = \\ &= C^2 \left\{ \left[\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{r} \right) \right]^2 + \frac{1}{r^2} \right\}. \end{aligned}$$

Обозначая теперь дифференцирование по θ штрихом и вводя обозначение $u = 1/r$, перепишем предыдущее соотношение следующим образом:

$$v^2 = C^2(u'^2 + u^2).$$

Заменив в уравнении (7.7) квадрат скорости последним выражением, найдем:

$$d \left[\frac{mC^2}{2} (u'^2 + u^2) \right] = F_r dr,$$

откуда

$$\frac{mC^2}{2} (2u'u'' + 2uu') d\theta = -F_r \frac{u'}{u^2} d\theta$$

и окончательно получаем выражение

$$F_r = -mC^2 u^2 (u'' + u), \quad (7.8)$$

которое называется уравнением Бине.

В используемых здесь переменных фокальное уравнение эллипса (см. уравнение (5.1)) примет вид:

$$u = \frac{1 + e \cos \theta}{p}.$$

Подставляя в уравнение Бине (7.8) это значение u , получим:

$$F_r = -mC^2 u^2 \left(-\frac{e \cos \theta}{p} + \frac{1 + e \cos \theta}{p} \right),$$

то есть

$$F_r = -\frac{mC^2}{pr^2}$$

или

$$F_r = -\frac{km}{r^2}, \quad (7.9)$$

где

$$k = \frac{C^2}{p}.$$

Покажем, что величина k будет общей для всех тел Солнечной системы. Из (7.1) интегрированием находим:

$$\frac{2\pi ab}{T} = C, \quad \text{или} \quad C^2 = \frac{4\pi^2 a^2 b^2}{T^2},$$

где a – большая полуось и b – малая полуось эллиптической орбиты.

Так как $p = a(1 - e^2) = b^2/a$, то

$$C^2 = \frac{4\pi^2 pa^3}{T^2}.$$

Тогда очевидно, что $k = \frac{C^2}{p} = 4\pi^2 \frac{a^3}{T^2}$

есть величина постоянная для всех тел Солнечной системы. Итак, сила притяжения планеты Солнцем направлена к Солнцу, и согласно формуле (7.9) модуль этой силы

$$F = \frac{km}{r^2}. \quad (7.10)$$

Аналогично можно написать, что планета воздействует на Солнце с силой, модуль которой

$$F_n = \frac{kM}{r^2}, \quad (7.11)$$

где M – масса Солнца и κ – коэффициент пропорциональности, свойственной притяжению планетой.

По третьему закону Ньютона из (7.10) и (7.11) находим:

$$\frac{\kappa m}{r^2} = \frac{\kappa M}{r^2},$$

откуда

$$\frac{k}{M} = \frac{\kappa}{m} = \text{const.}$$

Обозначая эту константу через G , находим, что

$$k = GM$$

и согласно (7.10) модуль силы взаимного тяготения Солнца и планеты

$$F = G \frac{Mm}{r^2}. \quad (7.12)$$

Константа G называется гравитационной постоянной, и ее численное значение зависит от системы единиц измерений. В системе СИ

$$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}.$$

Предположив, что сила тяжести на Земле тождественна по своей физической природе силе взаимного тяготения, Ньютон проверил это предположение по движению Луны вокруг Земли. Ускорение силы тяжести на земной поверхности

$$g = G \frac{m}{R^2} = 9,81 \text{ м / с}^2,$$

и поэтому в поле тяготения Земли Луна должна испытывать гравитационное ускорение

$$g' = G \frac{m^2}{r^2},$$

где m – масса Земли, ее средний радиус $R = 6371$ км, а среднее расстояние Луны от Земли $r \approx 60R$.

Тогда

$$g' = \frac{g}{60^2} = \frac{9,81}{3600} = 0,0027 \text{ м / с}^2.$$

Так как это ускорение центростремительное, то оно может быть найдено по параметрам обращения Луны вокруг Земли. Период обращения Луны вокруг Земли

$T = 27,32$ сут. $= 27,32 \cdot 86400$ с, $r = 60R = 60 \cdot 6371 \cdot 10^3$ м, и поэтому

$$g' = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 r = \left(\frac{2 \cdot 3,1416}{27,32 \cdot 86400} \right)^2 \cdot 60 \cdot 6371 \cdot 10^3 = 0,0027 \text{ м / с}^2.$$

Таким образом, величина центростремительного ускорения Луны, вычисленная различными способами, оказалась одинаковой. Следовательно, оно имеет гравитационную природу и вызывается той же физической силой, что и тяжесть на Земле. На основе этого результата Ньютон сделал вывод о тождественности силы тяжести силе взаимного тяготения между всеми телами Вселенной. Закон всемирного тяготения Ньютон сформулировал так: «каждые две материальные частицы взаимно притягиваются с силой, пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними».

Формула (7.12) является математической формулировкой этого закона.

§ 65. Задача двух тел

Основные закономерности в поступательном движении естественных и искусственных небесных тел можно установить из исследования движения двух тел под действием силы взаимного тяготения.

Если массы двух тел сопоставимы, то такая задача называется *общей задачей двух тел*; если массой одного из тел можно пренебречь, то задача называется *ограниченной задачей двух тел*.

Решение задачи двух тел в приложении к телам Солнечной системы, а также к двойным звездам на достаточно больших промежутках времени дает удовлетворительное согласие теории с наблюдениями. Это обстоятельство объясняется особенностями динамического строения Солнечной системы, а именно:

1. Достаточная взаимная удаленность тел Солнечной системы, обеспечивающая возможность замены реальных тел материальными точками.

2. Малость масс всех тел планетной системы по сравнению с массой Солнца, что позволяет на первом этапе изучения движения планет учитывать только солнечное притяжение и пренебрегать притяжением других больших планет.

3. Близость фигур Солнца и больших планет к сферам, допускающая независимое рассмотрение поступательного и вращательного движения тел планетной системы.

На практике достаточно изучить лишь движение одной точки относительно системы координат с началом в другой точке. Поэтому возьмем систему координат $Sxyz$ с неизменными направлениями осей и с началом в притягивающей точке S массой M . В соответствии с законами классической механики уравнение Ньютона для второго тела массой m в точке P запишется в форме:

$$m\vec{w} = \vec{F} + \vec{F}_и, \quad (7.13)$$

где $\vec{w}$ – относительное ускорение точки P , $\vec{F}$ – сила ньютоновского тяготения, $\vec{F}_и$ – сила инерции, вызванная поступательным движением системы координат $Sxyz$ ускоренно вместе со своим началом S относительно какой-либо инерциальной системы отсчета.

В согласии с законом тяготения Ньютона модуль силы $F = GMm/r^2$, где G – постоянная тяготения, а r – расстояние точки P от начала координат. Направление этой силы задается единич-

ным вектором $\frac{\vec{r}}{r}$. Поэтому

$$\vec{F} = -\frac{GMm\vec{r}}{r^3}.$$

На точку S действует противоположно направленная сила $-\vec{F}$. Тогда ускорение поступательного движения системы координат равно $\frac{Gm\vec{r}}{r^3}$. Умножая это ускорение на массу точки P и изменяя знак произведения, получим, что

$$\vec{F}_u = -\frac{Gm^2\vec{r}}{r^3}.$$

Теперь, подставив найденные значения сил $\vec{F}$ и $\vec{F}_u$ в соотношение (7.13), после упрощений приходим к уравнению относительного движения:

$$m\ddot{\vec{r}} = -G(M+m)\frac{\vec{r}}{r^3} = \frac{\mu}{r^3}\vec{r}. \quad (7.14)$$

В ограниченной задаче двух тел при $m \ll M$, $\mu = GM$.

§ 66. Обобщенные законы Кеплера

Так как решение уравнения (7.14) достаточно подробно рассматривается в курсах теоретической механики, то ниже мы ограничимся кратким рассмотрением основных следствий из его решений.

Дифференциальное уравнение (7.14) имеет следующие первые интегралы:

Интеграл площадей

$$\vec{r} \times \vec{v} = \vec{C}, \quad (7.15)$$

где $\vec{C} = \vec{C}_m$ — постоянный вектор момента количества движения. В силу постоянства $\vec{C}$ орбита тела будет являться плоской кривой. Если в этой плоскости ввести полярные координаты r и θ (см. рис. 42), то интеграл площадей можно записать в виде

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = C, \quad (7.16)$$

из которого следует второй закон Кеплера (закон площадей). Если $d\sigma$ – площадь, описываемая радиус-вектором за интервал времени dt , то секториальная скорость

$$v = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{2} r^2 \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} C. \quad (7.17)$$

Отсюда

$$\sigma = \frac{1}{2} \int_{t_0}^t C dt = \frac{1}{2} C (t - t_0). \quad (7.18)$$

Иными словами, площадь, описываемая радиус-вектором, пропорциональна интервалам времени движения (см. § 49).

Сила, входящая в уравнение относительного движения, является потенциальной. Потенциал этой силы определяется выражением

$$\Pi = -G \frac{m(M+m)}{r} = -m \frac{\mu}{r}.$$

Интеграл энергии

Из уравнения движения (7.14) следует закон сохранения энергии

$$\frac{v^2}{2} - \frac{\mu}{r} = h. \quad (7.19)$$

Здесь h – постоянная, равная полной механической энергии, отнесенной к массе движущегося тела.

Так как $v^2 \geq 0$, то при $h > 0$ уравнение (7.19) будет выполняться для любых r и движение не ограничено в пространстве. При $h < 0$ движение ограничено в пространстве.

В общем виде уравнение орбиты (решение уравнения (7.14)) имеет вид:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta}, \quad (7.20)$$

где θ – истинная аномалия и e – эксцентриситет.

Величина эксцентриситета определяется значением полной энергии и равна:

$$e = \sqrt{1 + \frac{2hC^2}{\mu^2}}. \quad (7.21)$$

Фокальный параметр равен:

$$p = a(1 - e^2) = \frac{C^2}{\mu}. \quad (7.22)$$

Как видно из (7.21), возможны три вида траекторий:

- 1) $0 \leq e < 1$ ($h < 0$) – эллипс ($e = 0$ – окружность);
- 2) $e = 1$ ($h = 0$) – парабола;
- 3) $e > 1$ ($h > 0$) – гипербола.

Формула (7.20) определяет собой аналитическое выражение **первого обобщенного закона Кеплера**.

Под действием силы притяжения одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений – кругу, эллипсу, параболе или гиперболе.

В общем случае при эллиптическом движении наиболее близкая к центральному телу точка орбиты называется *перигелием*, а наиболее далекая – *апогелием*. При движении вокруг Солнца эти точки называются *перигелием* и *афелием*.

Третий обобщенный закон Кеплера. Для эллиптического движения легко получить связь между сидерическим периодом обращения T и большой полуосью a орбиты. Учитывая, что площадь эллипса $\sigma = \pi a^2 \sqrt{1 - e^2}$ и радиус-вектор описывает его за период T , имеем из (7.17):

$$C = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1 - e^2}}{T}.$$

С другой стороны, из (7.22) следует, что

$$C = \sqrt{\mu a(1 - e^2)}. \quad (7.23)$$

Приравнявая эти два выражения, получим:

$$\frac{T^2(M + m)}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G}. \quad (1.2)$$

Это соотношение представляет собой третий обобщенный закон Кеплера. Он справедлив для любых двух притягивающихся

материальных тел, будь то планеты, двойные звезды или искусственные небесные тела, ибо в правую часть соотношения (7.24) входят универсальные постоянные.

Пусть M_1 – масса Солнца, m_1 – масса планеты, a_1 и T_1 – соответственно большая полуось и сидерический период обращения планеты вокруг Солнца. Если имеется другая система, например планета массой M_2 и спутник планеты массой m_2 , который обращается вокруг планеты с периодом T_2 на среднем расстоянии a_2 , то для этих двух систем справедлив третий обобщенный закон Кеплера (7.24), который принимает вид:

$$\frac{T_1^2(M_1 + m_1)}{T_2^2(M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (7.25)$$

При движении двух тел малой массы вокруг одного центрального тела, например при движении планет вокруг Солнца, в формуле (7.25) следует положить $M_1 = M_2$, $m_1 \ll M_1$ и $m_2 \ll M_2$, и тогда

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

то есть получаем третий эмпирический закон Кеплера (см. § 49).

Из выражения для эксцентриситета (7.21) и (7.23) легко найти, что

$$2h = -\frac{\mu}{a}.$$

Тогда уравнение интеграла энергии (7.19) принимает вид:

$$v^2 = \mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right). \quad (7.26)$$

Эта формула справедлива для любого типа движения. Для эллиптической орбиты $a > 0$, для параболической орбиты $a = \infty$, а для гиперболической $a < 0$.

Характеристические скорости кеплеровского движения.

Для каждого расстояния r от центрального тела имеются две характерные скорости: одна при $r = a$ – круговая скорость

$$v_a = \sqrt{\frac{\mu}{r}} = \sqrt{\frac{\mu}{a}}, \quad (7.27)$$

имея которую, обращающееся тело движется по круговой орбите; другая – параболическая скорость

$$v_n = \sqrt{\frac{2\mu}{r}},$$

при которой движущееся тело уходит от центрального тела по параболе ($a = \infty$). Очевидно, что при $r = a$ всегда $v_n = v_a \sqrt{2}$.

При обращении тела по эллиптической орбите средняя орбитальная скорость совпадает с круговой скоростью

$$v_a = \sqrt{\frac{\mu}{a}} = \frac{2\pi a}{T}, \quad (7.28)$$

где a – большая полуось орбиты и T – сидерический период обращения. Из равенств (7.26) и (7.28) найдем, что в любой точке эллиптической орбиты на расстоянии r от центрального тела обращающееся тело имеет скорость

$$v_a = v_a \sqrt{\frac{2a}{r} - 1}. \quad (7.29)$$

Скорость в перигеице определяется при $r = q = a(1 - e)$, а скорость в апогеице – при $r = q = a(1 + e)$.

В ограниченной задаче двух тел $\mu = GM$ и определяется только массой центрального тела. Пренебрегая в первом приближении взаимным притяжением планет, можно рассматривать движение каждой из них вокруг Солнца в условиях ограниченной задачи двух тел. Тогда у любой планеты средняя скорость

$$v_a = \sqrt{\frac{\mu}{a}}, \quad (7.30)$$

а у Земли

$$v_a = \sqrt{\frac{\mu}{a_0}} = \frac{2\pi a_0}{T_0} = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 149,6 \cdot 10^6 \text{ км}}{31,56 \cdot 10^6 \text{ с}} = 29,78 \text{ км/с}. \quad (7.31)$$

так как период обращения Земли $T_0 = 365,2564 \cdot 86400 = 31,56 \cdot 10^6$ с. Поделив равенство (7.30) на (7.31), найдем для любой планеты среднюю скорость

$$v_a = 29,78 \sqrt{\frac{a}{a_0}} \text{ км / с.}$$

А выразив a в астрономических единицах [а. е.] и помня, что $a_0 = 1$ а. е., окончательно получим:

$$v_a = \frac{29,78}{\sqrt{a}} \text{ км / с.} \quad (7.32)$$

§ 67. Задача многих тел

В природе невозможно указать пару гравитирующих тел, движение которых совершенно строго описывалось бы решением задачи двух тел. При точном анализе движения приходится учитывать возмущения от других притягивающих тел.

Поэтому наряду с задачей двух тел в астрономии рассматривается *задача трех тел*, а часто и *задача n (многих) тел*. В них речь идет об анализе движения надлежащего числа взаимно тяготеющих точечных масс. Количество тел, составляющих рассматриваемую систему, определяется физическими соображениями. Необходимо, чтобы систему n тел с большей степенью точности можно было бы считать замкнутой и изолированной.

Так, например, Солнечную систему можно моделировать задачей 9 тел (Солнце и 8 больших планет). В ряде случаев достаточно учитывать наряду с солнечным притяжением силы тяготения к наиболее массивным большим планетам – Юпитеру, Сатурну. Взаимные возмущения Юпитера и Сатурна столь значительны, что их движение надлежит изучать как минимум в рамках задачи трех тел. Движение Луны исследуется также на основе задачи трех тел (Солнце – Земля – Луна).

В задаче n тел необходимо найти $3n$ координат в виде явных функций времени. Так как каждая из координат определяется дифференциальным уравнением второго порядка, то общий порядок системы уравнений движения составляет $6n$. Задача допускает 10 классических интегралов уравнений движения. Их существование вытекает из общих теорем динамики системы.

Так как в системе тяготеющих тел все силы внутренние, то центр масс системы движется прямолинейно и равномерно (в инерциальной системе координат). Если через $\vec{r}_i$ обозначить радиус-вектор массы m_i , то для радиус-вектора $\vec{r}_c$ и скорости $\vec{v}_c$ – центра масс системы тел – справедливы соотношения

$$\vec{r}_c = \frac{1}{m} \sum m_i \vec{r}_i = \vec{C}_1 t + C_2 \quad \text{и} \quad \vec{v}_c = \frac{1}{m} \sum m_i \vec{v}_i = \vec{C}_1,$$

в которых $m = \sum m_i$, а $\vec{C}_1$ и C_2 – произвольные векторные постоянные. Проектируя эти векторные интегралы на оси координат, им шесть скалярных интегралов движения центра масс.

Поскольку главный момент действующих сил равен нулю, то момент количества движения системы постоянен:

$$\sum \vec{r}_i \times m_i \dot{\vec{r}}_i = \vec{C}' = \text{const.}$$

Последнее векторное уравнение в проекциях на оси координат дает три интеграла площадей.

Наконец, в согласии с законом сохранения полной механической энергии запишем интеграл энергии

$$\frac{1}{2} \sum m_i \dot{\vec{r}}_i^2 = U + h,$$

где U – потенциал сил взаимного тяготения, а h – произвольная постоянная

§ 68. Ограниченная задача трех тел

При изучении движения Луны, комет, астероидов, искусственных спутников и космических аппаратов чаще всего приходится сталкиваться с задачей трех тел. Аналитическое решение этой задачи в общем случае не найдено. В астрономии большое практическое применение нашла *ограниченная круговая задача трех тел*, в которой масса одного из трех тел ничтожно мала по сравнению с массами двух других, а массивные тела движутся по круговым кеплеровским орбитам вокруг общего центра масс.

Эта постановка задачи трех тел вполне приемлема при изучении движения астероидов, так как эксцентриситет орбиты Юпитера составляет 0,048 и им можно пренебречь. Круговая задача трех тел приемлема в динамике полета к Луне, так как эксцентриситет лунной орбиты также мал и приближенно равен 0,055.

Возьмем прямоугольную систему координат с началом координат в центре инерции O притягивающих масс m_1 и m_2 , основная плоскость которой совпадает с плоскостью орбит этих масс (рис. 72).

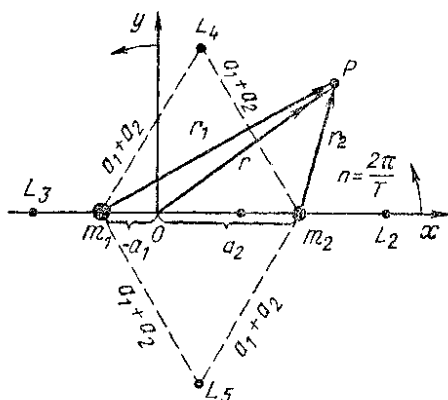


Рис. 72. Ограниченная задача трех тел: L_1, L_2, L_3 - коллинеарные (точка L_1 - между O и m_2) и L_4, L_5 - треугольные точки либрации (точки Лагранжа)

Этой координатной системе сообщим равномерное вращение вокруг оси аппликат с угловой скоростью $n = 2\pi / T$, равной среднему движению тяготеющих масс. Ось абсцисс проведем через притягивающие массы m_1 и m_2 , абсциссы которых остаются неизменными со временем и соответственно равны $x_1 = -a_1$, а $x_2 = a_2$. Заметим, что согласно третьему обобщенному закону Кеплера (7.24)

$$n^2 = \frac{G(m_1 + m_2)}{(a_1 + a_2)^3}.$$

Составим дифференциальные уравнения относительного движения третьего тела P , ограничившись для простоты случаем дви-

жения в плоскости орбит притягивающих масс. На это тело действуют силы ньютоновского тяготения со стороны тел с массами m_1 и m_2 , суммарный потенциал которых в точке положения тела P равен:

$$U = \frac{Gm_1}{r_1} + \frac{Gm_2}{r_2}.$$

Центробежное ускорение тела P равно $n^2 r$, а кориолисово ускорение

$$2[\vec{n} \times \vec{v}_r],$$

где $\vec{v}_r$ – относительная скорость тела P . Векторное уравнение движения имеет вид:

$$\vec{w}_r = \text{grad } U + n^2 \vec{r} + 2[\vec{n} \times \vec{v}_r]. \quad (7.33)$$

Здесь $\vec{w}_r$ – ускорение тела P относительно вращающейся системы координат.

Уравнение (7.33) в общем случае аналитически решено быть не может. Поэтому речь может идти о частных решениях или о приближенном построении решений.

Лагранж указал пять частных решений задачи, которым отвечают положения относительного равновесия на вращающейся плоскости, – точки Лагранжа. Три из них лежат на прямой, проходящей через притягивающие точки (*коллинеарные точки либрации* L_1, L_2, L_3). Другие два равновесных решения таковы, что все три тела постоянно находятся в вершинах равностороннего треугольника, если только в начальный момент их относительные скорости были равны нулю. Эти положения относительного равновесия называются *треугольными точками либрации* (L_4, L_5).

Сам Лагранж оценил их как «предмет чисто математического любопытства». Однако природа столь многообразна в своих проявлениях, что, как, оказалось, реализует и эти решения. Во-первых, имеются две группы астероидов – «троянцы» и «греки», которые приближенно находятся в двух треугольных точках либрации в системе «Солнце – Юпитер – астероид». Во-вторых, в 1961 г. в треугольных точках либрации системы Земля – Луна

были открыты пылевые облака. В настоящее время в точке либрации L_1 системы Солнце – Земля с 1995 г. функционирует солнечная гелиосферная обсерватория SOHO (**S**olar and **H**eliospheric **O**bservatory), непрерывно наблюдающая за Солнцем и солнечной короной в оптических, инфракрасных ультрафиолетовых и рентгеновских лучах. В точке L_2 неоднократно запускались обсерватории для наблюдений реликтового излучения и инфракрасного излучения небесных тел.

Так как в точках либрации тело находится в состоянии покоя (в рассматриваемой системе координат), то скорость тела $v(t) = 0$, его ускорение

$$w(t) = 0 \text{ и } n^2 \vec{r} = \text{grad } \frac{n^2 r^2}{2}.$$

Полагая $U + n^2 r^2 / 2 = \Omega$, уравнение (7.33) для нахождения точек либрации приведем к виду:

$$\text{grad } \Omega = 0. \quad (7.34)$$

Преобразуем сначала выражение для функции Ω , приняв во внимание, что $r_i^2 = (x - x_i)^2 + y^2$ ($i = 1, 2$). Рассмотрим выражение

$$m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 = (m_1 + m_2) r^2 - 2(m_1 x_1 + m_2 x_2) x + m_1 a_1^2 + m_2 a_2^2.$$

Так как начало координат совмещено с центром масс тел m_1 и m_2 , то $m_1 x_1 + m_2 x_2 = 0$; тогда

$$r^2 = \frac{m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2}{m_1 + m_2} - \frac{m_1 a_1^2 + m_2 a_2^2}{m_1 + m_2}.$$

Подставим в потенциал Ω выражения для n^2 и r^2 . С точностью до аддитивной постоянной будем иметь:

$$\Omega = \frac{Gm_1}{r_1} + \frac{Gm_2}{r_2} + \frac{1}{2} \frac{G(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2)}{(a_1 + a_2)^3}.$$

Условие существования равновесного решения $\text{grad } \Omega = 0$ сводится к двум уравнениям:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial x} = \frac{\partial \Omega}{\partial r_1} \frac{\partial r_1}{\partial x} + \frac{\partial \Omega}{\partial r_2} \frac{\partial r_2}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \Omega}{\partial y} = \frac{\partial \Omega}{\partial r_1} \frac{\partial r_1}{\partial y} + \frac{\partial \Omega}{\partial r_2} \frac{\partial r_2}{\partial y} = 0, \quad (7.35)$$

которые будут удовлетворяться, если

$$\frac{\partial \Omega}{\partial r_1} = \frac{\partial \Omega}{\partial r_2} = 0.$$

Запишем эту систему уравнений в явном виде:

$$-\frac{Gm_i}{r_i^2} + \frac{Gm_i r_i}{(a_1 + a_2)^3} = 0 \quad (i = 1, 2),$$

откуда $r_1 = r_2 = a_1 + a_2$, то есть притягиваемое тело действительно должно находится в вершине равностороннего треугольника.

Коллинеарные точки Лагранжа L_1, L_2, L_3 находятся из системы уравнений (7.35), в которых положено $y = 0$. Точка L_1 называется *внутренней точкой Лагранжа*.

Положив в уравнении (7.33), $w_2 = 0, v_2 = 0, y = 0$, сделав замену $x = za + a_2$, получаем уравнение для нахождения координаты точки L_2 .

$$(1 + \mu) z^5 + (3 + 2\mu) z^4 + (3 + \mu) z^3 - \mu z^2 - 2\mu z - \mu = 0.$$

Будем искать решения этого уравнения в виде $z = A\mu^\alpha$, где $\mu = M_2 / M_1$. Подставив z и, учитывая, что $\mu = \ll 1$, получим в первом приближении:

$$3A^3\mu^{3\alpha-1} - A^2\mu^{2\alpha} - 2A\mu^\alpha - 1 = 0$$

Пусть $\alpha = 1/3$, тогда

$$A = \sqrt[3]{\frac{1}{3}} \quad \text{и} \quad z = A\mu^\alpha = \left(\frac{\mu}{3}\right)^{1/3},$$

и

$$X_{L_2} = -za + a_2 = a \left(\frac{\mu}{3} \right)^{1/3} + a_2 = a \left[1 + \left(\frac{\mu}{3} \right)^{1/3} \right].$$

Для L_1 получается аналогичное уравнение, только со знаком плюс перед последней единицей. Ее координата равна

$$X_{L_1} = -za + a_2 = -a \left(\frac{\mu}{3} \right)^{1/3} + a_2 = a \left[1 - \left(\frac{\mu}{3} \right)^{1/3} \right].$$

Видно, что она лежит внутри отрезка, соединяющего M_1 и M_2 , поэтому L_1 называют внутренней точкой Лагранжа.

Первая и вторая точки Лагранжа располагаются симметрично относительно M_2 на небольшом расстоянии от нее.

Координаты точки L_3 находим аналогично:

$$X_{L_3} = -a(1 + 5\mu/12).$$

Видно, что точка L_3 лежит вне отрезка M_1M_2 , слева от M_1 , и находится от M_1 на расстоянии, большем a на $a*5\mu/12$. L_3 , как и L_2 , называют внешними точками Лагранжа.

В системе Земля – Солнце

$$a = 1 \text{ а. е.} = 1,5 \times 10^8 \text{ км,}$$

$$\mu = M_{\text{Земли}} / M_{\text{Солнца}} \approx 6 \times 10^{24} \text{ кг} / 2 \times 10^{30} \text{ кг} \approx 3 \times 10^{-6}.$$

Таким образом, точки Лагранжа L_1 и L_2 лежат в направлении на и от Солнца на расстоянии около 1,5 млн. км. Запуск космических телескопов в эти точки является приоритетным направлением в развитии внеатмосферной астрономии.

Круговая задача трех тел используется не только при изучении движения естественных тел Солнечной системы и искусственных тел; она нашла широкое применение в теории двойных звезд, при исследовании процессов обмена вещества между двумя компонентами.

§ 69. Понятие о возмущенном движении

При анализе движения небесных тел часто не удается выделить замкнутую изолированную систему тел, которая бы приводила к задаче многих тел. В этом случае движение интересующего нас тела в системе координат с началом в основном притягивающем теле и фиксированными направлениями осей задается векторным уравнением движения

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -Gm(M+m) \frac{\vec{r}}{r^3} + \vec{f}, \quad (7.36)$$

где

$$f \ll \frac{G(M+m)m}{r^2}.$$

Здесь первое слагаемое правой части представляет собой основную силу – силу притяжения к центральному телу, а второе слагаемое – так называемая *возмущающая сила* произвольной физической природы, которая обычно весьма мала по сравнению с первой силой.

Если в уравнении (7.36) положить $f = 0$, то оно определит кеплеровское движение, которое называют *невозмущенным*. В противовес этому движение, описываемое уравнением (7.36) при $f \neq 0$, называется *возмущенным*. В силу своей малости возмущения приводят к малым отклонениям элементов невозмущенных кеплеровских орбит.

Рассмотрим несколько примеров возмущенного движения.

Для астероида центральным притягивающим телом служит Солнце. Кеплеровское эллиптическое движение, которое описывал бы астероид при отсутствии других влияний, следует принять за невозмущенное.

На движение астероида оказывают малое возмущающее влияние близкие к нему большие планеты, например Юпитер. Сила притяжения астероида Юпитером является возмущающей. Она мала по модулю по сравнению с величиной силы солнечного тяготения, так как масса Юпитера в тысячу с лишним раз меньше массы Солнца, в то время как расстояния от астероида до Солнца и Юпитера – величины одного порядка. Установлено, что Юпитер определяет эволюцию астероидного кольца и пренебрегать возмущающим влиянием Юпитера, хотя оно и мало, нельзя.

Другой пример возмущенного движения дают искусственные спутники Земли. Как известно, Земля сплюснута у полюсов, причем сжатие Земли $\epsilon = (R_0 - R_{\text{п}}) / R_0 = 1 / 298,2$ (R_0 , $R_{\text{п}}$ – соответственно экваториальный и полярный радиусы Земли). Сплюснутость Земли обуславливает нецентральность ее гравитационного поля и вызывает в движении спутника заметные по величине возмущения, хотя возмущающая сила по модулю составляет доли процента от силы земного притяжения, которая имела бы место в случае шарообразной Земли.

В результате действия возмущающих сил элементы орбиты претерпевают *возмущения (неравенства)*. Они делятся на три типа: *периодические, вековые и смешанные возмущения*.

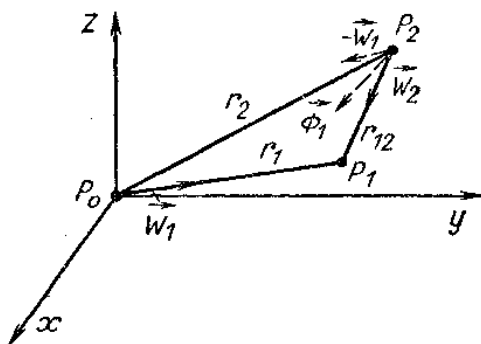


Рис. 73. К расчету возмущающего ускорения материальной точки P_2 . $\vec{w}_1$ – ускорение тела P_0 со стороны тела P_1 , $\vec{w}_2$ – ускорение тела P_1 со стороны тела P_2 .

$$\vec{\Phi}_1 = \vec{w}_2 - \vec{w}_1 - \text{возмущающее ускорение тела } P_2 \text{ со стороны тела } P_1$$

Космогоническое (эволюционное) значение имеют вековые и смешанные возмущения. Они изучаются с особой тщательностью.

Обратимся теперь к классическому примеру возмущающей силы, когда она порождена возмущающим телом.

Рассмотрим движение точки P_2 подверженной действию сил ньютоновского тяготения со стороны материальных точек P_0 и P_1 , в системе отсчета с началом в точке P_0 (рис. 73).

Обозначим массы точек P_0 , P_1 и P_2 соответственно через M , m_1 , m_2 и введем в рассмотрение радиус-векторы, указанные на рис. 73. Тогда силы притяжения точки P_2 точками P_0 и P_1 соответственно равны

$$-\frac{GMm_2}{r_2^3}\vec{r}_2 \quad \text{и} \quad +\frac{Gm_1m_2}{r_{12}^3}\vec{r}_{12}.$$

Помимо этих сил, во введенной системе координат на точку P_2 в согласии с теоремой Кориолиса действуют силы инерции, порожденные ускоренным поступательным движением системы координат с ускорением $\vec{w}$ относительно абсолютной системы координат:

$$\vec{w} = \frac{Gm_1}{r_1^3}\vec{r}_1 + \frac{Gm_2}{r_2^3}\vec{r}_2.$$

В этом равенстве первое слагаемое обусловлено притяжением к точке P_1 , а второе – к точке P_2 . Тогда сила инерции для точки P_2 будет равна:

$$-m_2\vec{w} = -\frac{Gm_2^2}{r_2^3}\vec{r}_1 - \frac{Gm_1m_2}{r_1^3}\vec{r}_1.$$

Равнодействующая всех рассмотренных сил будет:

$$F = -\frac{Gm_2(M+m_2)}{r_2^3}\vec{r}_2 + Gm_1m_2\left(\frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}^3} - \frac{\vec{r}_1}{r_1^3}\right). \quad (7.37)$$

Здесь первое слагаемое определяет невозмущенное движение, а второе представляет собой возмущающую силу, обусловленную телом P_1 . Очевидно, возмущающая сила вызывает возмущающее ускорение исследуемой точки, определяемое геометрической разностью ускорений точек P_0 и P_2 вызванных притяжением возмущающего тела P_1 . Возмущающее ускорение равно

$$\vec{\Phi}_1 = Gm_1m_2\left(\frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}^3} - \frac{\vec{r}_1}{r_1^3}\right). \quad (7.38)$$

§ 70. Открытие новых планет

Между теорией движения Урана (открытого в 1781 г. В. Гершелем) и его наблюдениями в течение долгого времени обнаруживались систематические расхождения. Попытки математических уточнений теории движения Урана не дали обнадеживающих результатов. Наблюдавшиеся теоретически необъясненные возмущения в движении Урана привели немецкого ученого Ф. Бесселя (1784–1846) к заключению, что вне орбиты Урана имеется неизвестная планета, которая и вносит наблюдаемые отклонения в его движение. Так была поставлена задача определения положения и массы неизвестной планеты по производимым ею возмущениям.

Этой задачей одновременно занялись английский астроном Дж. Адамс (1819–1892) и французский астроном У. Леверье (1811–1877). Исходя из эмпирического закона планетных расстояний Тициуса – Боде, оба ученых приняли для большой полуоси орбиты неизвестной планеты значение 38,8 а. е. Предвычисление положения на небе гипотетической планеты Адаме и Леверье завершили практически одновременно. По вычислениям Леверье, берлинский астроном И. Галле (1812–1910) обнаружил 23 сентября 1846 г. новую планету всего в 1° от предвычисленного места. В честь бога морей новая планета была названа Нептуном.

Открытие Нептуна «на кончике пера» явилось триумфом небесной механики. Оно убедительным образом подтвердило справедливость учения Коперника и закона тяготения.

Идея поиска новых планет не оставляет астрономов и в наши дни. В начале XX в. американский астроном П. Ловелл (1855–1916), следуя Леверье, провел сложные математические расчеты и предсказал существование еще одной планеты, впоследствии названной Плутоном. Следует сказать, что открытие далеких планет исключительно сложно, ибо их блеск весьма мал, и, чтобы обнаружить их незначительное перемещение на фоне звезд, приходится на протяжении длительных интервалов времени тщательно сравнивать на фотоснимках звездного неба положения сотен тысяч изображений звезд. Именно так была открыта К. Томбо в 1930 г. планета Плутон.

§71. Проблема устойчивости Солнечной системы

Как уже говорилось в § 69, планеты Солнечной системы оказывают взаимные возмущения. В результате их эллиптические орбиты претерпевают вековые, периодические и смешанные возмущения: элементы орбит несколько изменяются со временем.

Периодические возмущения обычно бывают малыми. Так, их наибольшие амплитуды в видимых положениях составляют, для Меркурия 15", для Венеры 30", для Марса 2'. Наиболее значительной величины достигают долгопериодические возмущения Сатурна и Юпитера, соответственно составляющие 48' и 28'. Возмущения планет, выраженные в линейной мере, оказываются весьма значительными. Например, для Нептуна они составляют около 2 млн. км, для Марса – 46 тыс. км. Периоды возмущений также различны. Наблюдаются периоды до нескольких сотен лет.

Вековые возмущения, представляющие наибольший интерес для эволюции Солнечной системы, растут очень медленно. Например, согласно теории движения Земли, построенной на основе наблюдений в течение нескольких сотен лет, эксцентриситет ее орбиты испытывает вековые возмущения, которые выражаются формулой

$$e = 0,0167498 - 0,0000426t - 0,000000137t^2. \quad (7.39)$$

Здесь t – промежуток времени, отсчитываемый в столетиях с 1900 г. За один год эксцентриситет меняется на 0,0000004, за 100 лет – на 0,0000427.

Однако в течение больших промежутков времени такие возмущения могли бы привести к существенным изменениям в движении. За 10^4 лет эксцентриситет земной орбиты должен уменьшиться до 0,0134. Аналитические теории движения планет могут достаточно точно представлять действительные движения планет течение определенного промежутка времени, за пределами которого эти теории становятся непригодными.

Возникает вопрос: всегда ли все планеты двигались и будут двигаться по тем же орбитам, что и сейчас? С небесно-механической точки зрения эту проблему можно сформулировать следующим образом: обладают ли большие полуоси, эксцентриситеты и наклонения орбит планет чисто вековыми изменениями?

Теоретическое описание устойчивости Солнечной системы наталкивается на большие математические трудности, и до настоящего времени эта проблема не решена. Большая заслуга в качественном описании устойчивости Солнечной системы принадлежит Лапласу, Лагранжу, Леверье и другим ученым. Их работы показали, что элементы орбит a , e и i планет Солнечной системы, по-видимому, не имеют чисто вековых возмущений, которые растут со временем.

Некоторые выводы о далеком прошлом Солнечной системы можно получить из геологических исследований. Данные геологии говорят о том, что в течении миллионов лет не происходило таких больших изменений климата Земли, которые можно было бы считать вызванными изменениями орбиты Земли. Даже такие весьма заметные изменения климатических условий в Европе в прошлом, как наступление ледниковых периодов, можно вполне объяснить незначительными колебаниями эксцентриситета орбиты Земли и наклона оси вращения Земли к плоскости орбиты. Эти колебания, как показывают расчеты, вполне могли бы привести к уменьшению среднегодовой температуры в Европе, достаточной для появления ледников. Более значительные изменения эксцентриситета орбиты или среднего расстояния Земли от Солнца должны были сказаться на климате гораздо более резко, но никаких следов подобных резких изменений климата на протяжении многих миллионов лет геология не находит.

Отсюда можно сделать вывод, что все это время Земля двигалась примерно так же, как и сейчас, и формула (7.39) и аналогичные ей для больших интервалов времени неверны.

Так как все планеты взаимно тяготеют друг к другу, то значительные изменения в движении одной планеты не могут не привести к существенным изменениям в движении всех планет. На основании этих соображений можно заключить, что не только движение Земли, но и движение других планет сохраняет примерно тот же характер уже в течение миллионов лет, то есть нет чисто вековых возмущений эксцентриситетов, больших полуосей и наклонов орбит планет. В то же самое время существование вековых возмущений долготы восходящих узлов и перигелиев планетных орбит не исключено, но возмущения этих элементов не влияют на эволюцию Солнечной системы.

§ 72. Определение масс и фигур небесных тел

Астрономические методы позволяют определить массы небесных тел в абсолютных единицах, если из физических измерений известна масса Земли. В астрономии для динамических расчетов достаточно выразить массу небесного тела в массах Земли.

Наиболее простой способ определения масс основан на третьем обобщенном законе Кеплера. При определении масс планет в массах Земли сравнивают движение спутника планеты с движением Луны вокруг Земли. Для этого в формуле (7.25) подразумевают под M_1 массу планеты, под a_1 и T_1 – большую полуось орбиты спутника и период его обращения вокруг планеты, которые определяются из наблюдений. Массой спутников по сравнению с массой планеты в приближенных расчетах можно пренебречь. Считая, что $M_2 = M_0$ есть масса Земли, T_2 – звездный месяц, a_2 – большая полуось лунной орбиты, вычисляют массу планеты в массах Земли. Если T_1 выражать в минутах, а a_1 в километрах, из (7.25) получим:

$$\frac{M_1}{M_0} = \frac{a_1^3 T_2^2}{T_1^2 a_2^3} \approx 2,75 \cdot 10^{-8} \frac{a_1^3}{T_1^2}. \quad (7.40)$$

Например, спутник Юпитера Каллисто имеет $a_1 = 1,880 \cdot 10^6$ км, $T_1 = 16^h 16^m 32^s$; тогда масса Юпитера в массах Земли равна: $\frac{M_1}{M_0} = 318$.

По движению искусственных спутников Луны уточнена масса Луны, которая оказалась равной $1 / 81,30$ массы Земли. Аналогично была найдена масса Венеры ($0,815 M_0$) по ее искусственным спутникам (октябрь 1975 г.).

По возмущениям в движении близких искусственных спутников планет и Луны с большой точностью определяются фигуры планет (сжатие, асимметрия планеты относительно плоскости ее экватора и прочее), их гравитационные поля.

Масса Меркурия, не имеющего спутников, найдена менее уверенно по возмущениям, которые вызываются Меркурием в движении астероидов, проходящих в достаточной близости от него.

§ 73. Приливы и отливы

Уровень морей и океанов на Земле испытывает подъемы (*приливы*) и спады (*отливы*) дважды за $24^{\text{ч}}52^{\text{м}}$. Поскольку Луна при движении вокруг Земли смещается за сутки на 13° к востоку, этот интервал времени является средним между последовательными верхними кульминациями Луны. Такое совпадение указывает на то, что главной причиной приливных явлений является притяжение водной оболочки Земли Луной. Объяснение приливов состоит в следующем (рис. 74).

Предположим, что поверхность Земли равномерно покрыта водной оболочкой. Рассмотрим частицы воды, расположенные в точках A и B , лежащих на диаметре Земли, проходящем через центр Луны. Очевидно, что гравитационное ускорение водных частиц в точке A больше ускорения центра T твердого тела Земли, которое в свою очередь больше, чем ускорение частицы в точке B . По отношению к центру Земли ускорения частиц в точках A и B – приливные ускорения – направлены по радиусу R от центра Земли и равны по величине:

$$W = W_A - W_T = -(W_B - W_T) = \frac{Gm_{\text{J}}}{(r-R)^2} - \frac{Gm_{\text{J}}}{r^2} \approx \frac{Gm_{\text{J}}}{r^3} 2R. \quad (7.41)$$

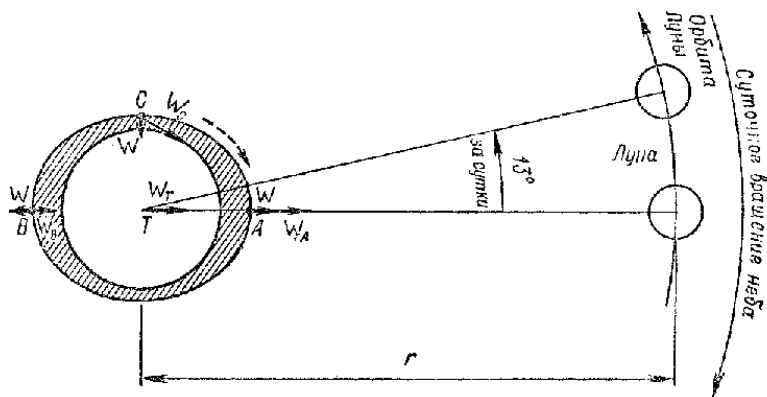


Рис. 74. Схема морских приливов: приливное ускорение в точках А и В направлены от центра; в точке С - к центру Земли

В последнем выражении учтено, что радиус Земли $R \ll r$. Аналогичные расчеты показывают, что приливное ускорение в точке C направлено к центру Земли и по величине равно (7.41). В силу этого в точках A и B появляются горбы – приливы, а между ними – отливы. Очевидно, что период между двумя приливами равен промежутку времени между последовательными верхними и нижними кульминациями Луны, равному $12^{\text{ч}}26^{\text{м}}$.

Как и Луна, Солнце также вызывает приливы. Величина приливного ускорения в этом случае определяется также по формуле (7.41), только вместо массы Луны нужно подставить массу Солнца $m_{\odot}$ и его расстояние $r_{\odot}$ от Земли: $w_{\odot} \approx Gm_{\odot}2R / r_{\odot}^3$. Так как

$$m_{\odot} / m_{\text{л}} = 2,7 \cdot 10^7, r_{\odot} / r_{\text{л}} \approx 400, \text{ то } w_{\text{л}} / w_{\odot} \approx 2,2$$

и, следовательно, солнечные приливы примерно в 2 раза меньше лунных. Сложение лунных и солнечных приливов приводит к весьма сложной картине. Во время полнолуний и новолуний (сизигий) солнечный и лунный приливы совпадают, в связи с чем наблюдается максимальный прилив. Во время квадратур (первая и последняя четверти Луны) гравитационные действия Солнца и Луны направлены противоположно, и приливы оказываются минимальными.

Картина приливов осложняется еще и тем, что силы трения между водной оболочкой и поверхностью Земли приводят к запаздыванию приливов (так называемый «прикладной час»), которое в разных местах Земли оказывается различным.

Высота приливов и продолжительность прикладного часа зависят от контуров берегов, шельфа, приливного трения в данном месте и других факторов. Поэтому высота приливной волны может составлять несколько метров, достигая в отдельных местах 10–16 м.

Приливные явления наблюдаются и в земной коре. Амплитуда приливов в ней составляет несколько десятков сантиметров. Небольшие изменения атмосферного давления с полусуточным периодом свидетельствуют о приливах в воздушной оболочке Земли.

Приливное трение замедляет вращение Земли, что приводит к увеличению длительности земных суток на $0^{\text{с}},0014$ за столетие.

Земля также оказывает приливное воздействие на Луну. Так как масса Земли в 81,3 раза больше массы Луны, а радиус больше в 3,67

раза, то величина приливного ускорения на поверхности Луны примерно в 20 раз больше, чем на Земле. Именно благодаря приливному воздействию со стороны Земли Луна имеет слегка вытянутую в сторону Земли форму и повернута к ней одной стороной.

По современным представлениям, в эпоху своего образования Луна быстрее вращалась вокруг своей оси. Сильное приливное воздействие со стороны Земли заставило ее принять вытянутую форму. Постепенно приливное трение замедляло скорость вращения Луны до тех пор, пока период ее вращения не стал равен периоду ее обращения вокруг Земли.

Предел Роша. Если спутник планеты массой m , радиусом R и плотностью ρ или какое-либо другое тело слишком близко приблизится к планете массой m_0 , радиусом R_0 и плотностью ρ_0 , то на некотором расстоянии от планеты приливное ускорение может стать сравнимым или больше ускорения силы тяжести на поверхности спутника. В этом случае приливная сила может разрушить спутник. Расстояние от планеты r_p , на котором это происходит, называется пределом Роша. Величину r_p легко оценить, приравняв выражение (7.41) ускорению свободного на поверхности. Это дает

$$r_p \approx R_0 \sqrt[3]{2 \frac{\rho_0}{\rho}}. \quad (7.42)$$

В связи с этим следует отметить, что кольца Сатурна, Юпитера и Урана как раз находятся внутри предела Роша. Возможно, что из-за приливного воздействия внутри предела Роша условия не благоприятствуют образованию спутников и кольца представляют собой несформировавшиеся спутники.

§ 74. Прецессия и нутация

Прецессия (точнее, общая годичная прецессия) состоит в ежегодном смещении точек равноденствий по эклиптике на $50'',27$ в западном направлении, что является следствием такого же медленного поворота в том же направлении плоскости небесного и земного экватора (см. § 23). Поэтому и ось вращения Земли (ось мира), перпендикулярная плоскости экватора, поворачивается за год на $50'',27$, описывая в пространстве коническую поверхность оси эклиптики (перпендикулярна к плоскости земной орбиты) подобно

повороту оси быстро вращающегося волчка. Такой поворот земной оси называется ее *прецессионным движением*. Из-за прецессионного движения земной оси северный полюс мира перемещается по небу вокруг северного полюса эклиптики (южный полюс мира – вокруг южного полюса эклиптики) на те же $50'',27$ за год.

В настоящую эпоху земная ось образует с осью эклиптики угол в $23^\circ 26',5$, и если бы этот угол всегда сохранял свою величину, то полюсы мира описывали бы вокруг полюсов эклиптики окружности с угловым радиусом $23^\circ 26',5$. Но из-за медленного и незначительного изменения величины этого угла полюсы мира перемещаются вокруг полюсов эклиптики по незамкнутой кривой, очень близкой к окружности, радиус которой принимается равным около $23^\circ,5$ (рис. 75). В настоящее время северный полюс мира расположен вблизи Полярной звезды (α Малой Медведицы), а через 12 000 лет будет находиться недалеко от Веги (α Лиры). Один оборот вокруг оси эклиптики земная ось совершает за период

$$T_p = \frac{360^\circ}{50'',27} = \frac{360 \cdot 3600''}{50'',27} = 25800 \text{ лет}$$

называемый *периодом прецессии*, так как за этот период полюсы мира перемещаются на 360° вокруг полюсов эклиптики и точки равноденствий возвращаются в исходное положение на эклиптике.

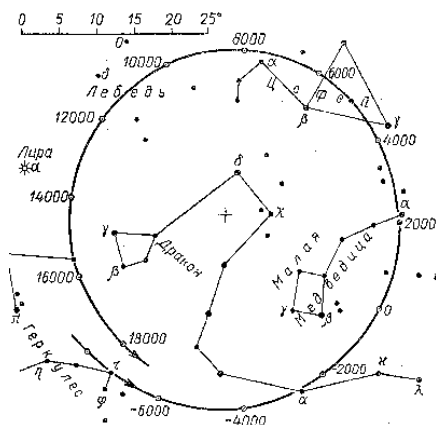


Рис. 75. Прецессионное перемещение северного полюса мира: крестиком в центре показано положение северного полюса эклиптики

Рассмотрим причины прецессионного движения земной оси. Из механики известно, что изменить направление оси вращения твердого тела может только действующий на него момент внешних сил. Такими силами, действующими на Землю, являются главным образом силы гравитации со стороны Луны и Солнца и в значительно меньшей степени со стороны планет.

Если бы Земля была идеальным шаром, то направление ее оси вращения оставалось бы неизменным, так как суммарный момент этих сил равнялся бы нулю. Реальная же форма Земли отличается от сферы и близка к сфероиду (см. § 42) – она сплюснута у полюсов и имеет выступ у экватора. Экваториальный выступ Земли наклонен к плоскости эклиптики под углом в $23^{\circ},5$. Землю можно рассматривать как шар, вписанный в экваториальный выступ, один край которого находится ближе другого к Луне (Солнцу). На этот край со стороны Луны L (Солнца) действует большая сила притяжения $\vec{F}$, чем сила $\vec{F}'$ на противоположный край (рис. 76). Благодаря этому суммарный момент сил M относительно оси вращения Земли отличен от нуля.

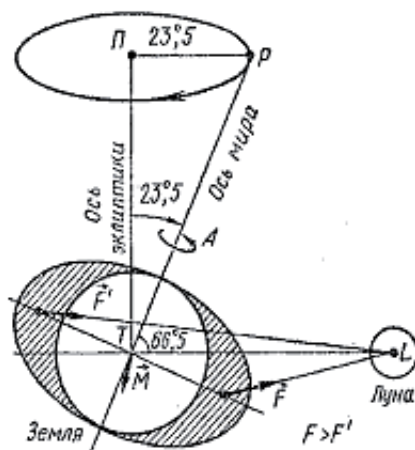


Рис. 76. Момент гравитационных сил и прецессионное движение земной оси:
P - северный полюс мира; П - северный полюс эклиптики

Если бы Земля не вращалась, то момент сил привел плоскость земного экватора к совпадению с плоскостью земной орбиты

(плоскостью эклиптики). Но Земля вращается и под действием этого момента наклонение плоскости экватора не меняется, а происходит прецессионное движение оси вращения Земли (и поворот плоскости экватора) вокруг оси эклиптики.

Так как положение Луны и Солнца относительно земного экватора постоянно изменяется, то претерпевает соответствующие изменения момент гравитационных сил, приложенный к Земле. Чем больше склонение притягивающего тела, тем больше гравитационный момент. Если и Луна, и Солнце одновременно окажутся в экваториальной плоскости, то этот момент равен нулю. Непостоянство момента сил лунного и солнечного притяжения порождает колебания, называемые *нутацией*, амплитуда которой равна 9", а период равен периоду обращения лунных узлов (18,6 года). В результате полюс мира перемещается по волнистой кривой (рис. 77). Прецессия приводит к изменению координат небесных тел. Долгота звезд увеличивается ежегодно на величину общей годичной прецессии при неизменной эклиптической широте. В экваториальной системе координат изменяется как прямое восхождение, так и склонение. Из-за этого медленно меняется вид звездного неба. Так, сейчас в средней полосе СССР созвездия Большой Медведицы, Малой Медведицы и Кассиопеи не заходят за горизонт, созвездие Возничего заходит не полностью (его главная звезда Капелла опускается в северной стороне неба почти к горизонту), созвездие Близнецов погружается под горизонт на короткое время и высоко поднимается над южной стороной горизонта, а созвездие Ориона экваториальное.

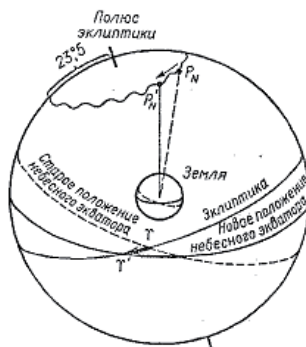


Рис. 77. Прецессия и нутация на небесной сфере: Υ и Υ' - старое и новое положение точки весеннего равноденствия

Через 12 000 лет, когда северный полюс мира приблизится к звезде α Лиры, созвездие Возничего станет экваториальным созвездием, созвездие Близнецов будет ненадолго появляться над южной стороной горизонта, созвездие Ориона вообще не будет видно, а созвездия Большой Медведицы и Кассиопеи станут заходящими. Созвездие Малой Медведицы останется незаходящим, но его суточный путь над горизонтом станет похож на современный путь созвездия Возничего, и оно будет высоко подниматься над южной стороной горизонта и низко опускаться к его северной стороне.

Глава VIII. Элементы динамики космических полетов

§ 75. Методы расчета траекторий космических полетов

Год 1957 – год запуска первых советских искусственных спутников Земли – положил начало эпохе освоения космического пространства. Полеты в космос стали возможными благодаря усилиям многих ученых и конструкторов. Выдающееся значение имели работы К. Э. Циолковского (1857–1935), который заложил основы ракетодинамики и доказал техническую осуществимость межпланетных полетов. В СССР выдающийся вклад в разработку ракетной техники был сделан С. П. Королевым (1907–1966).

Современная космонавтика представляет собой совокупность ряда отраслей науки и техники, которые позволяют решать проблемы теории космического полета, разрабатывать конструкции космических аппаратов и ракет, исследовать медико-биологические проблемы и т. д.

С астрономией, и прежде всего с небесной механикой, связаны расчеты траекторий космических полетов. Космические аппараты начинают свое движение по законам небесной механики после выключения реактивных двигателей. Их движение описывается обычно неинтегрируемыми уравнениями вида (7.36), поскольку, кроме притяжения к центральному телу, необходимо учитывать

возмущения от других тел. Это затрудняет предварительный выбор орбит перелета. В таком случае на этапе «проектирования» орбит пользуются методом сфер действия.

Это понятие в астрономию ввел Лаплас при изучении динамических эффектов сближения комет с большими планетами. Например, движение короткопериодических комет юпитеровой группы следовало бы в строгой математической постановке изучать на основе задачи трех тел «Солнце – Юпитер – комета». Однако Лаплас привел ее к двум задачам двух тел, несколько поступившись при этом точностью решения. В окрестностях Юпитера рассматривалась область, в которой можно пренебречь возмущениями от Солнца и считать движение кометы происходящим по кеплеровской гиперболической орбите относительно Юпитера. Указанная область была названа сферой действия Юпитера. Вне этой области движение кометы считалось гелиоцентрическим – кеплеровским эллиптическим, а возмущения от Юпитера не учитывались. Такой путь решения задачи получил название *метода сфер действия*.

Рассмотрим Солнце массой M и планету массой m_1 . Пусть тело малой массы $m_2 \ll m_1$ движется под действием сил притяжения к Солнцу и планете (см. рис. 73). Обозначим через w_0 ускорение, которое Солнце, будучи принятым за центральное тело, сообщает этому телу, а через Φ_1 – возмущающее ускорение, порожденное в этом случае планетой. Так как интерес представляет случай, когда $r_{12} \ll r_1$, то для величины возмущающего ускорения имеем согласно (7.38):

$$\Phi_1 = G \frac{m_1}{r_2^2}, \text{ и } w_0 = G \frac{M}{r_2^2}$$

Примем, далее, за центральное тело планету и обозначим ускорение, сообщаемое ею телу малой массы, через

$$w_1 = G \frac{m_1}{r_{12}^2},$$

а возмущающее ускорение со стороны Солнца через

$$\Phi_0 = G \frac{M}{r_2^2} - G \frac{M}{r_1^2} \approx G \frac{M}{r_1^3} r_2$$

Здесь учтено, что $r_2 - r_1 \ll r_1$. Тогда,

$$\frac{\Phi_1}{w_0} > \frac{\Phi_0}{w_1}, \quad (8.1)$$

то движение тела можно рассматривать как движение по кеплеровской орбите в поле тяготения планеты. Учитывая аналитические выражения для соответствующих ускорений, предыдущее неравенство можно записать в виде

$$r_{12} < r_1 \sqrt[5]{\left(\frac{m_1}{M}\right)^2}. \quad (8.2)$$

Это неравенство оценивает радиус сферы действия планеты по отношению к Солнцу. В пределах сферы этого радиуса на движение тела основное влияние оказывает притяжение планеты.

Аналогичным образом рассчитывается сфера действия Луны по отношению к Земле (или сферы действия в какой-либо двойной системе). В этом случае в формуле (8.2) M, m_1 – массы Земли и Луны соответственно, а r_1 – расстояние между ними.

Радиус сферы действия возрастает при удалении планеты от возмущающего тела. Расчеты показывают, что радиус сферы действия Земли в направлении к Солнцу порядка 0,95 млн. км, а радиус сферы действия Луны в направлении к Земле около 68 000 км.

Метод сфер действия применяется при приближенных расчетах межпланетных траекторий. Последовательно рассматривается кеплеровское движение космического аппарата в сферах действия Земли, Солнца и планеты назначения.

§ 76. Три космические скорости

Задача двух тел и ее решение находят широкие приложения в динамике космического полета, особенно при выполнении приближенных инженерных расчетов на этапе выбора околоземных траекторий или траекторий межпланетного полета.

Прежде всего установим величины скоростей, которые должны в конце активного участка получить космические аппараты для выхода на ту или иную траекторию пассивного полета.

При приближенном рассмотрении движения космических аппаратов можно исходить из формул ограниченной задачи двух тел, в которой центральное тело считается неподвижным, что с высокой степенью точности выполняется, так как масса космического аппарата $m \ll M$ Земли. Таким образом, во всех формулах задачи двух тел можно положить $m = 0$, $\mu = GM$.

Используя формулы ограниченной задачи двух тел, получим величину скорости, которую нужно сообщить спутнику Земли для его вывода на круговую орбиту на заданную высоту h над поверхностью Земли. Землю будем считать шаром радиуса R . По формуле (7.26), положив в ней $r = a = R + h$, находим скорость кругового движения:

$$v_a = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}. \quad (8.3)$$

Так как на земной поверхности гравитационное ускорение $g = GM/R^2$ то

$$v_a = R\sqrt{\frac{g}{R+h}},$$

и для спутника, движущегося на нулевой высоте,

$$v_1 = \sqrt{gR} \approx 7,91 \text{ км/с}. \quad (8.4)$$

Это *первая космическая скорость* относительно Земли. Она равна той минимальной скорости, при которой тело становится спутником Земли.

Для того чтобы космический аппарат вышел на околосолнечную орбиту, он должен двигаться относительно Земли по параболической орбите. Наименьшая по величине скорость при этом называется *параболической*.

Пусть, как и в случае круговой орбиты, выход на параболическую орбиту происходит на высоте h над земной поверхностью.

Обратимся вновь к формуле (7.26) и положим в ней $a = i$. Тогда будем иметь параболическое движение, причем его скорость будет равна:

$$v_{\text{п}} = v_{\text{а}} \sqrt{2}. \quad (8.5)$$

При $h = 0$ у поверхности Земли параболическая скорость составит:

$$v_{\text{п}} = 11,2 \text{ км/с}. \quad (8.6)$$

Скорость называется *второй космической скоростью* относительно Земли.

Заметим, что при перелетах к Луне почти достигается вторая космическая скорость. Ограничиваясь учетом только земного тяготения, вычислим геоцентрическую начальную скорость $U_{\text{н}}$, необходимую для достижения Луны. Положим $a = 30R$, то есть половине среднего расстояния от Земли до Луны. Тогда

$$v_{\text{н}} = \sqrt{GM \left(\frac{2}{R} - \frac{1}{30R} \right)},$$

откуда $v_{\text{н}} = 0,99 v_2$.

Первая и вторая космические скорости на других небесных телах будут иными. Согласно ограниченной задаче двух тел на расстоянии r от небесного тела круговая скорость поэтому первая космическая скорость

$$v_{\text{а}} = \sqrt{\left(\frac{Gm}{R} \right)}, \quad (8.7)$$

где m – масса и R – радиус небесного тела. Учитывая, что на Земле первая космическая скорость равна (8.4), имеем

$$v_{\text{а}} = 7,91 \sqrt{G \frac{(m/v)}{(R/R_0)}}.$$

Или

$$v_{\text{а}} = 7,91 \sqrt{G \frac{m}{R}},$$

где m – масса тела в массах Земли ($M = 1$) и R – радиус тела в радиусах Земли ($R_0 = 1$). Вторая космическая скорость $v_n = v_a \sqrt{2}$.

В настоящее время в теоретическом плане обсуждается проблема межзвездных перелетов. С точки зрения техники такие перелеты – дело далекого будущего. Для их осуществления необходимо достижение скоростей полета, сравнимых со скоростью света. В этом случае необходима разработка релятивистской ракетодинамики, которая должна учитывать эффекты как общей, так и специальной теории относительности.

Межзвездный космический аппарат навсегда покинет Солнечную систему, если приобретет параболическую гелиоцентрическую скорость. Ее можно вычислить по формуле (8.5). Считая, что параболическая скорость достигается на земной орбите и, принимая во внимание, что круговая скорость на гелиоцентрическом расстоянии в 1 а. е. составляет 29,8 км/с, по формуле (8.5) находим, что $v_n = 42,2$ км/с.

Не следует думать, что наименьшая геоцентрическая скорость освобождения равна разности $42,2 - 29,8 = 12,4$ км/с. Здесь не учитывается замедление движения космического аппарата за счет притяжения Земли. Как показывают более точные расчеты, при движении аппарата в направлении орбитальной скорости Земли его геоцентрическая скорость на параболической гелиоцентрической траектории на расстоянии в 1 а. е. от Солнца приближенно равна: $v_3 = 16,7$ км/с.

Эта скорость называется *третьей космической скоростью*. Она представляет собой минимально необходимую геоцентрическую скорость космического аппарата, обеспечивающую его неограниченное удаление от Солнца. В зависимости от направления движения космического аппарата указанная скорость может колебаться в пределах от 16,7 до 72,8 км/с.

§ 77. Движение искусственных спутников планет

В настоящее время для решения различных научных и народнохозяйственных задач в нашей стране и за рубежом запускают большое число искусственных спутников Земли. Для изучения планет Солнечной системы к ним направляют космические аппараты, которые затем выводятся на орбиты искусственных спутников планет. Так, в октябре 1975 г. советские космические аппа-

раты «Венера-9» и «Венера-10» стали первыми искусственными спутниками Венеры. В 1971 г. советские космические аппараты «Марс-2» и «Марс-3» и американский «Маринер-9» стали первыми искусственными спутниками Марса.

Теоретической основой запуска и движения искусственных спутников является ограниченная задача двух тел. Невозмущенное кеплеровское движение искусственных спутников планет, которое имело бы место при отсутствии возмущений со стороны Солнца, естественных спутников этих планет, сопротивления планетных атмосфер, происходит по эллипсам, один из фокусов которых совпадает с центром планеты. При выборе орбит искусственных спутников задают наименьшую (h_q) и наибольшую (h_Q) высоту его полета над поверхностью планеты. Задавшись этими величинами, можно определить ряд элементов орбиты искусственного спутника (рис. 78). Из формул § 49 находят перицентрическое q и апоцентрическое Q расстояния (Перицентр – ближайшая к центральному телу точка орбиты; апоцентр – более удаленная. Конкретные названия эти точки получают по наименованию центрального тела.):

$$\begin{aligned} q &= R + h_q = a(1 - e), \\ Q &= R + h_Q = a(1 + e), \end{aligned}$$

а затем большую полуось и эксцентриситет орбиты:

$$a = \frac{1}{2}(Q + q) \text{ и } e = 1 - \frac{q}{a}$$

По третьему обобщенному закону Кеплера (7.40) вычисляют период обращения T искусственного спутника вокруг планеты. Если масса t планеты выражена в массах Земли, a – в километрах, а T – в минутах,

$$T = 1,66 \cdot 10^{-4} a \sqrt{\frac{a}{\pi}} T, \text{ мин.} \quad (8.8)$$

Продолжительность полета спутника над различными полушариями центрального небесного тела зависит от эксцентриситета орбиты спутника. Чтобы вычислить продолжительность полета t спутника над полушарием, над которым находится перицентр

его орбиты, необходимо знать площадь σ_q эллиптического сегмента $d\Pi fCd$ (см. рис. 78).

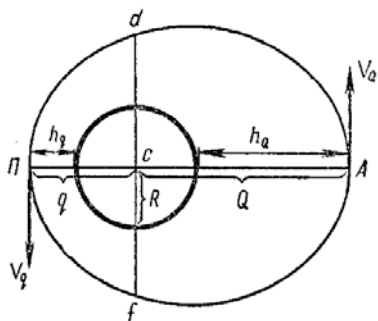


Рис. 78. Орбита искусственного спутника

С достаточной степенью точности

$$\sigma_q = \frac{\pi a^2 (1-e)^2 (3+e)^2}{18},$$

а так как площадь эллипса $\sigma = \pi a^2 \sqrt{1-e^2}$, то по второму закону Кеплера

$$\frac{t}{a} = \frac{\sigma_q}{\sigma},$$

откуда

$$t = \frac{(1-e)^2 (3+e)^2}{18\sqrt{1-e^2}} T. \quad (8.9)$$

Над полушарием, где находится апоцентр, спутник пролетает за промежуток времени $\tau = T - t$. Поделив выражение для круговой скорости спутника (8.7) на выражение первой космической скорости у поверхности Земли (8.4), получим:

$$v_a = 7,91 \sqrt{\frac{m}{a}}, \quad (8.10)$$

где масса планеты выражена в массах Земли, а большая полуось орбиты спутника в радиусах Земли. Если a выражено в километрах, а m в массах Земли, то $v_a = 631,3 \sqrt{\frac{m}{a}}$ км/с.

Скорость спутника в любой точке орбиты вычисляется по формуле

$$v = v_a \sqrt{\frac{2a}{r} - 1} \quad (8.11)$$

скорость в перигеентре – по формуле

$$v_q = v_a \sqrt{\frac{Q}{q}},$$

а в апоцентре – по формуле

$$v_Q = v_a \sqrt{\frac{q}{Q}}.$$

Межпланетная станция «Венера-10», выведенная на орбиту искусственного спутника Венеры, имела $h_q = 1400$ км и $h_Q = 114\,000$ км. Радиус Венеры $R = 6050$ км, ее масса (в массах Земли) $m = 0,815$.

Из приведенных выше формул имеем:

$$q = 7450 \text{ км}, Q = 120\,050 \text{ км},$$

большая полуось орбиты

$$a = \frac{q + Q}{2} = 63\,750 \text{ км},$$

эксцентриситет

$$e = 1 - q / a = 0,884,$$

период обращения

$$T = 49^{\text{ч}}20^{\text{м}}.$$

По формуле (8.9) время пролета над полушарием, где находится перивенерий (перицентр), равно $t = 1^{\text{ч}}48^{\text{м}}$, а остальную часть периода обращения $\tau = 47^{\text{ч}}32^{\text{м}}$ станция пролетала над апоцентричным полушарием. Круговая скорость станции $v_a = 2,26$ км/с, скорость в перивенерий $v_q = 9,07$ км/с и в аповенерии $v_o = 0,56$ км/с.

Интересен возмущающий эффект сопротивления атмосферы. В перицентре орбиты спутник входит в более плотные слои атмосферы, и можно считать, что силы атмосферного сопротивления на коротком интервале времени действуют ударным образом.

Пусть дифференциал скорости равен: $dv = -kdt$ при $k > 0$.

Продифференцировав формулу (7.26), получим:

$$2vdv = \frac{\mu}{a^2} da.$$

Откуда

$$\frac{da}{a} = \frac{2vdv}{n^2 a^2}.$$

Из выражения для угловой скорости $n = \frac{2\pi}{T}$ и формулы (7.24) имеем:

$$n^2 = \frac{\mu}{a^3}.$$

Дифференцируя это равенство,

$$2ndn = -\frac{3\mu}{a^4} da,$$

и заменяя в нем da найденным значением, получим:

$$\frac{dn}{n} = -3 \frac{vdv}{n^2 a^2}.$$

Вводя в формулы для da и dn значение дифференциала скорости, приходим к результату:

$$\frac{dn}{n} = 3 \frac{\kappa v}{na^2} > 0.$$

Эта формула выражает эффект, известный под названием «парадокс спутников»: за счет сопротивления (!) атмосферы угловая скорость обращения увеличивается. Разумеется, увеличивает-ся только кинетическая энергия, а полная механическая энергия уменьшается.

§ 78. Элементарный расчет характеристик полета межпланетных автоматических станций

Рассмотрим задачу в общем виде, то есть полет с одной планеты на другую. Планету, с которой начинается полет автоматической межпланетной станции (АМС), назовем планетой запуска, а планету, к которой направлен полет, – планетой назначения.

Расчет орбит АМС очень сложен. В начале полета станция движется в поле тяготения планеты запуска, подавляющую часть своего пути – в гравитационном поле Солнца и, наконец, в поле тяготения планеты назначения. Помимо этого, приходится учитывать гравитационные возмущения со стороны крупных небесных тел. Поэтому ограничимся лишь расчетом простейшей орбиты межпланетной станции в поле тяготения Солнца, принимая орбиты планет круговыми и не учитывая возмущения от них в движении станции. С точки зрения расхода топлива наиболее выгодны полуэллиптические орбиты, касающиеся своими вершинами (апсидами) орбит планет запуска и назначения. В соответствии с первым законом Кеплера Солнце находится в одном из фокусов орбиты, большая ось которой проходит через Солнце и планету запуска.

При запуске к верхней планете (рис. 79) перигелий P орбиты станции совпадает с планетой запуска и отстоит от Солнца на расстоянии $q = a_1$, а афелий A находится на пересечении большой оси АМС с орбитой планеты назначения на расстоянии $Q = a_2$.

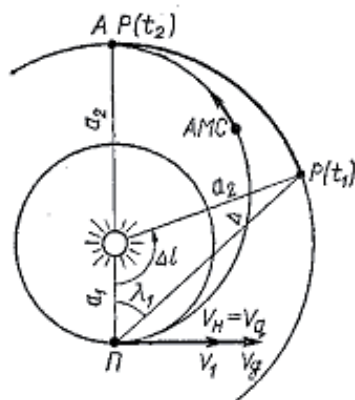


Рис. 79. Простейшая полуэллиптическая орбита полета космического аппарата к верхней планете

В день запуска t_1 планета назначения находится в некоторой точке $P(t_1)$ своей орбиты. В день сближения t_2 с межпланетной станцией планета назначения должна подойти к афелию орбиты АМС. Запуск производится в сторону движения планеты запуска, с тем что бы использовать ее орбитальную (гелиоцентрическую) скорость $v_a = \frac{29,8}{\sqrt{a_1}}$. Выражая большие полуоси в астрономических

единицах, найдем большую полуось орбиты АМС $a = \frac{q+Q}{2} = \frac{a_1+a_2}{2}$ и ее эксцентриситет $e = 1 - \frac{q}{a} = 1 - \frac{a_1}{a}$. Тогда из-

меренная в годах продолжительность полета АМС

$$\Delta t = \frac{a\sqrt{a}}{2},$$

и, согласно формуле (7.32), средняя гелиоцентрическая скорость станции

$$v_a = \frac{29,8}{\sqrt{a}} \text{ км/с.}$$

Так как запуск проводится в перигелии орбиты станции, то начальная гелиоцентрическая скорость

$$v_n = v_q = v_a \sqrt{\frac{Q}{q}} = v_a \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}.$$

Следовательно, чтобы межпланетная станция вышла на расчетную орбиту, необходимо сообщить ей дополнительную скорость $v_d = v_n - v_1$, где $v_1 = \frac{29,8}{\sqrt{a}}$ – круговая скорость планеты за пуска.

Но чтобы покинуть планету запуска, АМС нужно еще преодолеть притяжение этой планеты, на что требуется кинетическая энергия $\frac{mv_n^2}{2}$, где m – масса станции, а v_n – вторая космическая скорость на поверхности планеты. Поэтому скорость запуска станции v с планеты определяют из равенства

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mv_d^2}{2} + \frac{mv_n^2}{2}.$$

$$\text{Откуда } v = \sqrt{v_d^2 + v_n^2}.$$

Если T_2 есть период обращения вокруг Солнца планеты назначения, то ее среднесуточное движение $n_2 = 360^\circ / T_2$ и в момент старта станции разность гелиоцентрических долгот планеты назначения и планеты запуска $\Delta l = 180^\circ - \frac{360^\circ}{T_2} \cdot \Delta t$, где Δt выражено в

сутках. Расстояние между планетами $\Delta = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos \Delta l}$, а западная элонгация планеты назначения в день запуска вычисляется по формуле

$$\sin \lambda_1 = \frac{a_2}{\Delta} \sin \Delta l.$$

Когда станция подойдет к афелию своей орбиты, ее гелиоцентрическая скорость

$$v_Q = \frac{v_a}{\sqrt{a_2}} \text{ км/с,}$$

а у планеты назначения гелиоцентрическая скорость $v_2 = \frac{29,8}{\sqrt{a_2}}$ км/с.

Чтобы опуститься на поверхность планеты, межпланетная станция должна при подлете уравнивать свою скорость со скоростью планеты назначения, а при посадке на поверхность планеты погасить вторую космическую скорость, свойственную этой планете. Эти операции осуществляются путем включения тормозного и посадочного двигателей. В частности, при запуске АМС с Земли следует положить

$$q_1 = a_0 = 1 \text{ а. е. и } v_1 = 29,8 \text{ км/с, а } v_2 = \frac{29,8}{\sqrt{a_2}}.$$

Поскольку одинаковые конфигурации каждой планеты, благоприятные для запуска станции, повторяются через синодический период ее обращения, то очередные запуски к ней проводятся через интервалы времени, кратные этому периоду. Например, запуск межпланетных станций с Земли к Юпитеру необходимо производить, когда западная элонгация планеты близка к $\lambda_1 = 72^\circ$. В такой конфигурации Юпитер находился 7 марта 1972 г, а 3 марта к нему стартовала американская межпланетная станция «Пионер-10». Средний синодический период обращения Юпитера $S = 399$ сут., поэтому очередная станция «Пионер-11» стартовала к Юпитеру 5 апреля 1973 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
§ 1. Предмет астрономии	3
§ 2. Структура современной астрономии	4
§ 3. Возникновение и развитие астрономии	6
§ 4. Роль астрономии в формировании материалистического мировоззрения	10
§ 5. Астрономические корни современного естествознания	12
§ 6. Народнохозяйственное значение астрономии	21
РАЗДЕЛ 1. СФЕРИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ	23
ГЛАВА I. Видимые положения небесных светил	23
§ 7. Звездное небо и созвездия	23
§ 8. Небесная сфера	26
§ 9. Основные элементы небесной сферы и ее суточное вращение	27
§ 10. Теорема о высоте полюса мира	31
§ 11. Горизонтальная система координат	32
§ 12. Экваториальная система координат	34
§ 13. Экваториальная система координат с часовым углом ..	36
§ 14. Преобразование небесных координат	37
§ 15. Кульминация светил	41
§ 16. Вид звездного неба на различных географических параллелях	45
§ 17. Астрономическая рефракция	47
§ 18. Измерение горизонтальных координат светил и определение положения небесного меридиана	48
§ 19. Определение склонения звезд и географической широты местности	51
ГЛАВА II. Видимое годичное движение солнца, его причины и следствия	55
§ 20. Эклиптика	55

§ 21. Зодиакальные созвездия и знаки зодиака	58
§ 22. Эклиптическая система координат.	59
§ 23. Неравномерность годичного движения Солнца и обращение Земли	60
§ 24. Смена сезонов года и тепловые пояса	62
ГЛАВА III. Системы счета времени	66
§ 25. Принципы измерения времени.	66
§ 26. Звездное время	67
§ 27. Истинное солнечное время	70
§ 28. Среднее солнечное время	73
§ 29. Поясное время	76
§ 30. Декретное время	78
§ 31. Атомное время	80
§ 32. Преобразование систем счета времени	81
§ 33. Служба времени	82
§ 34. Определение прямого восхождения светил и географической долготы местности.	85
§ 35. Вычисление моментов времени и азимутов восхода и захода светил.	86
§ 36. Сумерки, белые ночи, полярные дни и ночи.	89
§ 37. Линия перемены дат и ее учет в счете суток.	91
§ 38. Календари	93
§ 39. Современный европейский календарь.	97
§ 40. Происхождение нашей или новой эры (н.э.).	99
§ 41. Даты равноденствий и солнцестояний.	100
ГЛАВА IV. Размеры и форма Земли	101
§ 42. Триангуляция	101
§ 43. Размеры и форма Земли	104
РАЗДЕЛ II. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КИНЕМАТИКЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ	107
ГЛАВА V. Строение Солнечной системы.	107
§ 44. Солнечная система и планетная система.	107
§ 45. Видимое движение планет	109
§ 46. Геоцентрическая система мира	110
§ 47. Эпоха Возрождения и революция в астрономии	113
§ 48. Борьба за гелиоцентрическое мировоззрение.	115
§ 49. Законы движения планет.	119

§ 50. Элементы эллиптических орбит	124
§ 51. Конфигурации и условия видимости планет	126
§ 52. Уравнение синодического движения	133
§ 53. Великие противостояния	134
§ 54. Измерение геоцентрических расстояний	136
§ 55. Астрономическая единица длины и солнечный параллакс	139
§ 56. Годи́чная аберрация и паралла́ктическое смещение звезд	141
§ 57. Линейные размеры тел Солнечной системы	145
ГЛАВА VI. Движение Луны и затмения	146
§ 58. Движение Луны	146
§ 59. Лунные фазы	150
§ 60. Солнечные затмения	153
§ 61. Условия наступления солнечных затмений	158
§ 62. Лунные затмения и условия их наступления	161
§ 63. Частота и периодичность затмений	163
РАЗДЕЛ III. ОСНОВЫ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ И ДИНАМИКИ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ	165
ГЛАВА VII. Основы небесной механики	165
§ 64. Закон всемирного тяготения Ньютона	165
§ 65. Задача двух тел	170
§ 66. Обобщенные законы Кеплера	172
§ 67. Задача многих тел	177
§ 68. Ограниченная задача трех тел	178
§ 69. Понятие о возмущенном движении	184
§ 70. Открытие новых планет	187
§ 71. Проблемы устойчивости Солнечной системы	188
§ 72. Определение масс и фигур небесных тел	190
§ 73. Приливы и отливы	191
§ 74. Прецессия и нутация	193
ГЛАВА VIII. Элементы динамики космических полетов	197
§ 75. Методы расчета траекторий космических полетов	197
§ 76. Три космические скорости	199
§ 77. Движение искусственных спутников планет	202
§ 78. Элементы расчета характеристик полета межпланетных автоматических станций	207

В. М. Чаругин

КЛАССИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

Учебное пособие

Издательство «Прометей»
115035, Москва, ул. адовническая, д.72, стр.1
Тел./факс: 8 (495) 799-54-29
E-mail: info@prometej.su

Подписано в печать 11.06.2013.
Формат 60х90/16. Объем 13,38 п.л.
Тираж 500 экз. Заказ № 283.

ISBN 978-5-7042-2400-6



9 785704 224006