

Н.В.Емельянов

**ДИНАМИКА ЕСТЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ  
НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ**

ГАИШ МГУ - 2019

## ПАРАМЕТРЫ ВРАЩЕНИЯ ПЛАНЕТ И ЕСТЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВ

### Определения

Принятые определения параметров вращения даны в Главе 9.

Параметры вращения планет и естественных спутников регулярно публикуются в докладах Рабочей группы Международного Астрономического Союза (МАС) по картографическим координатам и элементам вращения (IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements – IAU WG CCRE). Приведенные ниже параметры взяты из последнего такого доклада, содержащегося в публикации (Archinal et al. 2018). В этой публикации имеются обширные объяснения о происхождении приводимых параметров, ссылки на источники и рекомендации к формированию таких данных в будущем.

В случаях, когда возможно проследить происхождение данных, здесь ниже даются ссылки на источники. В некоторых случаях помимо данных из публикации (Archinal et al. 2018) приводятся также новые версии параметров вращения, сопровождаемые ссылками на публикацию этих новых данных.

Ниже даны экваториальные координаты  $\alpha_0, \delta_0$  северного полюса каждой планеты и спутников в системе экватора и равноденствия эпохи  $J2000$ . Даны выражения для долготы нулевого меридиана  $W$  как функции времени. Аргументами времени являются:

$T$  – интервал в юлианских столетиях (36525 суток) от стандартной эпохи  $J2000$  – 12 час. 1 января 2000 г. (JD 2451545.0) TDB,

$d$  – интервал в сутках от стандартной эпохи.

Все угловые величины измеряются в градусах. Скорости изменения углов соответствуют размерности величин  $T$  и  $d$ .

## Параметры вращения планет, имеющих естественные спутники

### Марс.

Координаты полюса Марса, рекомендованные Рабочей группой IAU WG CCRE MAC (Archinal et al. 2018), основаны на данных, опубликованных в работах Kuchynka et al. (2014), Konopliv et al. (2016). Координаты определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 317.269202 - 0.10927547 T + \\ &+ 0.000068 \sin(198.991226 + 19139.4819985 T) + \\ &+ 0.000238 \sin(226.292679 + 38280.8511281 T) + \\ &+ 0.000052 \sin(249.663391 + 57420.7251593 T) + \\ &+ 0.000009 \sin(266.183510 + 76560.6367950 T) + \\ &+ 0.419057 \sin(79.398797 + 0.5042615 T), \\ \delta_0 &= 54.432516 - 0.05827105 T + \\ &+ 0.000051 \cos(122.433576 + 19139.9407476 T) + \\ &+ 0.000141 \cos(43.058401 + 38280.8753272 T) + \\ &+ 0.000031 \cos(57.663379 + 57420.7517205 T) + \\ &+ 0.000005 \cos(79.476401 + 76560.6495004 T) + \\ &+ 1.591274 \cos(166.325722 + 0.5042615 T), \\ W &= 176.049863 + 350.891982443297 d + \\ &+ 0.000145 \sin(129.071773 + 19140.0328244 T) + \\ &+ 0.000157 \sin(36.352167 + 38281.0473591 T) + \\ &+ 0.000040 \sin(56.668646 + 57420.9295360 T) + \\ &+ 0.000001 \sin(67.364003 + 76560.2552215 T) + \\ &+ 0.000001 \sin(104.792680 + 95700.4387578 T) + \\ &+ 0.584542 \sin(95.391654 + 0.5042615 T).\end{aligned}$$

Примечание. Положение нулевого меридиана Марса опирается на координаты посадочного аппарата Viking 1, Такое определение находится в согласии с ранее заданным положением нулевого меридиана, связанным с положением кратера Airy-0.

### Юпитер.

Координаты полюса, рекомендованные Рабочей группой IAU WG CCRE MAC (Archinal et al. 2018) и взятые из публикации (Riddle, Warwick, 1976):

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 268.056595 - 0.006499 T + 0.000117 \sin Ja + 0.000938 \sin Jb + \\ &\quad + 0.001432 \sin Jc + 0.000030 \sin Jd + 0.002150 \sin Je, \\ \delta_0 &= 64.495303 + 0.002413 T + 0.000050 \cos Ja + 0.000404 \cos Jb + \\ &\quad + 0.000617 \cos Jc - 0.000013 \cos Jd + 0.000926 \cos Je \\ W &= 284.95 + 870.5360000 d.\end{aligned}$$

Здесь аргументы тригонометрических функций вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}Ja &= 99.360714 + 4850.4046 T, \quad Jb = 175.895369 + 1191.9605 T, \\ Jc &= 300.323162 + 262.5475 T, \quad Jd = 114.012305 + 6070.2476 T, \\ Je &= 49.511251 + 64.3000 T.\end{aligned}$$

Примечание. Вращение Юпитера относится к вращению его магнитного поля.

### **Сатурн.**

Координаты полюса, рекомендованные Рабочей группой IAU WG CCRE MAC (Archinal et al. 2018) и взятые из публикаций (Hubbard et al., 1993; French et al., 1993):

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 40.589 - 0.036 T, \\ \delta_0 &= 83.537 - 0.004 T, \\ W &= 38.90 + 810.7939024 d.\end{aligned}$$

Примечание. Вращение Сатурна относится к вращению его магнитного поля.

### **Уран.**

Координаты полюса, рекомендованные Рабочей группой IAU WG CCRE MAC (Archinal et al. 2018) и взятые из публикации (Mason et al., 1992):

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 257.311, \\ \delta_0 &= -15.175, \\ W &= 203.81 - 501.1600928 d.\end{aligned}$$

Примечание. Вращение Урана здесь относится к вращению его магнитного поля.

Новая модель вращения Урана опубликована в работе (Jacobson, 2014). Согласно этой модели, для  $\alpha_0$ ,  $\delta_0$  имеем следующие выражения как функции времени:

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 257.309980 + \\ &\quad + 0.000173 T + 0.000895 \sin S1 + 0.000180 \sin S2 + \\ &\quad + 0.000098 \sin S3 + 0.000075 \sin S4 - 0.000818 \sin S5, \\ \delta_0 &= -15.172395 -\end{aligned}$$

$$-0.000019 T - 0.000851 \cos S1 - 0.000173 \cos S2 - \\ -0.000094 \cos S3 - 0.000072 \cos S4 - 0.000818 \cos S5,$$

где

$$S1 = 328.616724 + 26.9601 T, \\ S2 = 259.275089 + 2024.7285 T, \\ S3 = 102.827444 + 182.8030 T, \\ S4 = 185.361668 + 276.4108 T, \\ S5 = 137.359959.$$

Здесь член с  $S5$  добавлен только для того, чтобы сделать сумму тригонометрических членов равной нулю в начальную эпоху.

### **Нептун.**

Координаты полюса, рекомендованные Рабочей группой IAU WG CCRE MAC (Archinal et al. 2018), взяты из публикаций (Jacobson, 1990; Warwick et al. 1989). При этом скорость вращения выведена в работе (Karkoschka, 2011) из наблюдений деталей на поверхности. Координаты определяются следующими выражениями:

$$\alpha_0 = 299.36 + 0.70 \sin N, \\ \delta_0 = 43.46 - 0.51 \cos N, \\ W = 249.978 + 541.1397757 d - 0.48 \sin N, \\ N = 357.85 + 52.316 T.$$

Альтернативные параметры вращения Нептуна, опубликованные в статье (Jacobson, 2009), и вариант, полученный в работе (Emelyanov, Samorodov, 2015), рассмотрены в Главе 9.

### **Плутон.**

Координаты полюса, рекомендованы Рабочей группой IAU WG CCRE MAC (Archinal et al. 2018). Здесь по правилам определения полюса малой планеты северный полюс направлен по вектору момента вращения Плутона. Нулевой меридиан Плутона определен по среднему направлению на Харон.

$$\alpha_0 = 132.993, \\ \delta_0 = -6.163, \\ W = 302.695 + 56.3625225 d.$$

**Северный полюс, связанный с неизменной плоскостью Лапласа Солнечной системы**, имеет следующие координаты (Archinal et al. 2018):

$$\alpha_0 = 273.85,$$

$$\delta_0 = 66.99.$$

### Координаты северного полюса Солнца (Archinal et al. 2018)

$$\alpha_0 = 286.13,$$

$$\delta_0 = 63.87,$$

$$W = 84.176 + 14.1844000 d.$$

Примечание. Формула для  $W$  здесь записана с учетом поправки за время распространения света (для момента старта фотонов с Солнца) и без поправки за аберрацию.

## Параметры вращения естественных спутников

Все угловые величины измеряются в градусах. Скорости изменения углов соответствуют размерности величин  $T$  и  $d$ .

### Спутники Марса.

Параметры вращения спутников рекомендованы Рабочей группой IAU WG CCRE MAC (Archinal et al. 2018) и взяты из публикации (Stark et al., 2017).

#### M1 Фобос.

$$\alpha_0 = 317.67071657 - 0.10844326 T -$$

$$-1.78428399 \sin(M1) + 0.02212824 \sin(M2) -$$

$$-0.01028251 \sin(M3) - 0.00475595 \sin(M4).$$

$$\delta_0 = 52.88627266 - 0.06134706 T -$$

$$-1.07516537 \cos(M1) + 0.00668626 \cos(M2) -$$

$$-0.00648740 \cos(M3) + 0.00281576 \cos(M4).$$

$$W = 34.9964842535 + 1128.84475928 d + 12.72192797 T^2 +$$

$$+1.42421769 \sin(M1) - 0.02273783 \sin(M2) +$$

$$+0.00410711 \sin(M3) + 0.00631964 \sin(M4) + 1.143 \sin(M5).$$

#### M2 Деймос.

$$\alpha_0 = 316.65705808 - 0.10518014 T +$$

$$+3.09217726 \sin(M6) + 0.22980637 \sin(M7) +$$

$$+0.06418655 \sin(M8) + 0.02533537 \sin(M9) + 0.00778695 \sin(M10).$$

$$\begin{aligned}
\delta_0 &= 53.50992033 - 0.05979094 T + \\
&+ 1.83936004 \cos(M6) + 0.14325320 \cos(M7) + \\
&+ 0.01911409 \cos(M8) - 0.01482590 \cos(M9) + 0.00192430 \cos(M10). \\
W &= 79.39932954 + 285.16188899 d - \\
&- 2.73954829 \sin(M6) - 0.39968606 \sin(M7) - \\
&- 0.06563259 \sin(M8) - 0.02912940 \sin(M9) + 0.01699160 \sin(M10).
\end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
M1 &= 190.72646643 + 15917.10818695 T, \\
M2 &= 21.46892470 + 31834.27934054 T, \\
M3 &= 332.86082793 + 19139.89694742 T, \\
M4 &= 394.93256437 + 38280.79631835 T, \\
M5 &= 189.63271560 + 41215158.18420050 T + 12.71192322 T^2, \\
M6 &= 121.46893664 + 660.22803474 T, \\
M7 &= 231.05028581 + 660.99123540 T, \\
M8 &= 251.37314025 + 1320.50145245 T, \\
M9 &= 217.98635955 + 38279.96125550 T, \\
M10 &= 196.19729402 + 19139.83628608 T.
\end{aligned}$$

Альтернативная модель вращения Фобоса, построенная в работе (LeMaistre et al., 2013), описывается следующими ниже формулами.

$$\begin{aligned}
\alpha_0 &= 317.65171 - 0.108 T + \\
&+ 0.325245 \cos P1_A + 1.758464 \sin P1_A + \\
&+ 3.7879 \cdot 10^{-3} \cos P2_A - 9.9870 \cdot 10^{-3} \sin P2_A + \\
&+ 8.0360 \cdot 10^{-3} \cos P3_A + 2.0727 \cdot 10^{-2} \sin P3_A - \\
&- 5.0099 \cdot 10^{-3} \cos P4_A + 1.5865 \cdot 10^{-2} \sin P4_A - \\
&- 1.3858 \cdot 10^{-2} \cos P5_A - 2.6599 \cdot 10^{-2} \sin P5_A - \\
&- 3.0986 \cdot 10^{-2} \cos P6_A - 3.4267 \cdot 10^{-3} \sin P6_A, \\
\delta_0 &= 52.875277 - 0.061 T + \\
&+ 1.059273 \cos P1_D - 0.200688 \sin P1_D - \\
&- 5.8509 \cdot 10^{-3} \cos P2_D - 3.1664 \cdot 10^{-3} \sin P2_D + \\
&+ 6.2752 \cdot 10^{-3} \cos P3_D - 2.3877 \cdot 10^{-3} \sin P3_D + \\
&+ 9.5540 \cdot 10^{-3} \cos P4_D + 3.2837 \cdot 10^{-3} \sin P4_D + \\
&+ 1.6049 \cdot 10^{-2} \cos P5_D - 8.3571 \cdot 10^{-3} \sin P5_D + \\
&+ 2.0673 \cdot 10^{-2} \cos P6_D - 1.8695 \cdot 10^{-2} \sin P6_D, \\
W &= 34.78084 + 1128.844585 d + 8.864 T^2 - \\
&- 0.260555 \cos P1_W - 1.403236 \sin P1_W -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - 8.1901 \cdot 10^{-3} \cos P2_W - 2.1305 \cdot 10^{-2} \sin P2_W + \\
& + 3.9954 \cdot 10^{-3} \cos P3_W - 1.2650 \cdot 10^{-2} \sin P3_W + \\
& + 1.1051 \cdot 10^{-2} \cos P4_W + 2.1210 \cdot 10^{-2} \sin P4_W + \\
& + 0.177178 \cos P5_W + 1.085406 \sin P5_W + \\
& + 2.4709 \cdot 10^{-2} \cos P6_W + 2.7324 \cdot 10^{-2} \sin P6_W - \\
& - 2.7638 \cdot 10^{-3} \cos P7_W - 8.2309 \cdot 10^{-3} \sin P7_W,
\end{aligned}$$

где

$$P1_A = (360.0/826.2093)d ,$$

$$P2_A = (360.0/686.9689)d ,$$

$$P3_A = (360.0/413.1034)d ,$$

$$P4_A = (360.0/0.8430)d ,$$

$$P5_A = (360.0/0.5133)d ,$$

$$P6_A = (360.0/0.2313)d ,$$

$$P1_D = (360.0/826.2098)d ,$$

$$P2_D = (360.0/686.9603)d ,$$

$$P3_D = (360.0/413.0996)d ,$$

$$P4_D = (360.0/0.8430)d ,$$

$$P5_D = (360.0/0.5133)d ,$$

$$P6_D = (360.0/0.2313)d ,$$

$$P1_W = (360.0/826.2082)d ,$$

$$P2_W = (360.0/413.1050)d ,$$

$$P3_W = (360.0/0.8430)d ,$$

$$P4_W = (360.0/0.5133)d ,$$

$$P5_W = (360.0/0.3190)d ,$$

$$P6_W = (360.0/0.2313)d ,$$

$$P7_W = (360.0/0.1595)d .$$

Новые выражения для координат полюсов спутников Марса получены и даны в публикации (Jacobson, 2017).

М1 Фобос.

$$\alpha_0 = 317.670722 - 0.1084132486 T -$$

$$-1.784328 \sin M1 + 0.022113 \sin M2,$$

$$\delta_0 = 52.886261 - 0.0613383599 T -$$

$$-1.075191 \cos M1 + 0.006656 \cos M2,$$

$$W = 35.187741 + 1128.8447592753 d + 12.722 T^2 +$$

$$+1.424227 \sin M1 - 0.022751 \sin M2.$$

М2 Деймос.



$$\alpha_0 = 316.656987 - 0.1046750020 T + \\ + 0.007782 \sin M3 + 0.025076 \sin M4 + \\ + 3.022942 \sin M5 + 0.064064 \sin M6 - \\ - 0.005241 \sin M7,$$

$$\delta_0 = 53.509843 - 0.0599874462 T + \\ + 0.001912 \cos M3 - 0.014719 \cos M4 + \\ + 1.796415 \cos M5 + 0.019065 \cos M6 + \\ + 0.003205 \cos M7,$$

$$W = 79.399489 + 285.1618889679 d + \\ + 0.016999 \sin M3 - 0.029333 \sin M4 - \\ - 2.626250 \sin M5 - 0.065368 \sin M6 - \\ - 0.184398 \sin M7.$$

Тригонометрические аргументы даны в виде

$$M1 = 190.752833 + 15917.1197346 T,$$

$$M2 = 21.510735 + 31834.5296590 T,$$

$$M3 = 196.381549 + 19139.7201379 T,$$

$$M4 = 214.896971 + 38279.9940271 T,$$

$$M5 = 125.675097 + 660.2084573 T,$$

$$M6 = 251.350194 + 1320.4169146 T,$$

$$M7 = 215.675097 + 660.2084573 T.$$

**Спутники Юпитера.** Данные взяты из отчета Рабочей группы IAU WG CCRE MAC (Archinal et al. 2018). Ниже даны также найденные ссылки на источники данных.

Галилеевы спутники (Lieske, 1979; Smith et al., 1979).

J1 Ио:

$$\alpha_0 = 268.05 - 0.009 T + 0.094 \sin J3 + 0.024 \sin J4,$$

$$\delta_0 = 64.50 + 0.003 T + 0.040 \cos J3 + 0.011 \cos J4,$$

$$W = 200.39 + 203.4889538 d - 0.085 \sin J3 - 0.022 \sin J4.$$

Примечание. Нулевой меридиан определяется направлением на планету.

J2 Европа:

$$\alpha_0 = 268.08 - 0.009 T + 1.086 \sin J4 + 0.060 \sin J5 + 0.015 \sin J6 + \\ + 0.009 \sin J7,$$

$$\delta_0 = 64.51 + 0.003 T + 0.468 \cos J4 + 0.026 \cos J5 + 0.007 \cos J6 + \\ + 0.002 \cos J7,$$

$$W = 36.022 + 101.3747235 d - 0.980 \sin J4 - 0.054 \sin J5 - 0.014 \sin J6 - \\ - 0.008 \sin J7.$$

Примечание. Меридиан 182 градуса определен кратером Cilix.

ЈЗ Ганимед:

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 268.20 - 0.009 T - 0.037 \sin J4 + 0.431 \sin J5 + 0.091 \sin J6, \\ \delta_0 &= 64.57 + 0.003 T - 0.016 \cos J4 + 0.186 \cos J5 + 0.039 \cos J6, \\ W &= 44.064 + 50.3176081 d + 0.033 \sin J4 - 0.389 \sin J5 - 0.082 \sin J6.\end{aligned}$$

Примечание. Меридиан 128 градуса определен кратером Anat.

Ј4 Каллисто:

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 268.72 - 0.009 T - 0.068 \sin J5 + 0.590 \sin J6 + 0.010 \sin J8, \\ \delta_0 &= 64.83 + 0.003 T - 0.029 \cos J5 + 0.254 \cos J6 - 0.004 \cos J8, \\ W &= 259.51 + 21.5710715 d + 0.061 \sin J5 - 0.533 \sin J6 - 0.009 \sin J8.\end{aligned}$$

Примечание 1. Меридиан 326 градуса определен кратером Saga.

Примечание 2. Новые значения  $W_0$  для спутников J2 Европа, J3 Ганимед, J4 Каллисто появились как результат вычислений новых контрольных сетей, выполненных Davies M., Colvin T.R. и Katayama F.

Ближкие спутники.

Ј16 Метида:

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 268.05 - 0.009 T, \\ \delta_0 &= 64.49 + 0.003 T, \\ W &= 346.09 + 1221.2547301 d \text{ (Lieske,1997)}.\end{aligned}$$

Ј15 Адрастея

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 268.05 - 0.009 T, \\ \delta_0 &= 64.49 + 0.003 T, \\ W &= 33.29 + 1206.9986602 d \text{ (Nicholson, Mathews, 1991)}.\end{aligned}$$

Ј5 Амальгея (Smith et al., 1979)

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 268.05 - 0.009 T - 0.84 \sin J1 + 0.01 \sin 2J1, \\ \delta_0 &= 64.49 + 0.003 T - 0.36 \cos J1, \\ W &= 231.67 + 722.6314560 d + 0.76 \sin J1 - 0.01 \sin 2J1.\end{aligned}$$

Ј14 Теба (Уточненные значения получил Nicholson P. D., Cornell University, в 1996 г)

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 268.05 - 0.009 T + 2.11 \sin J2 + 0.04 \sin 2J2, \\ \delta_0 &= 64.49 + 0.003 T - 0.91 \cos J2 + 0.01 \cos 2J2, \\ W &= 8.56 + 533.7004100 d + 1.91 \sin J2 - 0.04 \sin 2J2.\end{aligned}$$

Тригонометрические аргументы для спутников Юпитера определяются формулами

$$\begin{aligned}J1 &= 73.32 + 91472.9 T, \quad J2 = 24.62 + 45137.2 T, \quad J3 = 283.90 + 4850.7 T, \\ J4 &= 355.80 + 1191.3 T, \quad J5 = 119.90 + 262.1 T, \quad J6 = 229.80 + 64.3 T, \\ J7 &= 352.25 + 2382.6 T, \quad J8 = 113.35 + 6070.0 T.\end{aligned}$$

**Спутники Сатурна.** Данные взяты из отчета Рабочей группы МАС IAU WG CCRE (Archinal et al. 2018). Ниже даны также ссылки на источники данных.

Главные спутники (Roatsch et al., 2009).

S1 Мимас:  $\alpha_0 = 40.66 - 0.036 T + 13.56 \sin S3$ ,  
 $\delta_0 = 83.52 - 0.004 T - 1.53 \cos S3$ ,  
 $W = 333.46 + 381.9945550 d - 13.48 \sin S3 - 44.85 \sin S5$ .

Примечание. Меридиан 162 градуса задает кратер Palomides.

S2 Энцелад:  $\alpha_0 = 40.66 - 0.036 T$ ,  
 $\delta_0 = 83.52 - 0.004 T$ ,  
 $W = 6.32 + 262.7318996 d$ .

Примечание. Меридиан 5 градусов задает кратер Salih.

S3 Тефия:  $\alpha_0 = 40.66 - 0.036 T + 9.66 \sin S4$ ,  
 $\delta_0 = 83.52 - 0.004 T - 1.09 \cos S4$ ,  
 $W = 8.95 + 190.6979085 d - 9.60 \sin S4 + 2.23 \sin S5$ .

Примечание. Меридиан 299 градусов задает кратер Arete.

S4 Диона:  $\alpha_0 = 40.66 - 0.036 T$ ,  
 $\delta_0 = 83.52 - 0.004 T$ ,  
 $W = 357.6 + 131.534931 d$ .

Примечание. Меридиан 63 градусов задает кратер Palinurus.

S5 Рея:  $\alpha_0 = 40.38 - 0.036 T + 3.10 \sin S6$ ,  
 $\delta_0 = 83.55 - 0.004 T - 0.35 \cos S6$ ,  
 $W = 235.16 + 79.6900478 d - 3.08 \sin S6$ .

Примечание. Меридиан 340 градусов задает кратер Tore.

S6 Титан: (Stiles et al., 2008; Lorenz et al., 2008; Stiles et al., 2010)  
 $\alpha_0 = 39.4827$ ,  
 $\delta_0 = 83.4279$ ,  
 $W = 186.5855 + 22.5769768 d$ .

S8 Япет (Davies, Katayama, 1984):  
 $\alpha_0 = 318.16 - 3.949 T$ ,  
 $\delta_0 = 75.03 - 1.143 T$ ,  
 $W = 355.2 + 4.5379572 d$ .

Примечание. Меридиан 276 градусов задает кратер Almeric.

Параметры вращения главного спутника Сатурна S7 Гиперион не приводятся, так как он имеет хаотическое вращение.

Близкие спутники (Thomas et al., 1983).

S10 Янус:  $\alpha_0 = 40.58 - 0.036 T - 1.623 \sin S2 + 0.023 \sin 2S2$ ,  
 $\delta_0 = 83.52 - 0.004 T - 0.183 \cos S2 + 0.001 \cos 2S2$ ,  
 $W = 58.83 + 518.2359876 d + 1.613 \sin S2 - 0.023 \sin 2S2$ .

S11 Эпиметей:  $\alpha_0 = 40.58 - 0.036 T - 3.153 \sin S1 + 0.086 \sin 2S1$ ,  
 $\delta_0 = 83.52 - 0.004 T - 0.356 \cos S1 + 0.005 \cos 2S1$ ,  
 $W = 293.87 + 518.4907239 d + 3.133 \sin S1 - 0.086 \sin 2S1$ .

S15 Атлас:  $\alpha_0 = 40.58 - 0.036 T$ ,  
 $\delta_0 = 83.53 - 0.004 T$ ,  
 $W = 137.88 + 598.3060000 d$ .

S16 Прометей:  $\alpha_0 = 40.58 - 0.036 T$ ,  
 $\delta_0 = 83.53 - 0.004 T$ ,  
 $W = 296.14 + 587.289000 d$ .

S17 Пандора:  $\alpha_0 = 40.58 - 0.036 T$ ,  
 $\delta_0 = 83.53 - 0.004 T$ ,  
 $W = 162.92 + 572.7891000 d$ .

S18 Пан (Showalter, 1991):

$\alpha_0 = 40.6 - 0.036 T$ ,  
 $\delta_0 = 83.5 - 0.004 T$ ,  
 $W = 48.8 + 626.0440000 d$ .

Соорбитальные спутники. Данные о вращении основаны на орбитальных параметрах спутников (Synnot et al., 1983).

S12 Елена:  $\alpha_0 = 40.85 - 0.036 T$ ,  
 $\delta_0 = 83.34 - 0.004 T$ ,  
 $W = 245.12 + 131.6174056 d$ .

S13 Телесто:  $\alpha_0 = 50.51 - 0.036 T$ ,  
 $\delta_0 = 84.06 - 0.004 T$ ,  
 $W = 56.88 + 190.6979332 d$ .

S14 Калипсо:  $\alpha_0 = 36.41 - 0.036 T$ ,  
 $\delta_0 = 85.04 - 0.004 T$ ,  
 $W = 153.51 + 190.6742373 d$ .

Далекий спутник S9 Феба (Colvin et al., 1989):

$\alpha_0 = 356.90$ ,  
 $\delta_0 = 77.80$ ,  
 $W = 178.58 + 931.639 d$ .

Тригонометрические аргументы для спутников Сатурна определяются формулами:

$$\begin{aligned}
S1 &= 353.32 + 75706.7 T, \quad S2 = 28.72 + 75706.7 T, \\
S3 &= 177.40 - 36505.5 T, \\
S4 &= 300.00 - 7225.9 T, \quad S5 = 316.45 + 506.2 T, \quad S6 = 345.20 - 1016.3 T.
\end{aligned}$$

**Спутники Урана.** Данные рекомендованы Рабочей группой МАС IAU WG CCRE (Archinal et al. 2018). Взяты из публикаций (Jacobson, 1985a; Jacobson, 1985b).

Главные спутники.

$$\begin{aligned}
\text{U1 Ариэль: } \alpha_0 &= 257.43 + 0.29 \sin U13, \\
\delta_0 &= -15.10 + 0.28 \cos U13, \\
W &= 156.22 - 142.8356681 d + 0.05 \sin U12 + 0.08 \sin U13.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{U2 Умбриэль: } \alpha_0 &= 257.43 + 0.21 \sin U14, \\
\delta_0 &= -15.10 + 0.20 \cos U14, \\
W &= 108.05 - 86.8688923 d - 0.09 \sin U12 + 0.06 \sin U14.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{U3 Титания: } \alpha_0 &= 257.43 + 0.29 \sin U15, \\
\delta_0 &= -15.10 + 0.28 \cos U15, \\
W &= 77.74 - 41.3514316 d + 0.08 \sin U15.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{U4 Оберон: } \alpha_0 &= 257.43 + 0.16 \sin U16, \\
\delta_0 &= -15.10 + 0.16 \cos U16, \\
W &= 6.77 - 26.7394932 d + 0.04 \sin U16.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{U5 Миранда: } \alpha_0 &= 257.43 + 4.41 \sin U11 - 0.04 \sin 2U11, \\
\delta_0 &= -15.08 + 4.25 \cos U11 - 0.02 \cos 2U11, \\
W &= 30.70 - 254.6906892 d - 1.27 \sin U12 + 0.15 \sin 2U12.
\end{aligned}$$

Ближние спутники.

$$\begin{aligned}
\text{U6 Корделия: } \alpha_0 &= 257.31 - 0.15 \sin U1, \\
\delta_0 &= -15.18 + 0.14 \cos U1, \\
W &= 127.69 - 1074.5205730 d - 0.04 \sin U1.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{U7 Офелия: } \alpha_0 &= 257.31 - 0.09 \sin U2, \\
\delta_0 &= -15.18 + 0.09 \cos U2, \\
W &= 130.35 - 956.4068150 d - 0.03 \sin U2.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{U8 Бьянка: } \alpha_0 &= 257.31 - 0.16 \sin U3, \\
\delta_0 &= -15.18 + 0.16 \cos U3, \\
W &= 105.46 - 828.3914760 d - 0.04 \sin U3.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{U9 Крессида: } \alpha_0 &= 257.31 - 0.04 \sin U4, \\
\delta_0 &= -15.18 + 0.04 \cos U4, \\
W &= 59.16 - 776.5816320 d - 0.01 \sin U4.
\end{aligned}$$

- U10 Дездемона:  $\alpha_0 = 257.31 - 0.17 \sin U5$ ,  
 $\delta_0 = -15.18 + 0.16 \cos U5$ ,  
 $W = 95.08 - 760.0531690 d - 0.04 \sin U5$ .
- U11 Джульетта:  $\alpha_0 = 257.31 - 0.06 \sin U6$ ,  
 $\delta_0 = -15.18 + 0.06 \cos U6$ ,  
 $W = 302.56 - 730.1253660 d - 0.02 \sin U6$ .
- U12 Порция:  $\alpha_0 = 257.31 - 0.09 \sin U7$ ,  
 $\delta_0 = -15.18 + 0.09 \cos U7$ ,  
 $W = 25.03 - 701.4865870 d - 0.02 \sin U7$ .
- U13 Розалинда:  $\alpha_0 = 257.31 - 0.29 \sin U8$ ,  
 $\delta_0 = -15.18 + 0.28 \cos U8$ ,  
 $W = 314.90 - 644.6311260 d - 0.08 \sin U8$ .
- U14 Белинда:  $\alpha_0 = 257.31 - 0.03 \sin U9$ ,  
 $\delta_0 = -15.18 + 0.03 \cos U9$ ,  
 $W = 297.46 - 577.3628170 d - 0.01 \sin U9$ .
- U14 Пак:  $\alpha_0 = 257.31 - 0.33 \sin U10$ ,  
 $\delta_0 = -15.18 + 0.31 \cos U10$ ,  
 $W = 91.24 - 472.5450690 d - 0.09 \sin U10$ .

Тригонометрические аргументы для спутников Урана определяются формулами:

$$\begin{aligned}
 U1 &= 115.75 + 54991.87 T, U2 = 141.69 + 41887.66 T, \\
 U3 &= 135.03 + 29927.35 T, \\
 U4 &= 61.77 + 25733.59 T, U5 = 249.32 + 24471.46 T, \\
 U6 &= 43.86 + 22278.41 T, \\
 U7 &= 77.66 + 20289.42 T, U8 = 157.36 + 16652.76 T, \\
 U9 &= 101.81 + 1872.63 T, \\
 U10 &= 138.64 + 8061.81 T, U11 = 102.23 - 2024.22 T, \\
 U12 &= 316.41 + 2863.96 T, \\
 U13 &= 304.01 - 51.94 T, U14 = 308.71 - 93.17 T, \\
 U15 &= 340.82 - 75.32 T, U16 = 259.14 - 504.81 T.
 \end{aligned}$$

**Спутники Нептуна.** Данные рекомендованы Рабочей группой МАС IAU WG CCRE (Archinal et al. 2018).

N1 Тритон (Параметры вывел J. Lieske на основе орбитальных данных, полученных в работе (Jacobson, 1990)).

$$\begin{aligned}
 \alpha_0 &= 299.36 - 32.35 \sin N7 - 6.28 \sin 2N7 - 2.08 \sin 3N7 - \\
 &\quad - 0.74 \sin 4N7 - 0.28 \sin 5N7 - 0.11 \sin 6N7 - \\
 &\quad - 0.07 \sin 7N7 - 0.02 \sin 8N7 - 0.01 \sin 9N7,
 \end{aligned}$$

$$\delta_0 = 41.17 + 22.55 \cos N7 + 2.10 \cos 2N7 + 0.55 \cos 3N7 + \\ + 0.16 \cos 4N7 + 0.05 \cos 5N7 + 0.02 \cos 6N7 + \\ + 0.01 \cos 7N7,$$

$$W = 296.53 - 61.2572637 d + 22.25 \sin N7 + 6.73 \sin 2N7 + \\ + 2.05 \sin 3N7 + 0.74 \sin 4N7 + 0.28 \sin 5N7 + \\ + 0.11 \sin 6N7 + 0.05 \sin 7N7 + 0.02 \sin 8N7 + \\ + 0.01 \sin 9N7.$$

Ближние спутники (Owen et al., 1991).

N3 Наяда:  $\alpha_0 = 299.36 + 0.70 \sin N - 6.49 \sin N1 + 0.25 \sin 2N1,$   
 $\delta_0 = 43.36 - 0.51 \cos N - 4.75 \cos N1 + 0.09 \cos 2N1,$   
 $W = 254.06 + 1222.8441209 d -$   
 $-0.48 \sin N + 4.40 \sin N1 - 0.27 \sin 2N1.$

N4 Таласса:  $\alpha_0 = 299.36 + 0.70 \sin N - 0.28 \sin N2,$   
 $\delta_0 = 43.45 - 0.51 \cos N - 0.21 \cos N2,$   
 $W = 102.06 + 1155.7555612 d - 0.48 \sin N + 0.19 \sin N2.$

N5 Деспина:  $\alpha_0 = 299.36 + 0.70 \sin N - 0.09 \sin N3,$   
 $\delta_0 = 43.45 - 0.51 \cos N - 0.07 \cos N3,$   
 $W = 306.51 + 1075.7341562 d - 0.49 \sin N + 0.06 \sin N3.$

N6 Галатей:  $\alpha_0 = 299.36 + 0.70 \sin N - 0.07 \sin N4,$   
 $\delta_0 = 43.43 - 0.51 \cos N - 0.05 \cos N4,$   
 $W = 258.09 + 839.6597686 d - 0.48 \sin N + 0.05 \sin N4.$

N7 Ларисса:  $\alpha_0 = 299.36 + 0.70 \sin N - 0.27 \sin N5,$   
 $\delta_0 = 43.41 - 0.51 \cos N - 0.20 \cos N5,$   
 $W = 179.41 + 649.0534470 d - 0.48 \sin N + 0.19 \sin N5.$

N8 Протей:  $\alpha_0 = 299.27 + 0.70 \sin N - 0.05 \sin N6,$   
 $\delta_0 = 42.91 - 0.51 \cos N - 0.04 \cos N6,$   
 $W = 93.38 + 320.7654228 d - 0.48 \sin N + 0.04 \sin N6.$

Тригонометрические аргументы для спутников Нептуна определяются формулами:

$$N = 357.85 + 52.316 T, N1 = 323.92 + 62606.6 T, \\ N2 = 220.51 + 55064.2 T, N3 = 354.27 + 46564.5 T, \\ N4 = 75.31 + 26109.4 T, N5 = 35.36 + 14325.4 T, \\ N6 = 142.61 + 2824.6 T, N7 = 177.85 + 52.316 T.$$

Примечание. Параметры вращения далекого спутника Нептуна N2 Нереида в публикации (Archinal et al., 2018) не приводятся, так как пока нет подходящей модели его вращения.

**Спутник Плутона Харон.** Данные рекомендованы Рабочей группой МАС IAU WG CCRE (Archinal et al. 2018). Здесь северным полюсом спутника считается направление его момента количества движения. Положение нулевого меридиана определяется направлением на Плутон.

$$\alpha_0 = 132.993,$$

$$\delta_0 = -6.163,$$

$$W = 122.695 + 56.3625225 d.$$

**Спутники Плутона Р2 Никта, Р3 Гидра, Р4 Керберос, Р5 Стикс** ( $\dot{W}$  – угловая скорость вращения). Данные взяты из публикации (Weaver et al., 2016). Обозначение  $\dot{W}$  использовано для скорости изменения  $W$ .

$$\text{Р2 Никта: } \alpha_0 = 350, \delta_0 = 42, \dot{W} = 196.83 \text{ град/сут,}$$

$$\text{Р3 Гидра: } \alpha_0 = 257, \delta_0 = -24, \dot{W} = 838.18 \text{ град/сут,}$$

$$\text{Р4 Цербер: } \alpha_0 = 222, \delta_0 = 72, \dot{W} = 67.80 \text{ град/сут,}$$

$$\text{Р5 Стикс: } \alpha_0 = 196, \delta_0 = 61, \dot{W} = 111.11 \text{ град/сут.}$$

## Литература к Приложению 6

*Archinal B. A., Acton C. H., A'hearn M. F., Conrad A., Consolmagno G. J., Duxbury T., Hestroffer D., Hilton J. L., Kirk R. L., Klioner S. A., McCarthy D., Meech K., Oberst J., Ping J., Seidelmann P. K., Tholen D. J., Thomas P. C., Williams I. P.* Report of the IAU Working Group on cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2015. *Celestial Mechanics and Dynamic Astronomy*. 2018. 130:22.

*Colvin T. R., Davies M. E., Rogers, P. G.* Phoebe: A Control Network and Rotational Elements. *Bulletin of the American Astronomical Society*. 1989. V. 21. P. 987.

*Davies M. E., Katayama F. Y.* The control network of Iapetus. *Icarus*. 1984. V. 59. P. 199–204.

*Duxbury T. C., Callahan J. D.* PHOBOS and Deimos control networks. *Icarus*. 1989. V. 77. P. 275–286.

*Emelyanov N. V., Samorodov M. Yu.* Analytical theory of motion and new ephemeris of Triton from observations. *Monthly Notices*



of the Royal Astronomical Society. 2015. V. 454. P. 2205–2215.

*Folkner W. M., Yoder C. F., Yuan D. N., Standish E. M., Preston R. A.* Interior structure and seasonal mass redistribution of Mars from radio tracking of Mars pathfinder. *Science*. 1997. V. 278. P. 1749–1752.

*French R. G., Nicholson P. D., Cooke M. L., Elliot J. L., Matthews K., Perkovic O., Tollestrup E., Harvey P., Chanover N. J., Clark M. A., Dunham E. W., Forrest W., Harrington J., Pipher J., Brahic A., Grenier I., Roques F., Arndt M.* Geometry of the Saturn system from the 3 July 1989 occultation of 28 SGR and Voyager observations. *Icarus*. 1993. V. 103. P. 163–214.

*Jacobson R. A.* Direction of the North Pole of the Uranian Satellites in the IAU J2000 System. Interoffice Memorandum 314.10-520. 1985a. Jet propulsion Laboratory.

*Jacobson R. A.* The Prime Meridians of the Uranian Satellites. Interoffice Memorandum 314.10-555. 1985b. Jet propulsion Laboratory.

*Jacobson R. A.* Ephemerides of the Neptunian Satellites. Interoffice Memorandum 314.6-1145. 1990. Jet Propulsion Laboratory.

*Jacobson R. A.* The orbits of the neptunian satellites and the orientation of the pole of Neptune. *Astronomical Journal*. 2009. V. 137. P. 4322–4329.

*Jacobson R. A.* The orbits of the uranian satellites and rings, the gravity field of the uranian system, and the orientation of the pole of Uranus. *Astronomical Journal*. 2014. 148:76 (13pp).

*Jacobson R. A.* The Orientations of the Martian Satellites from a Fit to Ephemeris MAR097. Jet Propulsion Laboratory. Interoffice Memorandum 392R-17-004. April 20, 2017.

*Hubbard W. B., Porco C. C., Hunten D. M., Rieke G. H., Rieke M. J., McCarthy D. W., Haemmerle V., Clark R., Turtle E. P., Haller J., McLeod B., Lebofsky L. A., Marcialis R., Holberg J. B., Landau R., Carrasco L., Elias J., Buie M. W., Persson S. E., Boroson T., West S., Mink D. J.* The occultation of 28 SGR by Saturn - Saturn pole position and astrometry. *Icarus*. 1993. V. 103. P. 215–234.

- Karkoschka E.* Neptune's rotational period suggested by the extraordinary stability of two features. *Icarus*. 2011. V. 215. P. 439–448.
- Konopliv A. S., Park R. S., Folkner W. M.* An improved JPL Mars Gravity Field and Orientation from Mars Orbiter and Lander Tracking Data. *Icarus*. 2016. V. 274. P. 253–260.
- Kuchynka P., Folkner W. M., Konopliv A. S., Parker T. J., Park R. S., Le Maistre S., Dehant V.* New constraints on Mars rotation determined from radiometric tracking of the Opportunity Mars Exploration Rover. *Icarus*. 2014. V. 229. P. 340–347.
- LeMaistre S., Rosenblatt P., Rambaux N., Castillo-Rogez J. C., Dehant V., Marty J.-C.* Phobos interior from librations determination using Doppler and star tracker measurements. *Planetary and Space Science*. 2013. V. 85. P. 106–122.
- Lieske J. H.* Poles of the Galilean satellites. *Astronomy and Astrophysics*. 1979. V. 75. No. 1–2. P. 158–163.
- Lieske J. H.* Revised rotation angle for Jupiter satellite 516 Metis. JPL Interoffice Memorandum 312, F-97-059. 1997.
- Mason E. C., French R. G., Buie M. W.* Uranus Pole and Ring Orbits from 1977-1991 Stellar Occultation and Voyager 2 Observations. American Astronomical Society, 24th DPS Meeting, id.42.15-P. Bulletin of the American Astronomical Society. 1992. V. 24. P. 1031–1031.
- Nicholson P.D., Matthews K.* Near-infrared observations of the Jovian ring and small satellites. *Icarus*. 1991. V. 93. P. 331–346.
- Owen Jr. W. M., Vaughan R. M., Synnott S. P.* Orbits of the Six New Satellites of Neptune. *Astronomical Journal*. 1991. V. 101. P. 1511–1515.
- Riddle A. C., Warwick J. W.* Redefinition of System III longitude. *Icarus*. 1976. V. 27. P. 457–459.
- Roatsch Th., Jaumann R., Stephan K., Thomas P.C.* Cartographic mapping of the Icy satellites using ISS and VIMS data. In: Dougherty, et al. (eds.) *Saturn from Cassini-Huygens*. Springer, Berlin (2009). doi:10.1007/978-1-4020-9215-2.
- Showalter M. R.* Visual detection of 1981S13, Saturn's eighteenth satellite, and its role in the Encke gap. *Nature*. 1991. V. 351. P. 709–713.

- Smith B. A., Soderblom L. A., Beebe R., Boyce J., Briggs G., Carr M., Collins S. A., Johnson T. V., Cook A. F., Danielson G. E., Morrison D.* The Galilean satellites and Jupiter – Voyager 2 imaging science results. *Science*. 1979. V. 206. P. 927-950.
- Stark A., Willner K., Burmeister S., Oberst J.* Geodetic framework for martian satellite exploration I: reference rotation models. *European Planetary Science Conference*. 2017. V. 11. EPSC2017-868-1.
- Stiles B.W., Kirk R.L., Lorenz R.D., Hensley S., Lee E., Ostro S.J., Allison M.D., Callahan P.S., Gim Y., Ies, L., Percidel Marmo P., Hamilton G., Johnson W.T.K., West R.D.* The Cassini RADAR Team: Determining Titan's spin state from Cassini RADAR images. *Astronomical Journal*. 2008. V. 135. P. 1669–1680.
- Stiles, B.W., Kirk R.L., Lorenz R.D., Hensley S., Lee E., Ostro S.J., Allison M.D., Callahan P.S., Gim Y., Iess L., Percidel Marmo P., Hamilton G., Johnson W.T.K., West R.D.* The Cassini RADAR Team: ERRATUM: Determining Titan's Spin State from Cassini RADAR Images. *Astronomical Journal*. 2010. V. 139. P. 311.
- Synnott S. P., Terrile R.J., Jacobson R. A., Smith B. A.* Orbits of Saturn's F ring and its shepherding satellites. *Icarus*. 1983. V. 53. P. 156–158.
- Thomas P., Veverka J., Morrison D., Davies M., Johnson, T. V.* Saturn's small satellites – Voyager imaging results. *Journal of Geophysical Research*. 1983. V. 88. P. 8743–8754.
- Warwick J. W., Evans D. R., Peltzer G. R., Peltzer R. G., Romig J. H., Sawyer C. B., Riddle A. C., Schweitzer A. E., Desch M. D., Kaiser M. L.* Voyager planetary radio astronomy at Neptune. *Science*. 1989. V. 246. P. 1498–1501.
- Weaver H. A., Buie M. W., Buratti B.J., Grundy W. M., Lauer T. R., Olkin C. B., Parker A. H., Porter S. B. and 43 co-authors.* The small satellites of Pluto as observed by New Horizons. *Science*. 2016. V. 351. Issue 6279. Id. aae0030.