

DETERMINATION OF COORDINATES OF THE BASIC
POINTS OF THE ILLUMINATED PART OF THE SPHERICAL
PLANET'S VISIBLE DISC
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОСНОВНЫХ ТОЧЕК
ОСВЕЩЕННОЙ ЧАСТИ ВИДИМОГО ДИСКА
СФЕРИЧЕСКОЙ ПЛАНЕТЫ

V.V. Mikhanchuk

Odessa National Maritime Academy
Didrikhsona 8, Odessa 65029 Ukraine, *vmihalchuk@mail.ru*

ABSTRACT. The formulae for determination of planetocentric coordinates of the basic points of an illuminated part of the visible disc of a spherical planet in projection onto the plane of the sky are derived. The formulae are deduced from general expressions using an auxiliary coordinate system connected with equator of intensity, and realizing the transition from this system to planetocentric coordinates. The proposed formulae do not require attraction of auxiliary coordinate system and allow a immediate transition, in planetocentric coordinates, from the center of the geometric disc of the spherical planet to the given point of its visible disc under various conditions of illumination. The planetocentric coordinates of the basic points for visible discs of the Mercury, Venus and Mars on their physical ephemerides are calculated.

В работе получены формулы для определения планетоцентрических координат основных точек освещенной части видимого диска сферической планеты, в проекции на картинную плоскость. Формулы выведены из общих выражений, использующих вспомогательную систему координат, связанную с экватором интенсивности, и осуществляющих переход от этой системы к планетоцентрическим координатам. Предложенные формулы не требуют привлечения вспомогательной системы координат и позволяют осуществить непосредственный переход в планетоцентрических координатах от центра геометрического диска сферической планеты к данной точке ее видимого диска при различных условиях освещенности. Вычислены планетоцентрические координаты основных точек для видимых дисков Меркурия, Венеры и Марса по их физическим эфемеридам.

Key words: planets; phase; physical ephemerides; planetocentric coordinates; planetographic coordinates.

1. Введение

При физических наблюдениях поверхности планет Солнечной системы и их естественных спутников возникает задача определения планетографических координат деталей альbedo на изображениях их видимых дисков. Для планет земной группы, форму которых можно считать в первом приближении сферической, эта задача усложняется влиянием фазы, когда фазовый угол Φ отличен от нуля. При этом фаза планеты рассматривается в ортографическом приближении.

Решению рассматриваемой задачи посвящены работы (Михальчук, 2004а; 2007а; 2007б), в которых предложены методы определения планетографических координат точек освещенной части видимого диска сферической планеты в системе RGS (Свешников, 2004) точек, совпадающих с их планетоцентрическими координатами (в системе, подобной RCS), но с направлением отсчета долготы, таким как в системе координат RGS. Эти координаты также применены в настоящей работе.

При наземных и околоземных наблюдениях планеты вращающаяся планетоцентрическая система координат наблюдается на ее видимом диске в ортографической проекции. Основной плоскостью этой системы является плоскость экватора планеты, а положение каждой точки поверхности планеты задается с помощью планетоцентрической широты b и долготы l .

Методы (Михальчук, 2004а; 2007а; 2007б) позволяют исключить влияние фазы планеты на результат определения планетоцентрических координат любой точки на освещенной части ее видимого диска, но решение поставленной задачи в этих методах является не прямым, а многоэтапным, с

привлечением вспомогательной системы координат, связанной с экватором интенсивности. Прямое решение задачи для отдельных точек было получено в работах: (Михальчук, 2001) – для центра освещенной части видимого диска планеты и (Mikhailchuk, 2004) – для полюса освещенности и видимого центра ортографического терминатора.

Для определения планетоцентрических координат деталей и для фотометрических измерений на освещенной части видимого диска планеты представляют интерес еще четыре точки: две на экваторе интенсивности (полюс фазы и зеркальная точка), и две – ортографические рога (северный и южный).

Таким образом, возникает необходимость в прямом решении поставленной задачи для указанных точек. Целью настоящей работы является получение формул, позволяющих непосредственно вычислить планетоцентрические координаты основных точек освещенной части видимого диска планеты.

2. Основные точки освещенной части видимого диска сферической планеты

Рассмотрим видимый диск сферической планеты, освещенной Солнцем под произвольным фазовым углом Φ (рис.1). Пусть O – геометрический центр диска планеты (субтерральная точка), E – подсолнечная точка (полюс освещенности), точки A и B – ортографические рога диска. Основные точки диаметра интенсивности:

C – центр освещенной части видимого диска планеты, L – полюс фазы, F – точка наименьшей освещенности диска, T – видимый центр ортографического терминатора, M – зеркальная точка. Необходимо найти планетоцентрические координаты точек E, C, L, T, M, A и B по заданным планетоцентрическим координатам точки O .

Для определения положения любой точки освещенной части видимого диска сферической планеты на ее поверхности в методе (Михальчук 2004а) применялась невращающаяся вспомогательная сферическая система координат (λ, φ) , в которой за основную плоскость принята плоскость экватора интенсивности, а полюсами являются ортографические рога диска. Положение точки в ней определяется широтой φ , отсчитываемой от экватора интенсивности, и долготой λ , отсчитываемой от среднего меридиана к западу планеты.

Угол положения P оси вращения планеты и угол положения Q точки наименьшей освещенности ее видимого диска на геоцентрической небесной сфере (Абалакин, 1979) позволяют определить планетоцентрические координаты l и b данной точки по ее вспомогательным координатам λ и φ .

Планетоцентрические координаты точки O из-

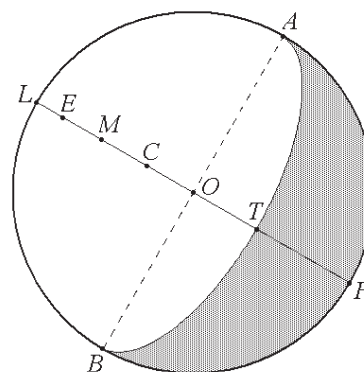


Рис. 1: Основные точки освещенной части видимого диска сферической планеты

вестны из физических эфемерид и равны (l_p, b_p) , причем $b_p = D_{\oplus}$, где D_{\oplus} – планетоцентрическое склонение Земли. Планетоцентрические координаты точки C равны (l_0, b_0) и определяются по формулам, полученным в работе (Михальчук, 2001). В работе (Mikhailchuk, 2004) были выведены формулы для вычисления планетоцентрических координат (l, b) точек E и T .

Возможность получения формул для определения планетоцентрических координат точек L и M на основе метода (Михальчук, 2004а) показана в работах (Михальчук, 2004б; 2005; Mikhailchuk, 2005). Остается получить формулы для определения планетоцентрических координат точек L, M, A и B .

Полюс фазы (точка L) всегда расположен на ортографическом лимбе планеты. В зеркальной точке M угол падения солнечных лучей равен углу их отражения от поверхности планеты. Зеркальная точка имеет большое значение при фотометрических наблюдениях планет (Акимов, 1979), она часто используется при учете поправки за фазу для редукции к геометрическому центру видимого диска в позиционных наблюдениях планет (Сафронов, 1978; Свешников, 1978; Toulmonde, Chollet, 1994). Точки C и M всегда находятся на освещенной части видимого диска планеты.

В работе (Михальчук, 2004а), кроме вспомогательной долготы λ , рассматривается еще долгота λ_0 , отсчитываемая от линии рогов AB , проходящей через субтерральную точку O (рис.1). Эти долготы связаны между собой соотношением $\lambda_0 = \lambda + \gamma$, где γ – фазовое смещение центра диска планеты.

Таблица 1: Физические эфемериды планет на 0^h УТ 8 января 2004 года

Планета	r	P	D_{\oplus}	$A_{\oplus} - A_{\odot}$	D_{\odot}	k	Φ	Q	l_p
Меркурий	4'' .08	7° .08	-7° .13	+105° .32	0° .00	0.369	105° .2	279° .03	261° .81
Венера	6.58	342.18	+1.29	-50.70	+1.88	0.817	50.68	73.55	352.94
Марс	3.99	327.12	-25.12	-41.84	-12.38	0.875	41.42	67.12	154.90

3. Планетоцентрические координаты некоторых основных точек освещенной части видимого диска сферической планеты

Пусть имеется изображение сферической планеты и из ее физических эфемерид известны величины Φ , D_{\oplus} , P , Q и l_p . Планетоцентрические координаты (l, b) любой точки освещенной части видимого диска планеты определяются по ее вспомогательным координатам (λ, φ) из общих формул (Михальчук, 2004а). Для точек, лежащих на экваторе интенсивности, $\varphi = 0$, что позволило в работе (Mikhailchuk, 2004) получить из этих формул более упрощенные выражения для нахождения планетоцентрических координат любой точки освещенной части экватора интенсивности. Применим их к рассматриваемым точкам L и M .

Полос фазы имеет долготы $\lambda = \pm 90^\circ - \gamma$ и $\lambda_0 = \pm 90^\circ$. Долготы зеркальной точки равны $\lambda = \pm \frac{\Phi}{2} - \gamma$ и $\lambda_0 = \pm \frac{\Phi}{2}$. Выбор знака здесь осуществляется по правилу (Михальчук, 2004а): верхний знак используется при $\sin(P - Q) > 0$, а нижний знак – при $\sin(P - Q) < 0$. Это правило знаков распространяется и далее, на все последующие выражения. Тогда из формул для вычисления планетоцентрических координат точек экватора интенсивности (Mikhailchuk, 2004), учитывая правило знаков, получим для полюса фазы (точки L)

$$\sin b = -\cos D_{\oplus} \cos(P - Q), \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}(l - l_p) = \frac{\sin(P - Q)}{\sin D_{\oplus} \cos(P - Q)} \quad (2)$$

и для зеркальной точки (точки M)

$$\sin b = \cos \frac{\Phi}{2} \sin D_{\oplus} - \sin \frac{\Phi}{2} \cos D_{\oplus} \cos(P - Q), \quad (3)$$

$$\operatorname{tg}(l - l_p) = \frac{\sin \frac{\Phi}{2} \sin(P - Q)}{\cos \frac{\Phi}{2} \cos D_{\oplus} + \sin \frac{\Phi}{2} \sin D_{\oplus} \cos(P - Q)}. \quad (4)$$

Для ортографических рогов (точек A и B) значения долгот λ и λ_0 не определены, а значения широты составляют $\varphi = +90^\circ$ и $\varphi = -90^\circ$ соответственно. Тогда из формул (Михальчук, 2004а) можно найти планетоцентрические координаты точки A северного ортографического рога

$$\sin b = \cos D_{\oplus} |\sin(P - Q)|, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}(l - l_p) = \frac{\pm \cos(P - Q)}{-\sin D_{\oplus} |\sin(P - Q)|} \quad (6)$$

и точки B южного ортографического рога

$$\sin b = -\cos D_{\oplus} |\sin(P - Q)|, \quad (7)$$

$$\operatorname{tg}(l - l_p) = \frac{\mp \cos(P - Q)}{\sin D_{\oplus} |\sin(P - Q)|}. \quad (8)$$

Знаки числителя и знаменателя в формулах (2), (4), (6) и (8) совпадают со знаками $\sin(l - l_p)$ и $\cos(l - l_p)$ соответственно.

Формулы (1)-(8) не требуют привлечения вспомогательных координат и осуществляют непосредственный переход в планетоцентрических координатах от центра геометрического диска планеты к соответствующей точке ее видимого диска.

Планетоцентрические координаты полюса освещенности (точки E): $b = D_{\odot}$, $l - l_p = A_{\oplus} - A_{\odot}$, где D_{\odot} – планетоцентрическое склонение Солнца, A_{\oplus} и A_{\odot} – планетоцентрические прямые восхождения Земли и Солнца соответственно в невращающейся планетоцентрической экваториальной системе координат PES (Свешников, 2004). Поэтому из формул (Mikhailchuk, 2004) получим

$$\sin D_{\odot} = \cos \Phi \sin D_{\oplus} - \sin \Phi \cos D_{\oplus} \cos(P - Q), \quad (9)$$

$$\operatorname{tg}(A_{\oplus} - A_{\odot}) = \frac{\sin \Phi \sin(P - Q)}{\cos \Phi \cos D_{\oplus} + \sin \Phi \sin D_{\oplus} \cos(P - Q)}, \quad (10)$$

где знаки числителя и знаменателя в формуле (10) совпадают со знаками $\sin(A_{\oplus} - A_{\odot})$ и $\cos(A_{\oplus} - A_{\odot})$ соответственно. Формулы (9) и (10) могут быть использованы в эфемеридной астрономии.

4. Вычисление координат основных точек освещенной части видимых дисков планет земной группы

Рассмотрим пример определения координат основных точек освещенной части видимых дисков планет земной группы Меркурия, Венеры и Марса по их физическим эфемеридам на 0^h всемирного времени 8 января 2004 года (Глебова, 2003), приведенным в таблице 1. В этой же таблице даны видимые радиусы r и фазы k планет.

Схематические изображения видимых дисков планет на заданный момент времени, полученные с помощью одной из программ пакета (Mikhailchuk, 2001), представлены на рис. 2. Здесь же показаны проекции оси вращения каждой планеты и ее экватора на картинную плоскость. Для данного момента

Таблица 2: Планетоцентрические экваториальные координаты Земли и Солнца, вычисленные по формулам (9) и (10), а также координаты некоторых основных точек освещенной части поверхности планет, полученные в результате вычислений по формулам из работ (Михальчук, 2001; 2004)

Планета	$A_{\oplus} - A_{\odot}$	D_{\odot}	Точка C		Точка E		Точка T	
			l_0	b_0	l	b	l	b
Меркурий	+105°.32	0°.00	301°.24	-6°.75	7°.13	0°.00	277°.13	-7°.39
Венера	-50.70	+1.88	342.38	+1.52	302.24	+1.88	32.25	+0.13
Марс	-41.84	-12.38	147.17	-23.67	113.06	-12.38	208.54	-23.50

Таблица 3: Координаты некоторых основных точек освещенной части видимых дисков планет, полученные в результате вычислений по формулам (1)-(8)

Планета	Точка L		Точка M		Точка A		Точка B	
	l	b	l	b	l	b	l	b
Меркурий	352°.05	-1°.93	314°.76	-5°.87	277°.15	+82°.61	97°.15	-82°.61
Венера	262.91	+1.37	327.60	+1.75	126.21	+88.12	306.21	-88.12
Марс	69.18	+9.05	133.15	-19.97	177.46	+63.08	357.46	-63.08

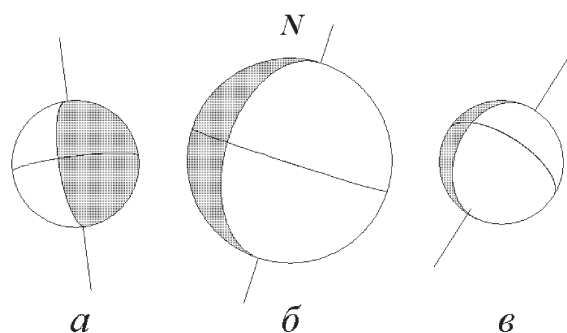


Рис. 2: Схематические изображения видимых дисков планет на 0^h UT 8 января 2004 г: *a* – Меркурия, *б* – Венеры, *в* – Марса

времени определялись: величины $A_{\oplus} - A_{\odot}$ и D_{\odot} по формулам (10) и (9) соответственно, а также планетоцентрические координаты (l_0, b_0) центра освещенной части видимых дисков планет по формулам из (Михальчук, 2001) и координаты (l, b) всех остальных точек по формулам из (Mikhailchuk, 2004) и формулам (1)-(8). Результаты вычислений приведены в таблицах 2 и 3.

Из таблиц 2 и 3 следует, что планетоцентрические координаты основных точек освещенной части видимых дисков Меркурия, Венеры и Марса, вычисленные по формулам, полученным в данной работе, полностью согласуются с их физическими

эфемеридами.

5. Заключение

Основные результаты, полученные в работе:

1. Получены формулы для определения планетоцентрических координат основных точек освещенной части видимого диска планеты.
2. Найдены выражения, связывающие планетоцентрические экваториальные координаты Солнца и Земли с углами, определяющими условия освещенности видимого диска планеты.

Литература

Абалакин В.К.: 1979 *Основы эфемеридной астрономии*. М.: Наука, 448с.
 Акимов Л.А.: 1979, *АЖ*, **56**, №2, 412-418.
 Глебова Н.И.: 2003, *Ред. Астрономический ежегодник на 2004 год*. СПб.: ИПА РАН, 728с.
 Михальчук В.В.: 2001, *Астрон. вестник*, **35**, №1, 89-96.
 Михальчук В.В.: 2004а, *Кинематика и физика небес. тел*, **20**, №1, 76-92.
 Михальчук В.В.: 2004б, *Тезисы докладов на Всероссийской Астрономической Конференции ВАК-2004 "Горизонты Вселенной"*. М.: Труды ГАИШ, **75**, 234.
 Михальчук В.В.: 2005, *Тезисы докладов Восьмого съезда Астрономического Общества и Международного симпозиума "Астрономия-2005: состояние и перспективы развития"*. М.: Труды

- ГАИШ, **78**, 13.
- Михальчук В.В.: 2007а, *Abstracts of the 7-th Gamow's Odessa Astronomical Summer School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Radioastronomy, Cosmology and Astrobiology"*, Odessa (Ukraine), 25.
- Михальчук В.В.: 2007б, *Труды Всероссийской Астрономической Конференции ВАК-2007. Изд-во Казанского гос. ун-та*, 49-51.
- Сафронов Ю.И.: 1978, *АЖ*, **55**, №1, 138-147.
- Свешников М.Л.: 1978, *Бюл. ИТА*, **14**, №5(158), 294-300.
- Свешников М.Л.: 2004, *Труды ИПА РАН*, **10**. *Эфемеридная астрономия/ Ред. А.М. Финкельштейн. СПб.: ИПА РАН*, 349-375.
- Mikhailchuk V.V.: 2001, *Odessa Astron. Publ.*, **14**, 261-264.
- Mikhailchuk V.V.: 2004, *Odessa Astron. Publ.*, **17**, 54-57.
- Mikhailchuk V.V.: 2005, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Suppl. Ser.*, **5**, 557-560.
- Toulmonde M., Chollet F.: 1994, *Astron. and Astrophys.*, **287**, No 7, 1014-1020.