

ГЛАВА IV

ТОПОГРАФИЯ И КАРТОГРАФИЯ

§ 17. Задачи картографического изучения планет и спутников

Изучение поверхности каждого тела солнечной системы начинается с того, что путем простейших визуальных наблюдений, описанных в § 9, устанавливается наличие тех или иных пятен на диске светила. Дальнейшие наблюдения позволяют установить, имеет ли место видимое перемещение этих пятен вследствие вращения тела вокруг его оси, а также происходят ли в обнаруженных деталях существенные изменения со временем, в частности разрушение одних образований и возникновение им на смену других.

Следующий этап исследования состоит в переходе от чисто качественных наблюдений к измерениям. В случае наличия вращения возникает задача определения его элементов, т. е. периода оборота, с одной стороны, и положения плоскости экватора (наклон к эклиптике, долгота узлов), — с другой. После того как это было сделано, открывается возможность получать для видимых деталей диска их планетографические координаты, т. е. широты, отсчитываемые от экватора планеты, и долготы, считаемые от некоторого меридиана, условно выбранного за начальный. Если элементы вращения почему-либо определить не удалось, то остается возможность относить координаты деталей либо к плоскости эклиптики, либо к плоскости планетной орбиты.

Описание обнаруженных на диске светила деталей: их расположения, формы, размеров, окраски, изменчивости и других характеристик — доставляет материал для разработки топографии данного небесного тела. В дальнейшем необходимо классифицировать зарегистрированные детали хотя бы по признаку чисто внешнего сходства и, поскольку твердо установленная терминология является необходимым техническим элементом всякой отрасли знания, дать каждому разделу такой морфологической классификации определенное наименование. Как известно, наименования эти в одних случаях совершенно условны и не имеют с действительной природой понимаемых под ними образований ничего общего (например, «моря» и «материки» на Луне и Марсе), в других слу-

чаях они в какой-то мере соответствуют внешним данным тех деталей, которым они присвоены (полярные шапки Марса, полосы и зоны на Юпитере).

Если детали поверхности тела оказываются постоянными, то возникает задача присвоить каждой из них индивидуальное обозначение. Наиболее детальная номенклатура этого рода существует на Луне, где собственные имена присвоены тысячам деталей, а также на Марсе; в зачаточном состоянии мы ее находим на Меркурии. Поскольку выбор и присвоение названий трудно ограничить какими-либо правилами, нередко случается, что одна и та же деталь в работах разных исследователей называется по-разному. Так возникает крайне неудобная синонимика, ликвидация которой составляет одну из трудных задач международных астрономических организаций.

Результаты измерений координат деталей позволяют ставить задачи картографии планет и спутников. Очевидно, что карта поверхности небесного тела, построенная в той или иной проекции, снабженная сеткой меридианов и параллелей и названиями нанесенных на ней деталей, является основным средством изучения топографии данной планеты. Впрочем, в настоящее время на достаточной высоте находится картография только двух светил: Луны и Марса. Для них находят удобным пользоваться также глобусом, а для лунной поверхности мы имеем также атласы, изображающие ее по частям в крупном масштабе. Кроме двух указанных объектов, существуют попытки построения карты для Меркурия и четырех главных спутников Юпитера.

Для планет с изменчивой поверхностью атмосферного характера (Юпитер, Сатурн) задача картографии состоит в построении карты, представляющей состояние планеты в данный момент. По мере изменений поверхности необходимо составлять новые карты, что аналогично тем синоптическим картам, которые публикуются метеорологической службой для земной атмосферы. Это требует непрерывных и регулярных наблюдений планеты, осуществляемых постольку, поскольку это позволяют астрономические условия видимости данного светила. Организация таких наблюдений, обычно осуществляемых на коллективных началах несколькими наблюдателями или обсерваториями, составляет «службу» данной планеты. В настоящее время регулярно ведется только служба Юпитера, и то лишь силами любительских астрономических организаций; неоднократно указывалось на крайнюю важность службы Марса.

При наличии достаточно долгих и систематических рядов наблюдений результаты картографирования могут быть использованы для ряда статистических исследований, задача которых состоит в раскрытии закономерностей, определяющих преимущественное развитие тех или иных изменчивых образований в различных

областях планеты. Так, можно говорить о периодических и вековых изменениях относительной площади светлых и темных участков на Юпитере, облачных покровов на Марсе, различных образований на Венере и Сатурне и т. д. Излюбленной задачей является сопоставление таких материалов с 11-летним периодом солнечных пятен или с другими характеристиками изменения солнечной активности.

Там, где наблюдаются сезонные изменения, естественно возникает задача следить за ними картографическим путем. Так, разрушение и расширение полярных шапок Марса лучше всего прослеживаются путем нанесения на карту последовательных положений границы белого полярного покрова. Очевидно, что работы этого рода занимают в планетоведении место, аналогичное тому, которое в земной географии выпадает на долю климатологии и фенологии.

Описанию техники выполнения перечисленных выше работ, а также наиболее важным из полученных результатов и будут посвящены настоящая и следующая главы.

§ 18. Определение планетографических координат

Как было указано выше, основу работ по картографии всякого небесного тела составляет определение планетографических широт и долгот большого количества деталей, видимых на диске светила, что дает возможность в дальнейшем нанести эти детали на карту, построенную в той или иной проекции.

Работа начинается с измерения прямоугольных координат деталей в картинной плоскости. За начало координат принимается видимый центр диска светила, координатные оси обычно ориентируются так: ось ординат—по кругу склонения в направлении северного небесного полюса, ось абсцисс—по суточной параллели в сторону суточного движения (к западу). Поскольку центр диска непосредственно не может быть измерен, измеряют абсциссу детали x_d и абсциссы x_W и x_E западного и восточного краев диска и принимают за абсциссу центра диска полусумму абсцисс для краев. После этого абсцисса детали x , отсчитанная от центра диска, получается из равенства

$$x = x_d - \frac{1}{2} (x_W + x_E), \quad (1)$$

в то время как величина

$$\delta_x = \frac{1}{2} (x_W - x_E) \quad (2)$$

дает соответствующий радиус-вектор диска. Так же поступают и в отношении ординат. Обозначив ординату детали через y_d , а орди-

наты северного и южного краев диска через y_N и y_S , для ординаты y , отсчитанной от центра диска, будем иметь:

$$y = y_d - \frac{1}{2} (y_N + y_S), \quad (3)$$

и соответственный радиус-вектор диска будет:

$$\delta_y = \frac{1}{2} (y_N - y_S). \quad (4)$$

Что касается техники измерения, то на практике сколько-нибудь широкое применение находят только нижеследующие три приема:

1. Измерение рисунков, выполненных от руки у окуляра телескопа. Ввиду больших размеров рисунка и его небольшой точности измерение производится просто линейкой с миллиметровыми делениями. Основным недостатком—отсутствие точной ориентировки по кругу склонения, что некоторые наблюдатели стремятся устранить, применяя при рисовании окуляр с крестом нитей в фокальной плоскости, ориентированным по суточному движению звезды.

2. Непосредственное измерение изображения планеты в поле зрения экваториала нитяным микрометром. Нити последнего должны быть ориентированы по суточному движению звезды, а не самой планеты, поскольку собственное движение последней может внести в ориентировку значительные погрешности.

3. Измерение фотографического снимка планеты, осуществляемое при помощи измерительной машины того или иного типа. Желательно, чтобы микроскоп последней давал не слишком большое увеличение, так как в противном случае видимость деталей из-за эффекта зернистости сильно ухудшается, что ведет к снижению точности. Другим серьезным источником погрешностей здесь является иррадиация, всегда значительная при фотографическом методе наблюдений и имеющая своим следствием ошибочность значений δ .

Неоднократно ставился и обсуждался вопрос о точности указанных трех методов. Общий вывод из всех сопоставлений сводится к тому, что все три метода определения прямоугольных координат имеют примерно одинаковую точность. Этот несколько неожиданный результат объясняется отчасти тем, что микрометрические и фотографические измерения в большей мере страдают от эффекта атмосферного дрожания, чем зарисовки от руки.

Для дальнейшего расчета заменяем прямоугольные координаты на полярные: полярное расстояние ρ и позиционный угол U , отсчитываемый от северного направления круга склонения

по часовой стрелке, т. е. к западу:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \sqrt{x^2 + y^2}; \\ \lg U &= \frac{x}{y}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Угловое расстояние ρ детали от центра диска легко позволяет найти угол γ при центре планеты, образуемый радиусами последней, направляемыми на центр диска и на деталь. Для этого рассмотрим рис. 38; чертеж сделан в плоскости: наблюдатель H —центр планеты C —деталь M . В треугольнике HCM угол MHC пред-

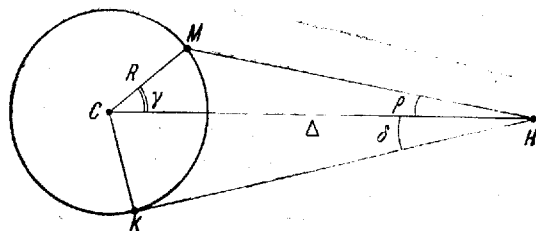


Рис. 38. Планетоцентрическое угловое расстояние детали от центра диска.

ставляет собою исходную величину ρ , угол MCH —искомый угол γ . Обозначив расстояние HC через Δ и радиус CM планеты через R , получаем:

$$\sin(\gamma + \rho) = \frac{\Delta}{R} \sin \rho. \quad (6)$$

С другой стороны, из треугольника CKH , в котором угол KHC представляет собою угловой радиус диска δ , имеем:

$$\sin \delta = \frac{R}{\Delta}, \quad (7)$$

что позволяет переписать формулу (6) в виде

$$\sin(\gamma + \rho) = \frac{\sin \rho}{\sin \delta} \quad (8)$$

и дает возможность найти γ . Ввиду того, что δ и ρ —малые углы, эту точную формулу на практике заменяют приближенной:

$$\sin(\gamma + \rho) = \frac{\rho}{\delta}. \quad (9)$$

Дальнейшее упрощение состоит в том, что пренебрегают малым углом ρ по сравнению с большим углом γ . Это дает:

$$\sin \gamma = \frac{\rho}{\delta}. \quad (10)$$

Очевидно, что эта формула соответствует случаю ортографической проекции шара планеты на картинную плоскость. При ее применении малые отрезки дуг ρ и δ , рассматриваемые как отрезки прямых, могут быть выражены в любых единицах, например в миллиметрах или в оборотах винта микрометра, так что знать масштаб измеряемого изображения или цену оборота винта нет надобности. Однако бывают случаи, когда значения ρ , получаемые из непосредственных измерений планетного диска по формулам (2) и (4), искажаются различными погрешностями, в особенности фотографической иррадиацией, изменяющей видимые размеры диска на снимках столь сильно, что пользоваться ими для расчета γ нельзя. В таких случаях предпочитают брать δ из ежегодника, что в свою очередь требует получения значений ρ , выраженных в секундах дуги через известный масштаб снимка.

Очевидно, что углы γ и U представляют собою планетоцентрические сферические координаты детали, отнесенные к системе, полюс которой совпадает с центром диска, а начальный круг—с плоскостью круга склонения, проходящего через последний. Приступая к выводу формул, применяемых для перехода от этой системы к планетографическим координатам λ и β , мы должны различать два случая. Первый из них мы будем иметь тогда, когда элементы вращения планеты известны; тогда широта и долгота могут быть отнесены к экватору и начальному меридиану планеты. Второй случай будет тот, когда элементы вращения неизвестны, и потому широту и долготу относят к плоскости эклиптики.

В первом случае мы воспользуемся физическими координатами, описанными в § 14: планетоцентрической широтой D центра диска, долготой L центрального меридиана и позиционным углом P проекции оси вращения на картинную плоскость. Построив планетоцентрическую сферу (рис. 39), рассмотрим на ней сферический треугольник, вершинами которого являются проекции полюса планеты Π , центра диска Π' и детали M . Стороны этого треугольника таковы: $\Pi M = \gamma$, $\Pi \Pi' = 90^\circ - D$ и

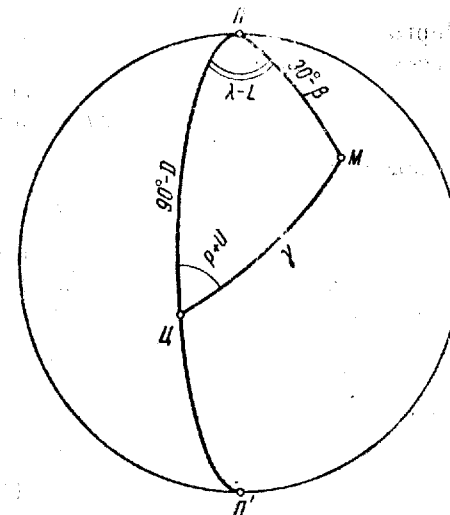


Рис. 39. Расчет планетографических координат.

$MP = 90 - \beta$; угол MCP равен $P + U$, угол $CPM = \lambda_M = \lambda - L$ представляет собою долготу, отсчитанную от центрального меридиана. Применяя три основные формулы сферической тригонометрии, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= \cos \gamma \sin D + \sin \gamma \cos D \cos (P + U); \\ \cos \beta \cos \lambda_M &= \cos \gamma \cos D - \sin \gamma \sin D \cos (P + U); \\ \cos \beta \sin \lambda_M &= \sin \gamma \sin (P + U). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Первое из этих равенств сразу дает β , два других позволяют найти λ_M :

$$\operatorname{tg} \lambda_M = \frac{\sin \gamma \sin (P + U)}{\cos \gamma \cos D - \sin \gamma \sin D \cos (P + U)}, \quad (12)$$

и далее искомую долготу λ :

$$\lambda = \lambda_M + L.$$

Если желательно пользоваться формулами логарифмического вида, то, применяя общий прием, вводим вспомогательные величины m и M :

$$m \cos M = \cos \gamma; \quad m \sin M = \sin \gamma \cos (P + U),$$

после чего формулы (11) могут быть представлены так:

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= m \sin (D + M); \\ \cos \beta \cos \lambda_M &= m \cos (D + M); \\ \cos \beta \sin \lambda_M &= m \sin M \operatorname{tg} (P + U), \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

и далее:

$$\operatorname{tg} \lambda_M = \frac{\sin \gamma \sin (P + U)}{m \cos (D + M)} = \frac{\sin M \operatorname{tg} (P + U)}{\cos (D + M)}.$$

Если планета обладает заметным сжатием, то следует различать планетографическую и планетоцентрическую широты. Под *планетографической широтой* в этом случае понимается угол β , составляемый нормалью к поверхности сфероида планеты в данной точке с плоскостью экватора планеты (что аналогично геодезической широте точек земной поверхности). *Планетоцентрическая широта* β' представляет собою угол, составляемый с плоскостью экватора радиусом-вектором, т. е. отрезком прямой, соединяющим данную точку поверхности с центром эллипсоида (аналогично геоцентрической широте для Земли). Как известно, точное соотношение между β и β' выражается формулой

$$\operatorname{tg} \beta' = (1 - e^2) \operatorname{tg} \beta, \quad (14)$$

где e — эксцентриситет эллипса меридиана, приближенно равный $2e$.

Для получения из наблюдений значения β в случае планеты с большим сжатием вводят дополнительную величину β_n , определяемую соотношением

$$\operatorname{tg} \beta_n = \sqrt{1 - e^2} \operatorname{tg} \beta \quad (15)$$

и называемую *приведенной широтой*. Обозначим угловой полудиамер диска планеты, соответствующий большой полуоси последнего, через δ_a и для каждой измеренной детали получим отношение ρ/δ_a . С точностью, вполне достаточной для практики, можно воспользоваться для дальнейшего расчета нижеследующим приемом. Вычисляем сначала вспомогательные величины n и N , определяемые формулами:

$$\left. \begin{aligned} n \sin N &= \sin D; \\ n \cos N &= \sqrt{1 - e^2} \cos D; \\ \operatorname{tg} N &= \frac{\operatorname{tg} D}{\sqrt{1 - e^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

после чего находим еще две вспомогательные величины m и M :

$$\left. \begin{aligned} \sin m \sin M &= \frac{\rho}{\delta_a} \sin (P + U); \\ \sin m \cos M &= \frac{\rho}{n \delta_a} \cos (P + U). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

С этими данными вычисляем λ_M и β_n по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta_n \sin \lambda_M &= \sin m \sin M; \\ \cos \beta_n \cos \lambda_M &= \cos m \cos N - \sin m \sin N \cos M; \\ \sin \beta_n &= \cos m \sin N - \sin m \cos N \cos M, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

после чего получаем β по формуле (15).

Применение точных формул (11) оправдывает себя только в случае Луны, координаты объектов которой могут быть получены с точностью до $1'$ или $0,01^\circ$, что требует вычислительной точности в $1''$. Точность определения координат деталей на планетах в лучшем случае достигает $0,1^\circ$, обычно не превосходя 1° . В таких условиях целесообразно заменять точный тригонометрический расчет по формулам различными упрощенными приемами, из которых здесь мы отметим ниже следующие.

1. Применение различных таблиц, предназначенных для приближенного решения сферического треугольника, в частности таблиц, дающих высоты h и азимуты A по широте места φ , склонению δ и часовому углу t . В этом случае, очевидно, надо принять за φ дугу D , за t угол $P + U$, за δ величину $90^\circ - \gamma$

и приписывать β как высоту h , а долготу от центрального меридиана λ_M как $180^\circ - A$.

2. Применение графических методов решения сферического треугольника. Наиболее известными, широко применяемыми и очень удобными для практики являются планисферы, предложенные Р. Вульфом и В. В. Каврайским.

3. Специальный графический метод определения координат. На рисунке или сильно увеличенном фото-

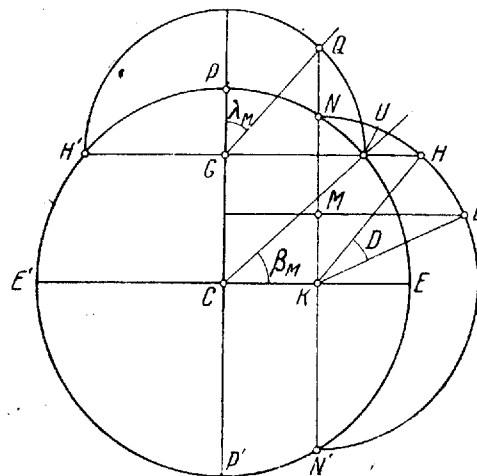


Рис. 40. Получение планетографических координат графическим путем.

графическом снимке проводим проекцию оси вращения PP' , совпадающую с центральным меридианом (рис. 40), и прямую EE' , перпендикулярную к ней. Пусть M — деталь, координаты которой требуется определить. Проводим через нее отрезок прямой NN' , параллельный PP' , и на нем, как на диаметре, строим полуокружность $NHLN'$. Чертим отрезок ML , параллельный EE' , и соединяем точку L с центром K полуокружности. От радиуса KL откладываем угол HKL , равный широте центра диска D , и через точку H проводим отрезок HH' , параллельный EE' . Соединив точку U пересечения этого отрезка с краем диска с центром C последнего, получим на чертеже угол UCE , равный искомой широте детали β . Для получения долготы λ_M , считаемой от центрального меридиана, строим новую полуокружность, на этот раз уже на отрезке UH' , и точку Q ее пересечения с продолжением прямой NN' соединяем с центром G . Угол QGP и даст нам λ_M .

4. Применение сеток. Самым простым и при той малой точности, с какой определяются координаты по рисункам, наиболее целесообразным следует признать использование сеток, представляющих расположение меридианов и параллелей на видимом диске при наличном значении D . Такие сетки неоднократно издавались для значений D от 0 до 7° на предмет определения координат солнечных пятен. Их вполне можно использовать для Луны, Венеры, Меркурия (эклиптикальные координаты деталей) и для Марса в те дни, когда D заключено в пределах $\pm 7^\circ$. Желательно издать комплект сеток до значения

$D = 25^\circ$, что дало бы возможность применять метод для обработки рисунков Марса во всех случаях.

Для построения сеток координаты x и y точек пересечения проекций меридианов и параллелей вычисляются по формулам косой стереографической проекции:

$$\left. \begin{aligned} x &= R (\cos D \sin \beta - \sin D \cos \beta \cos \lambda_M), \\ y &= R \cos \beta \cos \lambda_M, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где R — радиус диска.

Техника применения сеток элементарна. На рисунке проводится центральный меридиан, и сетка, вычерченная на кальке, накладывается на рисунок так, чтобы ее центральный меридиан совпадал с нанесенным на рисунке. После этого координаты λ и β отсчитываются непосредственно, что при интервале между меридианами и параллелями сетки в 10° делается с точностью до 1° .

Сетки могут быть построены и для планеты с большим сжатием. В частности, такие сетки опубликованы для определения координат по рисункам Юпитера.

5. Метод одной сетки. Очень просто изготовить сетку для шарообразной планеты и $D = 0$ — случай, для которого равенства (19) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= R \cos \beta \sin \lambda, \\ y &= R \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Применение такой сетки при любом D основано на предварительном получении рисунка планеты, трансформированного к значению $D = 0$. Трансформация производится при помощи самой сетки, которая должна быть начерчена на прозрачной кальке.

Проводим (рис. 41) центральный меридиан PP' и перпендикулярную к нему прямую EE' . Задача состоит в том, чтобы повернуть изображение шара планеты вокруг диаметра EE' на угол D . Тогда точка A — пересечение экватора с центральным меридианом — переместится в центр диска C , ось PP' встанет перпендикулярно к линии зрения, а оба полюса лягут в точки P и P' на окружности диска. Нетрудно понять, что

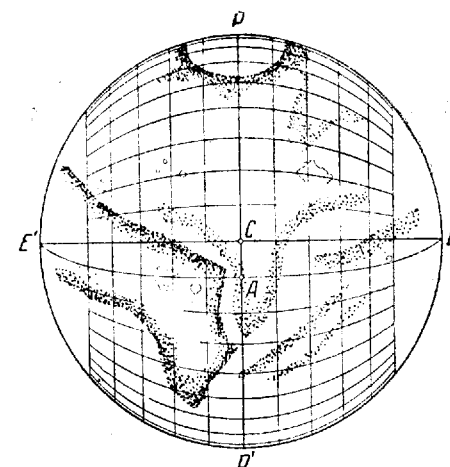


Рис. 41. Получение планетографических координат методом одной сетки.

при таком повороте всякая деталь M будет перемещаться на чертеже по прямой линии, параллельной диаметру PP' . Поэтому технически построение чертежа, передающего расположение деталей на повернутом шаре, осуществляется следующим образом. Сетка ($D=0$) накладывается на рисунок так, что ее центральный меридиан совмещается с прямой EE' (рис. 41). Поверх сетки накладывается еще один листок кальки, на котором заранее начерчены окружность диска и прямые PP' и EE' и на котором будет получено трансформированное изображение. На последнем каждая деталь должна быть перемещена параллельно прямой PP' на отрезок, соответствующий проекции дуги D . Это делается при помощи меридианов сетки, позволяющих для каждой детали отсчитать величину переноса, соответствующего D градусам. По выполнении трансформированного чертежа сетка на него накладывается обычным путем, т. е. так, что ее центральный меридиан совпадает с линией PP' , после чего делается отсчет координат λ_M и β .

При малых значениях D нередко пользуются расчетным приемом, который основан на том, что сначала получают координаты λ_{0M} и β_0 по сетке, соответствующей $D=0$, а потом вносят в них поправки $\Delta\beta$ и $\Delta\lambda$ за отличие D от нуля, что дает истинные значения λ_M и β :

$$\lambda_M = \lambda_{0M} + \Delta\lambda; \quad \beta = \beta_0 + \Delta\beta. \quad (21)$$

С точностью до первого порядка относительно D поправки вычисляются по формулам:

$$\Delta\lambda = D \sin \lambda_{0M} \operatorname{tg} \beta_0; \quad \Delta\beta = D \cos \lambda_0. \quad (22)$$

легко получаемым из равенств (11) путем разложения $\sin D$ и $\cos D$ в ряды.

6. Метод проекции на глобус. Применяется глобус с белой матовой поверхностью, на который черными линиями нанесена сетка меридианов и параллелей. Изображение планеты—рисунка или снимка—проектируется на поверхность шара при помощи оптического проектора. Шар укреплен на штативе, позволяющем поворачивать ось его координатной сетки вокруг двух осей и этим делать установку на нужные значения физических координат P и D . Координаты отсчитываются по сетке шара.

7. Наблюдение прохождения объекта через центральный меридиан. Осуществляется только для планет с быстрым вращением вокруг оси (Марс, Юпитер, Сатурн) и состоит в том, что отмечают момент T прохождения центра детали через центральный меридиан и ее расстояние y от центра диска в этот момент. Это сразу дает значение долготы λ , так как для центрального меридиана $\lambda=L$ и, следовательно, нужно только выполнить интерполирование значения L по эфе-

мериде физических координат на полученный момент T . Широта β легко получается по y согласно формуле

$$\beta = \arcsin \frac{y}{\delta} + D, \quad (23)$$

где δ —полудиамер диска, выраженный в тех же единицах, что и y , а D —широта центра диска.

При точных наблюдениях этого рода пользуются нитяным микрометром, одна из нитей которого при помощи круга позиционных углов устанавливается под углом P к кругу склонения и далее располагается по диаметру диска планеты, указывая наблюдателю положение центрального меридиана. При отсутствии микрометра с позиционным кругом нить устанавливают вдоль центрального меридиана на глаз, пользуясь в случае Марса расположением полярных шапок, а для Юпитера и Сатурна—тем, что центральный меридиан совпадает с малой осью эллипса диска. При наименее точных наблюдениях обходятся совсем без нити, отмечая прохождение детали через диаметр диска, по оценке на глаз совпадающий с центральным меридианом.

§ 19. Определение элементов вращения из наблюдений

Предположим для начала, что мы имеем перед собой небесное тело, элементы вращения которого нам совершенно неизвестны и что на поверхности этого тела удалось заметить и три раза наблюдать некоторую неизменную деталь. В этом случае мы можем, пользуясь методикой расчета, описанной выше, но относя все данные не к плоскости планетного экватора, а к плоскости эклиптики, получить для каждого наблюдения планетоцентрические эклиптикальные координаты: широту b и долготу l , причем последнюю мы условимся отсчитывать, как обычно, т. е. от точки весеннего равноденствия. Таким образом, для трех моментов наблюдения имеем:

$$\begin{array}{llll} \text{Моменты} & . & . & . & t_1 & t_2 & t_3 \\ \text{Координаты} & . & . & . & b_1, l_1 & b_2, l_2 & b_3, l_3 \end{array}$$

Покажем, как на основании этих данных получить элементы вращения: наклон i экватора планеты к плоскости эклиптики, долготу Ω восходящего узла и период P вращения вокруг оси. Для этого рассмотрим планетоцентрическую сферу (рис. 42), на которой EE' —эклиптика, P —северный полюс последней, Υ —точка весеннего равноденствия. Далее, пусть $\mathcal{E}\mathcal{E}'$ —экватор планеты, P —его северный полюс, $\mathcal{Q}$ —точка восходящего узла, так что дуга $\mathcal{Q}\Upsilon$ выражает долготу Ω последнего. Наконец, точка M представляет собою деталь на поверхности планеты, вращающуюся вместе с ней. Планетографическая широта этой детали, отнесенная к экватору планеты, будет $MA = \beta$.

В сферическом треугольнике $МРП$ стороны будут: $РП = i$, $МР = 90^\circ - \beta$, $МП = 90^\circ - b$. Угол $МРР$ при вершине $П$ составляет $90^\circ + (l - \Omega)$. Далее, обозначив через λ_y угол $\angle РМ$,

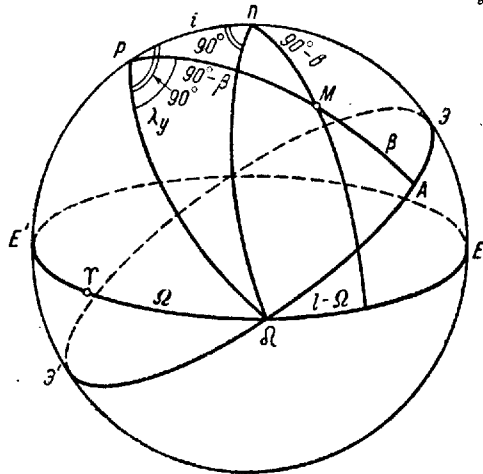


Рис. 42. Определение элементов экватора планеты из наблюдений.

представляющий собою долготу детали, отнесенную к экватору планеты и отсчитываемую от точки узла, мы будем иметь: $МРП = 90^\circ - \lambda_y$. Решая треугольник, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= \sin b \cos i - \cos b \sin i \sin (l - \Omega); \\ \cos \beta \sin \lambda_y &= \sin b \sin i + \cos b \cos i \sin (l - \Omega); \\ \cos \beta \cos \lambda_y &= \cos b \cos (l - \Omega). \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

В верхнем равенстве раскрываем $\sin (l - \Omega)$; после деления на $\cos i$ это дает:

$$\frac{\sin \beta}{\cos i} = \sin b - \cos b \sin l \operatorname{tg} i \cos \Omega + \cos b \cos l \operatorname{tg} i \sin \Omega. \quad (25)$$

Вводим обозначения:

$$\frac{\sin \beta}{\cos i} = x; \quad \operatorname{tg} i \cos \Omega = y; \quad \operatorname{tg} i \sin \Omega = z;$$

$$\cos b \sin l = A; \quad \cos b \cos l = -B; \quad \sin b = -C,$$

после чего переписываем равенство (25) в форме:

$$x + Ay + Bz + C = 0. \quad (26)$$

Три наблюдения дают нам три уравнения, что позволяет найти неизвестные x, y, z . В случае большого количества наблюдений применяется способ наименьших квадратов. После этого элементы экватора и широта детали β вычисляются по формулам:

$$\operatorname{tg} \Omega = \frac{z}{y}; \quad \operatorname{tg} i = y \sec \Omega = z \operatorname{cosec} \Omega; \quad \beta = x \cos i. \quad (27)$$

После этого третье из равенств (24) позволяет найти значения долготы $\lambda_{1y}, \lambda_{2y}, \lambda_{3y}$, соответствующие каждому из наблюдений:

$$\cos \lambda_y = \cos b \cos (l - \Omega) \sec \beta, \quad (28)$$

и получить суточный поворот планеты:

$$\xi = \frac{\lambda_{2y} - \lambda_{1y}}{t_2 - t_1} = \frac{\lambda_{3y} - \lambda_{2y}}{t_3 - t_2}, \quad (29)$$

после чего находим период оборота P :

$$P = \frac{360^\circ}{\xi}. \quad (30)$$

Изложенный метод абсолютного определения элементов вращения на практике применяется редко, так как для тех светил, на поверхности которых действительно видны пятна, допускающие точное определение координат, элементы уже имеются, а для остальных получить необходимый материал не удастся из-за отсутствия на дисках подходящих деталей. Поэтому задача, которую практически приходится решать наблюдателю планет в наше время, чаще всего состоит в получении на основе новых материалов поправок к уже имеющимся элементам вращения.

Дифференцируя первое из равенств (24), получаем:

$$\cos \beta d\beta = -\sin b \sin i di - \cos b \sin (l - \Omega) \cos i di + \sin i \cos b \cos (l - \Omega) d\Omega.$$

При помощи двух других равенств формул (24) приводим это к виду:

$$d\beta = \cos \lambda_y \sin i d\Omega - \sin \lambda_y di. \quad (31)$$

Переходя к конечным разностям и обозначая через β значение широты, отнесенное к предварительно принятым элементам экватора, а через β_0 — значение, отнесенное к исправленным элементам, можем положить:

$$\beta - \beta_0 = \Delta\beta; \quad \sin i \Delta\Omega = X; \quad \Delta i = -Y,$$

что дает:

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta = \beta_0 + X \cos \lambda_y + Y \sin \lambda_y. \quad (32)$$

Таким образом, если наблюдения не удовлетворяют принятым при вычислении β элементам экватора, то значения β будут меняться с λ_y по синусоиде. Уже трех наблюдений достаточно для решения системы уравнений (32) относительно неизвестных β_0, X и Y . На практике обычно используют много наблюдений, решая их по способу наименьших квадратов. Поскольку получить достаточный материал по одной детали затруднительно, объединяют значения

Δβ для ряда деталей, разбивая их на группы по одинаковым интервалам λ_y . Данные отдельных групп потом объединяются в общую кривую при помощи цепного метода, используемого, например, при обработке наблюдений службы широты, что и даст вероятнейшие значения параметров X и Y , а затем искомым поправок Δi , $\Delta \Omega$.

Описанная методика нахождения элементов экватора имеет ту невыгодную сторону, что на получаемые результаты большое влияние оказывают систематические погрешности измерений, и в частности наведений нитей измерительного прибора на края диска, которые, как было выяснено в § 10, в сильной мере подвержены действию иррадиации, особенно при фотографических наблюдениях. Поэтому была предложена и в ряде случаев с успехом применена другая методика, основанная на следующем.

Результаты ряда последовательных определений положения некоторой детали за короткий срок выражают в прямоугольных координатах x и y , отнесенных к началу в центре диска. Поскольку они лежат на проекции соответствующей планетографической параллели, они будут расположены по дуге эллипса, направление малой оси которого определяет направление проекции оси вращения планеты, длина большой оси выражает радиус параллели, а эксцентриситет—широту центра видимого диска D . Таким образом, найдя по точкам элементы эллипса, можно получить поправки ΔD и ΔP к сообщаемым в эфемеридах значениям физических координат, а зная широту β детали,—еще и значение полудиаметра диска, свободное от влияния иррадиации. Техника применения этого принципиально весьма совершенного, но для практики сложного метода зависит от характера наблюдательного материала.

Для определения поправки $\Delta \xi$ к принятой для вычисления эфемерид угловой скорости вращения ξ поступают следующим образом. Для ряда моментов находят значения долготы λ , считаемой от начального меридиана, вращающегося со скоростью ξ . Наличие систематического хода полученных значений со временем указывает, что принятая скорость ξ наблюдениям не удовлетворяет. Составляют условные уравнения вида:

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta \xi (t - t_0), \quad (33)$$

где λ_0 —значение долготы λ в некоторый начальный момент t_0 , и решают их относительно неизвестных λ_0 и $\Delta \xi$.

Если речь идет о больших значениях $\Delta \xi$, как это имеет место при обработке наблюдений Юпитера и Сатурна, где различия в угловой скорости для разных зон велики, то достаточно взять наблюдение за короткий срок (несколько почей), а обработку результатов целесообразно вести графически—путем проведения на графике, представляющем ход λ с t , прямой линии и определения ее углового коэффициента. Если же задача состоит в получении

весьма малой поправки к хорошо известному постоянному периоду оборота, как это имеет место, например, в случае Марса, то приходится брать наблюдения за очень большой промежуток времени, выражаемый несколькими десятилетиями или даже столетиями. В этом случае необходимо, чтобы все используемые ряды определений λ были отнесены к одной и той же и притом наиболее достоверной системе элементов i , Ω и ξ_0 , что, однако, еще не устраняет систематических разностей между отдельными рядами наблюдений. Сведение последних в одну систему составляет тонкую и трудную задачу, требующую большой осторожности и вдумчивости.

§ 20. Физические методы исследования вращения планет

Описанные выше геометрические способы получения элементов вращения небесных тел применимы только в том случае, когда на поверхности тела имеются достаточно резкие и хорошо различимые детали, видимое перемещение которых по диску планеты позволяет удобно наблюдать вращение последней. Во многих случаях таких деталей нет. Это мы имеем, например, для Венеры, Урана, Нептуна, колец Сатурна. В этом случае геометрические методы исследования вращения применить невозможно, и потому приходится обращаться к физическим методам.

Для планеты, имеющей достаточное сжатие, элементы экватора i , Ω и координаты α , σ северного полюса оси вращения могут быть определены методами небесной механики, а именно на основе анализа неравенств в движении спутников планеты. Подробнее об этом говорилось в § 16. Однако остается задача определения периода и направления вращения. Об этом и будет идти речь в настоящем параграфе.

Если на поверхности планеты различные участки имеют неодинаковую яркость, то вращение вокруг оси, вообще говоря, будет сопровождаться периодическими колебаниями блеска. Это открывает возможность определять период вращения фотометрическим путем (см. § 33). Действительно, для Марса, Урана, Нептуна и некоторых астероидов были обнаружены периодические изменения блеска, несомненно связанные с вращением. Любопытно, что в некоторых случаях сами различия яркости, вызывающие эти колебания, непосредственно наблюдаемы быть не могут, поскольку, например, на диске Урана детали почти неразличимы, а на Нептуне и вовсе невидимы. Техника наблюдений и их обработки, в частности определение моментов максимумов и периода изменения блеска, применяется та же, что и при наблюдениях переменных звезд.

Основной недостаток фотометрического метода состоит в том, что он, определяя период, не позволяет установить направление

вращения. Кроме того, на поверхности планеты может быть несколько чередующихся зон со светлой и темной окраской. В этом случае период колебания блеска будет равен $1/2$, $1/3$, вообще $1/N$ истинного периода оборота вокруг оси. Так именно получилось для Нептуна, у которого период изменения блеска оказался равным половине периода оборота.

Значительно более широкие возможности заключаются в спектроскопическом методе исследования вращения планет, основанном на применении принципа Доплера. Как известно, определяемое последним изменение $\Delta\lambda$ длины волны λ спектральной линии выражается формулой

$$\Delta\lambda = \frac{v}{c} \lambda, \quad (34)$$

где v —лучевая скорость движения источника излучения по отношению к наблюдателю, а c —скорость света. Если речь идет о планете или спутнике, отражающих солнечные лучи, то необходимо принимать во внимание движение отражающей свет поверхности как по отношению к точке наблюдения, так и по отношению к источнику излучения—Солнцу. Изменение длины волны $\Delta\lambda$ в этом случае равно сумме изменений, вызванных каждым из движений отдельно.

Из сказанного следует, что если мы обозначим расстояние Земля—планета через R_1 и Солнце—планета через R_2 , то доплеровское изменение $\Delta\lambda$ длин волн линий солнечного спектра в спектре планеты, вызванное движением Земли и планеты по их орбитам, будет выражено равенством

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 = \frac{\lambda}{c} \left(\frac{dR_1}{dt} + \frac{dR_2}{dt} \right), \quad (35)$$

где $\frac{dR_1}{dt} = v_1$ и $\frac{dR_2}{dt} = v_2$ —лучевые скорости планеты по отношению к Земле и Солнцу. Очевидно, смещение спектральных линий такого происхождения будет одинаковым для всех точек диска планеты.

Движение точек поверхности планеты, вызванное вращением вокруг оси, также вызывает доплеровское смещение линий, но это смещение в отличие от предыдущего будет различным для разных точек диска. Именно, оно будет равно нулю для всех точек центрального меридиана, поскольку скорость вращательного движения в них перпендикулярна к лучу зрения, и оно будет максимальным для точек пересечения лимба с экватором планеты.

Рассмотрим случай планеты, находящейся в истинном противостоянии, когда фазовый угол равен нулю, а направления на Землю и Солнце совпадают. Пусть, кроме того, радиус-вектор лежит в плоскости экватора планеты, т. е. $D_3 = D_c = 0$. Поскольку планета вращается в прямом направлении, точка лимба, лежащая на

экваторе у восточного края диска, приближается к Земле и Солнцу с линейной скоростью v_0 :

$$v_0 = \frac{2\pi R}{P}, \quad (36)$$

где R —радиус экватора, а P —период оборота планеты вокруг оси. Это смещение линий направлено в сторону фиолетового конца спектра и будет соответствовать изменению длины волны $\Delta\lambda = -2v_0/c$ (здесь множитель 2 получается от сложения эффектов движения к Земле и к Солнцу). На западном краю точка экватора удаляется от Земли и Солнца с той же скоростью v_0 , и потому смещение линий в красную сторону соответствует изменению длины волны $\Delta\lambda = +2v_0/c$. Если сравнить положение линий западного и восточного краев, то их относительное положение будет различаться соответственно разности длин волн $2\Delta\lambda = 4v_0\lambda/c$. Наличие множителя 4 облегчает измерение этой разности и позволяет определять v_0 по измеренному $2\Delta\lambda$ с большой точностью.

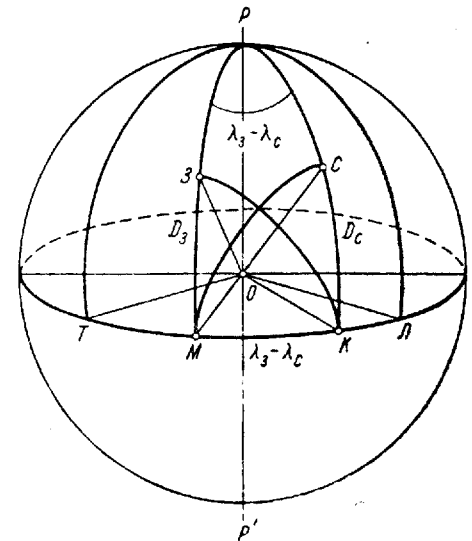


Рис. 43. Эффект Доплера, вызываемый вращением планеты.

Рассмотрим теперь общий случай. Пусть O (рис. 43)—планетоцентрическая сфера, PP' —ось вращения планеты, $TMKL$ —проекция экватора планеты, C и Z —проекции Солнца и Земли. Дуги $ЗМ = D_3$ и $СК = D_c$ представляют собою соответственно планетоцентрические широты центра диска планеты и подсолнечной точки. Точка T является пересечением терминатора с экватором; поэтому $\angle TRK = 90^\circ$. Точка L соответствует пересечению экватора с лимбом, так что $\angle LМ = \angle LPM = 90^\circ$.

При наблюдениях вне противостояния сравниваются смещения линий на краях видимого диска, соответствующих на сфере точкам T и L . Для точки T скорость вращения v_0 будет перпендикулярна к радиусу OT и потому по направлению будет совпадать с радиусом сферы OK . Проекция последнего на направления OC и OZ будут пропорциональны $\cos D_c$ и $\cos(\angle ZK) =$

$= \cos D_s \cos (\lambda_s - \lambda_c)$, и смещение линий спектра определяется изменением длины волны:

$$\Delta \lambda_T = -v_0 \frac{\lambda}{c} [\cos D_c + \cos D_s \cos (\lambda_s - \lambda_c)]. \quad (37)$$

Точно так же скорость для точки L по направлению будет совпадать с радиусом OM и ее проекции на направления OC и OZ будут пропорциональны $\cos (\sphericalangle CM) = \cos D_c \cos (\lambda_s - \lambda_c)$ и $\cos D_s$, так что смещение линий будет соответствовать изменению длины волны:

$$\Delta \lambda_L = +v_0 \frac{\lambda}{c} [\cos D_c \cos (\lambda_s - \lambda_c) + \cos D_s]. \quad (38)$$

Относительное смещение линий двух краев спектра определяется разностью $\Delta \lambda$ этих изменений:

$$\Delta \lambda = \Delta \lambda_L - \Delta \lambda_T = v_0 \frac{\lambda}{c} (\cos D_c + \cos D_s) [1 + \cos (\lambda_s - \lambda_c)]. \quad (39)$$

Отсюда по измеренному на спектрограмме значению $\Delta \lambda$ можно найти линейную скорость точек экватора v_0 и, далее, пользуясь равенством (36), период оборота P .

Такой метод определения периода вращения планеты впервые был применен в 1895 г. к Сатурну и его кольцу А. А. Белопольским в Пулкове. Спектрограммы были получены на однопризменном спектрографе, установленном на нормальном астрографе Пулковской обсерватории. Замечательная работа эта явилась одним из этапов большой серии пионерских исследований, которые были выполнены А. А. Белопольским в области применения принципа Доплера к определению лучевых скоростей небесных тел. Примерно в то же время началось применение этого метода и на ряде других обсерваторий.

Спектрограф, применяемый для изучения вращения планет, должен удовлетворять следующим техническим требованиям. Во-первых, его щель должна быть достаточно длинной, чтобы на ней умещался весь диаметр изображения диска планеты. Во-вторых, спектрограф должен поворачиваться вокруг оси коллиматора, чтобы можно было всегда совмещать щель с экваториальным диаметром диска. В-третьих, щель должна иметь кривизну, обеспечивающую прямолинейность линий на спектрограмме. Если по каким-либо причинам щель с направлением экватора не совпадала, то в результате измерения приходится вводить специальные поправки.

Для определения скорости v_0 по спектрограмме на практике применяют один из следующих методов:

1. Измерение длин волн λ_L и λ_T для точек пересечения экватора с краями видимости

го диска. Поскольку диаметр диска определяет ширину спектрограммы, это практически сводится к точному определению длин волн по концам линий на двух границах спектра. Методика измерений обычная, значения λ выводятся привязкой к линиям спектра сравнения. Смещение $\Delta \lambda$ находится как разность полученных значений λ :

$$\Delta \lambda = \lambda_L - \lambda_T. \quad (40)$$

Такой метод измерения включает в себе ряд трудностей, порождающих систематические погрешности. Так, концы линий обычно размыты из-за дрожания и размывания краев диска планеты, что затрудняет наведение нитей измерительного прибора. Далее, фактически измеряемый кончик линии не соответствует самому краю, но дает скорость участка, несколько смещенного внутрь диска. Наконец, астигматизм спектрографа порождает различные инструментальные эффекты. Совокупное действие всех этих источников ошибок обычно влечет за собою преуменьшение получаемой скорости v_0 и преувеличение вычисляемого по ней периода вращения.

2. Расположение изображений спектров на снимке, при котором края двух спектров, соответствующие точкам L и T , примыкают друг к другу. В этом случае можно прямо измерять линейное смещение концов линий Δx и, зная функцию дисперсии, получать непосредственно разность длин волн $\Delta \lambda$, минуя абсолютные определения самих длин волн. Измерения и расчеты в этом случае будут несколько проще, но систематические ошибки те же, что и в предыдущем методе.

3. Измерение наклона линий в спектре планеты по отношению к линиям неподвижного источника излучения. Легко показать, что на спектрограмме, при получении которой щель спектрографа центрально пересекала диск планеты вдоль экватора, спектральные линии получат некоторый наклон φ , сохраняя прямолинейную форму. Пусть TCL (рис. 44) — половина экватора планеты, обращенная в сторону Земли. Рассмотрим на ней точку M , находящуюся от центра диска C на планетоцентрическом угловом расстоянии γ и на линейном расстоянии от центра O проекции диска на картинной плоскости $y = R \sin \gamma$. Скорость в точке M изображена вектором $MA = v_0$, а ее проекция на линию зрения будет $MZ = v_{0z} = v_0 \sin \gamma$. Из этого следует:

$$v_{0z} = \frac{y}{R} v_0. \quad (41)$$

Точке диска M на спектрограмме, схематически изображенной в правой части рис. 44, соответствует на данной длине волны λ

точка M' . Спектральная линия CC' в этой точке получит доплеровское смещение Δx , которое, если обозначить линейную дисперсию на длине волны λ через $D = \frac{dx}{d\lambda}$, будет равно:

$$\Delta x = D \Delta \lambda = v_0 D \frac{\lambda}{c} \frac{y}{R}, \quad (42)$$

откуда видно, что Δx пропорционально y . Из этого следует, что, поскольку все остальные множители правой части равенства при

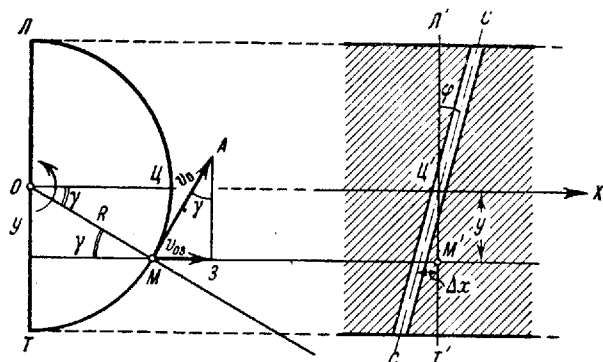


Рис. 44. Наклон линий в спектре вращающейся планеты.

данном λ постоянны, зависимость Δx от y будет линейной, и изображение линии сохранит свою прямолинейную форму. Угол поворота φ определится равенством

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta x}{y} = v_0 \frac{\lambda}{c} \frac{D}{R}, \quad (43)$$

что позволяет легко получить v_0 по измеренному значению φ :

$$v_0 = c \frac{R \varphi^\circ \sin 1^\circ}{\lambda D}. \quad (44)$$

Для определения φ применяют микроскоп с позиционным микрометром. Нить микрометра сначала устанавливают параллельно линиям спектра сравнения и отсчитывают на позиционном круге соответствующий угол Φ_0 , потом ориентируют нить по линиям спектра планеты и получают на круге угол Φ . После этого угол наклона φ получают как разность отсчетов:

$$\varphi = \Phi - \Phi_0. \quad (45)$$

Такое измерение не отличается большой точностью, поскольку трудно делать установки нити по размытым линиям узкого

спектра планеты, но зато получаемый результат свободен от краевых эффектов, влияющих при других способах измерения.

Спектрографическое определение периода вращения даже для быстро вращающихся планет по точности не может конкурировать с геометрическими методами, особенно если последние основаны на наблюдениях постоянных во времени деталей. Но оно становится незаменимым в случае отсутствия всяких деталей на диске светила.

§ 21. Методы определения возвышений точек поверхности небесного тела; зенитное расстояние и азимут Солнца и Земли для этих точек

Важнейшей задачей топографии Луны и планет является определение возвышений различных точек видимой поверхности — горных вершин, отдельных облаков и целых облачных слоев — над некоторым нормальным уровнем поверхности.

При решении как этой задачи, так и некоторых вопросов планетной топографии и картографии, а также при многих фотометрических и термических исследованиях необходимо иметь для точек поверхности планеты, заданных планетографическими координатами λ и β , положения Солнца и Земли на небесной сфере, отнесенные к горизонту и зениту этих точек, т. е. выраженные в форме горизонтальных координат: зенитного расстояния z и азимута A . Расчет этих координат выполняется весьма просто, если для данной планеты в эфемеридах физических координат даются планетоцентрические координаты Солнца D_s , λ_s и Земли D_z , λ_z и если пренебречь суточным параллаксом, что для большей части задач, выдвигаемых практикой, вполне допустимо.

Пусть O (рис. 45) — центр планетоцентрической сферы, PP' — прямая, параллельная оси вращения планеты, C и Z — планетоцентрические проекции Солнца и Земли, а M — зенит заданной точки поверхности планеты. Рассмотрим сферический треуголь-

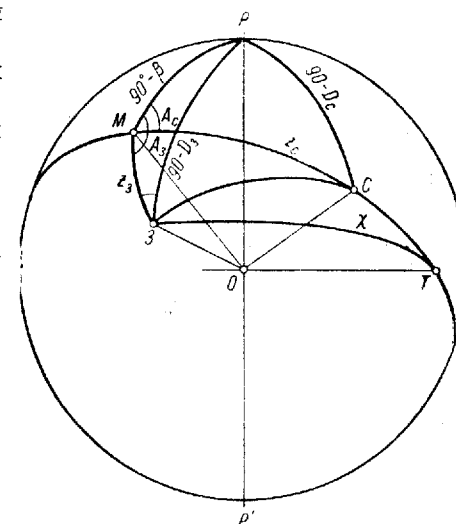


Рис. 45. Расчет зенитного расстояния и азимута Солнца для заданной точки поверхности тела.

ник MPC . В нем стороны будут: $MP = 90^\circ - \beta$, $CP = 90^\circ - D_c$, CM — искомое зенитное расстояние Солнца z_c . Угол MPC равен разности долгот $\lambda_c - \lambda$. Решая треугольник и обозначая угол $СМР$ через A_c , получаем:

$$\left. \begin{aligned} \cos z_c &= \sin D_c \sin \beta + \cos D_c \cos \beta \cos (\lambda_c - \lambda); \\ \sin z_c \cos A_c &= \sin D_c \cos \beta - \cos D_c \sin \beta \cos (\lambda_c - \lambda); \\ \sin z_c \sin A_c &= \cos D_c \sin (\lambda_c - \lambda). \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

Первое выражение дает нам z_c , а два вторых позволяют получить угол A_c , который, очевидно, представляет собою азимут Солнца, отсчитанный от точки севера:

$$\operatorname{tg} A_c = \frac{\cos D_c \sin (\lambda_c - \lambda)}{\sin D_c \cos \beta - \cos D_c \sin \beta \cos (\lambda_c - \lambda)}. \quad (47)$$

Эти формулы при помощи общеизвестных приемов можно привести к логарифмическому виду. При расчетах невысокой точности, например при обработке фотометрических наблюдений, тригонометрический расчет по формулам целесообразно заменять графическим решением сферического треугольника по сеткам Вульфа или Каврайского или же применять таблицы для расчета высот и азимутов, о которых упоминалось в § 18.

Совершенно аналогичным образом мы получим зенитное расстояние z_3 и азимут A_3 для Земли, рассматривая треугольник $ЗРМ$. В нем сторона $ЗМ$ есть искомое зенитное расстояние, сторона $ЗР = 90^\circ - D_3$, $\angle ЗРМ = \lambda_3 - \lambda$, $\angle ЗМР = A_3$. Мы имеем:

$$\left. \begin{aligned} \cos z_3 &= \cos D_3 \cos \beta + \sin D_3 \sin \beta \cos (\lambda_3 - \lambda); \\ \sin z_3 \cos A_3 &= \cos D_3 \sin \beta - \sin D_3 \cos \beta \cos (\lambda_3 - \lambda); \\ \sin z_3 \sin A_3 &= \cos D_3 \sin (\lambda_3 - \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

и далее:

$$\operatorname{tg} A_3 = \frac{\cos D_3 \sin (\lambda_3 - \lambda)}{\cos D_3 \sin \beta - \sin D_3 \cos \beta \cos (\lambda_3 - \lambda)}. \quad (49)$$

Для топографического и физического исследования поверхностей планет большой интерес представляют тени от неровностей. Для отдельной возвышенности, вершина которой лежит на высоте H над поверхностью окружающей гладкой равнины, длина тени l , очевидно, будет равна:

$$l = H \operatorname{tg} z_c. \quad (50)$$

Это дает возможность путем микрометрического измерения длины тени получить высоту H . Однако длина тени, непосредственно измеряемая на диске, изменена эффектом перспективы. Считая тень за прямолинейный отрезок и обозначая угол, составляемый направлением тени с направлением на наблюдателя, через χ ,

для длины l' проекции тени на картинной плоскости будем иметь:

$$l' = l \sin \chi. \quad (51)$$

Для получения угла χ рассмотрим проекцию тени на планетоцентрической сфере (рис. 45), причем будем исходить из следующих соображений. Тень, полученная на горизонтальной поверхности, будет перпендикулярна к отвесной линии OM и должна лежать в плоскости вертикала Солнца OMC . Сечение этой плоскостью планетоцентрической сферы дает большой круг MCT . Поэтому направление тени будет параллельно диаметру сферы OT , лежащему в этой плоскости и перпендикулярному к OM . Считая направление тени в сторону Солнца, мы получим ее положение на сфере в виде точки T , расположенной на большом круге MC на расстоянии 90° от точки M . Дуга $ЗТ$, соединяющая точку $З$ с T , очевидно, стягивает угол $\angle ZOT = \chi$. Из прямоугольного треугольника $ЗМТ$, в котором $\angle ЗМТ = A_3 - A_c$, получаем:

$$\cos \chi = \sin z_3 \cos (A_3 - A_c). \quad (52)$$

Зная χ , мы можем вычислить искомую высоту H согласно формуле

$$H = l' \operatorname{ctg} z_c \operatorname{cosec} \chi. \quad (53)$$

Такой метод широко применяется на практике для определения высоты лунных гор, но неровности самой поверхности, на которой наблюдается тень, являются источником погрешностей.

Другой способ определения высоты основан на явлении понижения видимого горизонта с высотой, благодаря которому изолированные горные вершины или плавающие высоко в атмосфере отдельные облака освещаются Солнцем тогда, когда находящаяся под ними поверхность нормального уровня солнечных лучей не получает. Благодаря этому такие возвышения бывают видны как светлые выступы на терминаторе или даже как изолированные светлые точки за линией последнего.

Сущность явления ясна из рис. 46, на котором O — центр шарообразной планеты, CT — направление солнечного луча, касательного к поверхности, так что точка T — положение геометрического терминатора, B — вершина горы, возвышающаяся над уровнем подошвы Π на высоту $B\Pi = H$. При показанном на рисунке расположении точка B освещается солнечными лучами и потому будет видна как светлая точка, отстоящая от терминатора T на угловое расстояние, определяемое углом $\angle BOT = d$. Из рис. 46 видно, что этот угол равен углу $\angle TBГ$, на который малый круг видимого из точки B горизонта отстоит от математического горизонта этой точки, линия пересечения которого с плоскостью чертежа представлена прямой $ГГ'$, перпендикулярной

выход из этого затруднения в том, что используют два различных значения полудиаметра Луны, из которых одно (I) служит для вычисления значений видимого углового полудиаметра диска, сообщаемых в обычных эфемеридах Луны, в то время как второе (II) применяется для предвычисления солнечных затмений. Эти значения, отнесенные к среднему расстоянию до Луны 384 400 км или к экваториальному горизонтальному параллаксу $57'2''{,}70$, таковы:

	Угловой полу- диаметр	Линейный полудиаметр в км	в единицах радиуса земного экватора
I	$932''{,}58$	1737,9	0,27247
II	$931''{,}92$	1736,7	0,27227

Которое из этих двух значений ближе к истинному и потому должно применяться при картографических и физических исследованиях, в настоящее время сказать нельзя.

Было проведено большое количество сравнений экваториального и полярного диаметров диска. Сжатия обнаружить не удалось, что и соответствует тому, чего можно было ожидать при столь малой угловой скорости вращения. Вместе с тем фигуру Луны нельзя признать и сферической. Еще Ньютон указал, что Луна должна быть несколько вытянута по среднему направлению радиуса-вектора, и оценил величину этого удлинения в 0,000016 лунного радиуса. В дальнейшем проблемой фигуры Луны занимались многие ученые, применяя как теоретические, так и наблюдательные методы исследования. В последнее время здесь были с успехом применены методы фотограмметрии, основанные на измерении видимого перемещения деталей в разных частях лунного диска под влиянием либрации. Они показали, что величина вытянутости очень мала и не превосходит несколько тысячных лунного радиуса. Это составляет около половины высоты самых высоких лунных гор.

Делались также опыты по общей гипсометрии лунной поверхности, которые показали, что наиболее возвышенной является область большого южного материка, в то время как крайние понижения соответствуют области Океана Бурь. Разность средних высот доходит до 4000 м.

Неизменность очертаний пятен на лунном диске показала уже древним, что Луна движется в пространстве так, что одно ее полушарие остается всегда повернутым к Земле, из чего следует, что период оборота вокруг оси для нее совпадает с периодом оборота вокруг Земли. Телескопические наблюдения Галилея позволили

ГЛАВА V

ТОПОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

§ 22. Луна и проблемы селенографии

Близость Луны позволяет изучать ее поверхность с такой детальностью, которая неосуществима ни для одного другого небесного тела. При благоприятных условиях современный телескоп позволяет различать на лунной поверхности детали размером до 100 м. Вместе с тем появляется возможность выполнять различные измерения и, в частности, определять широты и долготы деталей с точностью, намного превосходящей ту, которая достигается для деталей на поверхности планет. Все это позволяет применять к лунной поверхности такие приемы наблюдения, измерения и расчета, которые были бы бесполезны в отношении более удаленных небесных тел, и тем придает науке о Луне—селенографии—несколько специфический и обособленный характер. Вопросам селенографии посвящена обширная специальная литература. Здесь эти вопросы будут по необходимости затронуты очень бегло:

Измерения полудиаметра лунного диска очень многочисленны и выполнялись различными методами. Помимо способов, перечисленных в § 15, здесь используются и специальные селенографические способы, применимые только для Луны. Они основаны на выводе величины полудиаметра из наблюдений моментов покрытий звезд Луной, а также контактов солнечный затмений. Затруднения создаются зубчатостью видимого края лунного диска, вызываемой неровностями рельефа поверхности, проектирующимися на фоне неба в виде выступов и впадин до $4''$ глубиной. Это заставляет выравнивать и сглаживать полученные из измерений результаты, относя окончательные данные к некоторому среднему уровню лунной поверхности.

На результатах измерений сильно сказывается иррадиация: всякого рода наблюдения, отнесенные к светлomu лимбу, дают значения полудиаметра, превышающие то, что получается из наведений на темный край (при пепельном свете) или при солнечных затмениях. Эфемеридная астрономия находит формальный