

УДК 521.19

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ВРАЩЕНИЕ СПУТНИКОВ НЕПТУНА

© 2022 г. А. Н. Вершков^a, *, В. В. Пашкевич^a

^aГлавная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: avershkov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.11.2021 г.

После доработки 25.11.2021 г.

Принята к публикации 26.12.2021 г.

В работе рассмотрены наиболее существенные релятивистские эффекты во вращательной динамике спутников Нептуна (Тритон (N1), Наяда (N3), Таласса (N4), Деспина (N5), Галатея (N6), Ларисса (N7) и Протей (N8)). Впервые определены наиболее существенные вековые и периодические члены геодезического вращения Тритона и шести внутренних спутников Нептуна в углах их вращения относительно неподвижного экватора Земли эпохи J2000.0, определенного в международной системе координат (ICRF), и точки весеннего равноденствия эпохи J2000.0 и в углах Эйлера относительно их собственных систем координат. Исследование показало, что величина геодезического вращения может быть существенной не только у тел, которые вращаются вокруг сверхмассивных центральных тел, но и у близких спутников планет-гигантов. Полученные значения геодезического вращения для исследуемой системы спутников могут быть использованы для численного исследования их вращения в релятивистском приближении, а также использованы для оценки влияния релятивистских эффектов на орбитально-вращательную динамику подобных небесных тел экзопланетных систем.

Ключевые слова: спутники Нептуна, Тритон, Наяда, Таласса, Деспина, Галатея, Ларисса, Протей, релятивистское вращение, геодезическая прецессия, геодезическая нутация, тела экзопланетных систем

DOI: 10.31857/S0320930X22050073

ВВЕДЕНИЕ

Как и другие газовые гиганты, Нептун имеет большое семейство спутников. Тритон, самый большой спутник Нептуна, был открыт Ласселом в 1846 г., в год открытия самого Нептуна. Нереида была открыта Койпером в 1949 г. Шесть внутренних спутников были обнаружены в 1989 г. во время пролета Voyager-2 (Smith и др., 1989). Орбита Тритона круговая, наклонная и ретроградная, а шесть внутренних спутников имеют нормальные, почти круговые орбиты, лежащие в экваториальной плоскости Нептуна (за исключением Наяды, которая наклонена почти на 5°).

В порядке удаления от Нептуна регулярные спутники — это Наяда, Таласса, Деспина, Галатея, Ларисса, Гиппокамп и Протей. Наяда, ближайшая регулярная луна, также является второй по величине среди внутренних спутников (после открытия Гиппокампа), в то время как Протей — самая большая регулярная луна и вторая по величине луна Нептуна. Первые пять спутников дви-

жутся по орбитам, опережая вращение Нептуна, и величины их орбитальных периодов находятся в пределах от ~ 7 ч для Наяды и Талассы до ~ 13 ч для Лариссы.

Цель данного исследования — определение наиболее существенных вековых и периодических членов геодезического вращения Тритона и шести внутренних спутников Нептуна. Полученные данные могут быть в дальнейшем использованы для численного исследования их вращения в релятивистском приближении.

Современные исследования, связанные с поиском более подходящих условий для существования жизни в экзопланетных системах, привлекли особое внимание к проблеме поиска спутников экзопланет (Fox, Wiegert, 2021). Эти системы экзопланет могут быть схожи по своей динамике со спутниковыми системами планет-гигантов в Солнечной системе. Исследования вращательной динамики в релятивистском приближении для ряда спутников Юпитера (Biscani, Carloni, 2015; Pashkev-

ich, Vershkov, 2020; Пашкевич и др., 2021) показали, что релятивистские эффекты во вращательной динамике существенны для многих экзолун. Таким образом, результаты настоящего исследования могут быть применены для построения моделей их вращательного движения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Проблема геодезического (релятивистского) вращения исследуемых тел изучалась относительно их собственной системы координат, описанной в (Archinal и др., 2018). Вычисление скоростей геодезической прецессии каждого исследуемого тела проводилось с использованием данных о положениях, скоростях и элементах орбит тел Солнечной системы, взятых из эфемерид. В качестве эфемерид для основных возмущающих тел (Солнца, Луны и планет) Солнечной системы использовались фундаментальные эфемериды JPL DE431/LE431 (Folkner и др., 2014). Для других исследуемых и возмущающих тел Солнечной системы с известными параметрами вращения (Archinal и др., 2018) выборки данных формировались из эфемерид Horizons On-Line Ephemeris System (Giorgini и др., 2001). Где $\Delta x = x_r - x$ ($x = \psi, \theta, \varphi, \alpha_0, \delta_0, W$) является разностью релятивистских и ньютоновых углов Эйлера исследуемого тела, соответственно.

Вековые, периодические и смешанные члены геодезического вращения тела представлены в следующем виде (Пашкевич, Вершков, 2019):

$$\Delta x = \Delta x_I + \Delta x_{II} = \sum_{n=1}^N \Delta x_n t^n + \sum_j \sum_{k=0}^M (\Delta x_{Cjk} \cos(v_{j0} + v_{jl}t) + \Delta x_{Sjk} \sin(v_{j0} + v_{jl}t)) t^k,$$

где $x = \psi, \theta, \varphi, \alpha_0, \delta_0, W$.

Далее математическая модель задачи полностью совпадает с аналогичными моделями, подробно описанными в наших предыдущих работах (Пашкевич, 2016; Пашкевич, Вершков, 2019; Pashkevich, Vershkov, 2020; Пашкевич и др., 2021).

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВО ВРАЩЕНИИ СПУТНИКОВ

Изучалось геодезическое вращение спутников Нептуна с известными параметрами собственного вращения (Archinal и др., 2018): Тритон (N1), Наяда (N3), Таласса (N4), Деспина (N5), Галатея

(N6), Ларисса (N7) и Протей (N8). Все эти спутники находятся в режиме синхронного вращения.

Вычисления проводились с помощью метода для изучения геодезического вращения любых тел Солнечной системы (Пашкевич, 2016), имеющих долгосрочные эфемериды. Положения, скорости и орбитальные элементы были взяты из Horizons On-Line Ephemeris System (Giorgini и др., 2001) на всех интервалах времени существования эфемерид. Интервал исследования для Тритона составлял 1000 лет, с 1600 по 2600 год, а для остальных спутников — 100 лет, с 1950 по 2050 год.

В табл. 1–3 представлены вычисленные значения вековых (Pashkevich, Vershkov, 2022), периодических и смешанных членов геодезического вращения спутников Нептуна.

В табл. 1: t — динамическое барицентрическое время (Dynamical Barycentric Time) (TDB) измеряется в юлианских тысячелетиях (tjy) (365250 суток) от эпохи J2000; a — большая полуось орбиты; $\Omega_{L81}, \Omega_{L83}, \Omega_{L84}, \Omega_{L85}, \Omega_{L86}, \Omega_{L87}, \Omega_{L88}$ — долготы восходящих узлов орбит спутников Нептуна на плоскости Лапласа; λ_8 — средняя долгота Нептуна; $\lambda_{81}, \lambda_{83}, \lambda_{84}, \lambda_{85}, \lambda_{86}, \lambda_{87}, \lambda_{88}$ — средние нептуноцентрические долготы Тритона, Наяды, Талассы, Деспины, Галатеи, Лариссы и Протея, соответственно. Средняя долгота Нептуна взята из работы (Brumberg, Bretagnon, 2000). Средние долготы и долготы восходящих узлов спутников Нептуна взяты из статьи (Archinal и др., 2018).

В табл. 2–3: T — динамическое барицентрическое время (Dynamical Barycentric Time) (TDB) измеряется в юлианских столетиях (cju) (36525 дней) от эпохи J2000; d — динамическое барицентрическое время (Dynamical Barycentric Time) (TDB) измеряется в юлианских днях (jd) от эпохи J2000; все величины углов ($\alpha_0, \Delta\alpha_0, \delta_0, \Delta\delta_0, W, \Delta W$) приведены в градусах; $N = 357^\circ.85 + 52^\circ.316T$, $N1 = \Omega_{L83} = 323^\circ.92 + 62606^\circ.6T$,

$N2 = \Omega_{L84} = 220^\circ.51 + 55064^\circ.2T$, $N3 = \Omega_{L85} = 354^\circ.27 + 46564^\circ.5T$, $N4 = \Omega_{L86} = 75^\circ.31 + 26109^\circ.4T$, $N5 = \Omega_{L87} = 35^\circ.36 + 14325^\circ.4T$, $N6 = \Omega_{L88} = 142^\circ.61 + 2824^\circ.6T$, $N7 = \Omega_{L81} = 177^\circ.85 + 52^\circ.316T$, $N8 = \lambda_{81} - \lambda_8 = -7^\circ.82 - 2237640^\circ.04T$, $N9 = \lambda_{81} + \lambda_8 = 240^\circ.88 - 2237203^\circ.07T$,

$N10 = \lambda_{83} - \lambda_8 = -50^\circ.29 + 44664163^\circ.03T$, $N11 = \lambda_{83} + \lambda_8 = 198^\circ.41 + 44664600^\circ.00T$,

$N12 = \lambda_{84} - \lambda_8 = -202^\circ.29 + 42213753^\circ.39T$, $N13 = \lambda_{84} + \lambda_8 = 46^\circ.41 + 42214190^\circ.36T$,

$N14 = \lambda_{85} - \lambda_8 = 2^\circ.16 + 39290971^\circ.57T$, $N15 = \lambda_{85} + \lambda_8 = 250^\circ.86 + 39291408^\circ.54T$,

Таблица 1. Периодические и смешанные члены геодезического вращения спутников Нептуна, вычисленные для углов Эйлера

Спутник	Угол	Период	Аргумент	Коэффициент при $\sin(\text{Аргумент})$ (угл. с $\times 10^{-6}$)	Коэффициент при $\cos(\text{Аргумент})$ (угл. с $\times 10^{-6}$)
Тритон (N1) $a = 354759$ км	$\Delta\psi_{II}$	688.13 лет	Ω_{L81}	$812876.26 + 23085.03t$	$-422259.36 + 36686.46t$
		344.06 лет	$2\Omega_{L81}$	$-31627.39 + 92244.52t$	$-26921.85 - 1248.50t$
		229.38 лет	$3\Omega_{L81}$	$-10449.74 - 29677.96t$	$-29755.46 + 25123.25t$
		5.8763 сут	$\lambda_{81} - \lambda_8$	$33.04 - 0.50t$	$16.36 + 0.68t$
		5.8774 сут	$\lambda_{81} + \lambda_8$	$-1.96 - 1.81t$	$1.46 - 3.43t$
	$\Delta\theta_{II}$	688.13 лет	Ω_{L81}	$136825.41 + 5879.52t$	$104937.70 - 95586.56t$
		344.06 лет	$2\Omega_{L81}$	$21674.15 + 24854.02t$	$60591.78 - 2415.22t$
		229.38 лет	$3\Omega_{L81}$	$-3056.44 + 2413.24t$	$29319.45 + 8404.49t$
		5.8763 сут	$\lambda_{81} - \lambda_8$	$-1.93 - 0.16t$	$5.80 + 0.61t$
		5.8774 сут	$\lambda_{81} + \lambda_8$	$2.20 - 1.37t$	$1.76 + 0.12t$
	$\Delta\phi_{II}$	688.13 лет	Ω_{L81}	$95525.29 + 1242.62t$	$64439.69 - 89268.57t$
		344.06 лет	$2\Omega_{L81}$	$19615.16 + 31178.48t$	$40590.84 - 10345.44t$
		229.38 лет	$3\Omega_{L81}$	$4272.72 + 14224.91t$	$23576.84 + 3539.02t$
		5.8763 сут	$\lambda_{81} - \lambda_8$	$-12.34 + 0.43t$	$-6.10 - 1.32t$
		5.8774 сут	$\lambda_{81} + \lambda_8$	$3.29 + 1.18t$	$-3.40 + 3.86t$
Наяда (N3) $a = 48227$ км	$\Delta\psi_{II}$	210.0258 сут	Ω_{L83}	$25219.47 - 35375.99t$	$11939.86 + 95677.93t$
		7.06553 ч	$\lambda_{83} - \lambda_8$	$-6.99 + 196.16t$	$-7.26 - 242.81t$
		7.06546 ч	$\lambda_{83} + \lambda_8$	$86.09 - 365.04t$	$35.81 + 1796.74t$
	$\Delta\theta_{II}$	210.0258 сут	Ω_{L83}	$-718.92 - 81427.30t$	$-47.49 - 33872.13t$
		7.06553 ч	$\lambda_{83} - \lambda_8$	$-0.47 - 70.97t$	$0.79 - 72.19t$
		7.06546 ч	$\lambda_{83} + \lambda_8$	$0.75 - 215.14t$	$19.62 + 12.35t$
	$\Delta\phi_{II}$	210.0258 сут	Ω_{L83}	$-53.33 + 61639.40t$	$-1107.33 - 149150.45t$
		7.06553 ч	$\lambda_{83} - \lambda_8$	$4.95 - 197.82t$	$4.68 + 223.24t$
		7.06546 ч	$\lambda_{83} + \lambda_8$	$-25.79 + 219.19t$	$-21.33 - 768.98t$
Таласса (N4) $a = 50074$ км	$\Delta\psi_{II}$	238.7940 сут	Ω_{L84}	$1512.08 + 2109.05t$	$469.24 - 3405.49t$
		7.4757 ч	$\lambda_{84} - \lambda_8$	$-55.54 + 1362.38t$	$-63.39 - 1563.80t$
		7.4756 ч	$\lambda_{84} + \lambda_8$	$15.91 + 233.54t$	$-35.05 + 51.89t$
	$\Delta\theta_{II}$	238.7940 сут	Ω_{L84}	$13.40 + 2940.33t$	$284.24 + 1826.95t$
		7.4757 ч	$\lambda_{84} - \lambda_8$	$7.41 + 298.90t$	$-16.72 + 116.76t$
		7.4756 ч	$\lambda_{84} + \lambda_8$	$-12.77 + 111.82t$	$-6.00 - 202.21t$
	$\Delta\phi_{II}$	238.7940 сут	Ω_{L84}	$-581.64 - 3439.68t$	$55.04 + 5616.10t$
		7.4757 ч	$\lambda_{84} - \lambda_8$	$11.66 - 633.58t$	$27.25 + 535.85t$
		7.4756 ч	$\lambda_{84} + \lambda_8$	$-16.19 - 373.68t$	$35.21 - 163.31t$

Таблица 1. Окончание

Спутник	Угол	Период	Аргумент	Коэффициент при $\sin(\text{Аргумент})$ (угл. с $\times 10^{-6}$)	Коэффициент при $\cos(\text{Аргумент})$ (угл. с $\times 10^{-6}$)
Деспина (N5) $a = 52526$ км	$\Delta\psi_{II}$	282.3825 сут	Ω_{L85}	$701.69 + 402.65t$	$593.97 + 491.12t$
		8.0318 ч	$\lambda_{85} - \lambda_8$	$-91.58 - 619.18t$	$-47.17 - 128.08t$
		8.0317 ч	$\lambda_{85} + \lambda_8$	$1.35 + 49.39t$	$-23.75 + 69.08t$
	$\Delta\theta_{II}$	282.3825 сут	Ω_{L85}	$-380.96 - 317.69t$	$233.76 + 442.30t$
		8.0318 ч	$\lambda_{85} - \lambda_8$	$3.10 - 400.41t$	$-16.92 + 2.71t$
		8.0317 ч	$\lambda_{85} + \lambda_8$	$-13.94 + 17.54t$	$-2.82 - 47.03t$
	$\Delta\phi_{II}$	282.3825 сут	Ω_{L85}	$-477.84 - 592.77t$	$-683.67 - 648.58t$
		8.0318 ч	$\lambda_{85} - \lambda_8$	$31.97 + 358.34t$	$23.09 + 551.57t$
		8.0317 ч	$\lambda_{85} + \lambda_8$	$-4.14 - 84.34t$	$30.12 - 60.36t$
Галатея (N6) $a = 61953$ км	$\Delta\psi_{II}$	1.38 лет	Ω_{L86}	$663.08 + 136.89t$	$375.21 - 72.50t$
		10.2900 ч	$\lambda_{86} - \lambda_8$	$-66.57 + 514.96t$	$-54.65 - 1060.87t$
		10.2898 ч	$\lambda_{86} + \lambda_8$	$7.31 + 159.37t$	$-26.22 + 79.47t$
	$\Delta\theta_{II}$	1.38 лет	Ω_{L86}	$-187.30 - 73.04t$	$295.21 + 71.22t$
		10.2900 ч	$\lambda_{86} - \lambda_8$	$6.02 + 71.25t$	$-16.86 + 38.15t$
		10.2898 ч	$\lambda_{86} + \lambda_8$	$-13.10 + 59.26t$	$-5.41 - 130.67t$
	$\Delta\phi_{II}$	1.38 лет	Ω_{L86}	$-522.07 - 133.74t$	$-349.22 + 146.09t$
		10.2900 ч	$\lambda_{86} - \lambda_8$	$17.79 - 244.87t$	$23.90 + 520.54t$
		10.2898 ч	$\lambda_{86} + \lambda_8$	$-10.60 - 246.30t$	$30.55 - 116.18t$
Ларисса (N7) $a = 73548$ км	$\Delta\psi_{II}$	2.51 лет	Ω_{L87}	$1806.02 - 848.12t$	$118.17 + 226.60t$
		13.3118 ч	$\lambda_{87} - \lambda_8$	$-68.02 + 132.30t$	$-45.80 - 657.36t$
		13.3116 ч	$\lambda_{87} + \lambda_8$	$5.09 + 122.77t$	$-21.56 + 71.90t$
	$\Delta\theta_{II}$	2.51 лет	Ω_{L87}	$508.21 - 659.05t$	$144.98 - 553.17t$
		13.3118 ч	$\lambda_{87} - \lambda_8$	$4.97 - 60.89t$	$-15.76 + 8.20t$
		13.3116 ч	$\lambda_{87} + \lambda_8$	$-12.31 + 36.29t$	$-4.56 - 91.24t$
	$\Delta\phi_{II}$	2.51 лет	Ω_{L87}	$-310.88 + 961.44t$	$954.88 - 657.39t$
		13.3118 ч	$\lambda_{87} - \lambda_8$	$19.96 - 62.90t$	$20.12 + 448.07t$
		13.3116 ч	$\lambda_{87} + \lambda_8$	$-8.34 - 178.47t$	$26.95 - 84.38t$
Протей (N8) $a = 117646$ км	$\Delta\psi_{II}$	12.75 лет	Ω_{L88}	$935.82 + 2015.37t$	$1036.16 + 403.93t$
		1.12234 сут	$\lambda_{88} - \lambda_8$	$-55.84 + 7.55t$	$-31.44 - 320.73t$
		1.12229 сут	$\lambda_{88} + \lambda_8$	$4.98 + 92.08t$	$-15.39 + 45.44t$
	$\Delta\theta_{II}$	12.75 лет	Ω_{L88}	$-843.56 - 2614.47t$	$290.05 + 3772.29t$
		1.12234 сут	$\lambda_{88} - \lambda_8$	$3.92 - 97.00t$	$-12.58 - 3.69t$
		1.12229 сут	$\lambda_{88} + \lambda_8$	$-9.69 + 24.02t$	$-3.66 - 62.71t$
	$\Delta\phi_{II}$	12.75 лет	Ω_{L88}	$-717.44 - 5549.44t$	$-1397.26 + 2477.01t$
		1.12234 сут	$\lambda_{88} - \lambda_8$	$17.10 - 3.32t$	$13.28 + 296.31t$
		1.12229 сут	$\lambda_{88} + \lambda_8$	$-7.18 - 126.51t$	$20.23 - 54.25t$

Таблица 2. Углы вращения Тритона (α_0 , δ_0 , W) и их вековые, периодические и смешанные члены геодезического вращения

Тритон (N1)
$\alpha_0 = 299.36 - 32.35\sin(N7) - 6.28\sin(2N7) - 2.08\sin(3N7) - 0.74\sin(4N7) - 0.28\sin(5N7) -$ $- 0.11\sin(6N7) - 0.07\sin(7N7) - 0.02\sin(8N7) - 0.01\sin(9N7)$ $\Delta\alpha_0 = -0.0005T - 8 \times 10^{-6}T^2 + 6.42 \times 10^{-5}\cos(N7) + 3.46 \times 10^{-4}\sin(N7) -$ $- 2.18 \times 10^{-5}T\cos(N7) + 4.88 \times 10^{-6}T\sin(N7) -$ $- 1.25 \times 10^{-5}\cos(2N7) + 9.27 \times 10^{-5}\sin(2N7) + 1.04 \times 10^{-6}T\cos(2N7) + 5.59 \times 10^{-6}T\sin(2N7) -$ $- 2.18 \times 10^{-6}\cos(3N7) + 2.60 \times 10^{-5}\sin(3N7) + 2.35 \times 10^{-6}T\cos(3N7) + 1.92 \times 10^{-6}T\sin(3N7)$
$\delta_0 = 41.17 + 22.55\cos(N7) + 2.10\cos(2N7) + 0.55\cos(3N7) + 0.16\cos(4N7) +$ $+ 0.05\cos(5N7) + 0.02\cos(6N7) + 0.01\cos(7N7)$ $\Delta\delta_0 = -0.0002T + 1 \times 10^{-6}T^2 - 2.42 \times 10^{-4}\cos(N7) - 5.83 \times 10^{-5}\sin(N7) +$ $+ 4.13 \times 10^{-6}T\cos(N7) - 1.06 \times 10^{-6}T\sin(N7) -$ $- 4.29 \times 10^{-5}\cos(2N7) - 1.19 \times 10^{-5}\sin(2N7) - 7.79 \times 10^{-7}T\cos(2N7) + 1.29 \times 10^{-6}T\sin(2N7) -$ $- 1.10 \times 10^{-5}\cos(3N7) - 1.30 \times 10^{-6}\sin(3N7) + 1.09 \times 10^{-7}T\cos(3N7) - 1.68 \times 10^{-7}T\sin(3N7)$
$W = 296.53 - 61.2572637d + 22.25\sin(N7) + 6.73\sin(2N7) + 2.05\sin(3N7) +$ $+ 0.74\sin(4N7) + 0.28\sin(5N7) + 0.11\sin(6N7) + 0.05\sin(7N7) + 0.02\sin(8N7) + 0.01\sin(9N7)$ $\Delta W = 0.0007T + 5 \times 10^{-6}T^2 - 1.99 \times 10^{-4}\cos(N7) + 3.34 \times 10^{-4}\sin(N7) +$ $+ 1.41 \times 10^{-5}T\cos(N7) - 1.76 \times 10^{-7}T\sin(N7) +$ $+ 2.74 \times 10^{-6}\cos(2N7) - 8.33 \times 10^{-5}\sin(2N7) - 9.68 \times 10^{-7}T\cos(2N7) + 2.56 \times 10^{-6}T\sin(2N7) -$ $- 7.29 \times 10^{-8}\cos(3N7) - 3.07 \times 10^{-5}\sin(3N7) - 3.12 \times 10^{-7}T\cos(3N7) - 2.45 \times 10^{-6}T\sin(3N7)$

Таблица 3. Углы вращения внутренних спутников Нептуна (α_0 , δ_0 , W) и их вековые, периодические и смешанные члены геодезического вращения

Наяда (N3)	Таласса (N4)
$\alpha_0 = 299.36 + 0.70\sin(N) - 6.49\sin(N1) + 0.25\sin(2N1)$ $\Delta\alpha_0 = 0.1098T + 0.0002T^2 +$ $+ 1.50 \times 10^{-6}\cos(N1) + 4.87 \times 10^{-6}\sin(N1) -$ $- 2.04 \times 10^{-6}T\cos(N1) - 7.55 \times 10^{-7}T\sin(N1) +$ $+ 1.32 \times 10^{-9}\cos(N10) + 1.08 \times 10^{-9}\sin(N10) +$ $+ 2.91 \times 10^{-9}T\cos(N10) - 4.37 \times 10^{-9}T\sin(N10) -$ $- 2.88 \times 10^{-9}\cos(N11) - 1.41 \times 10^{-8}\sin(N11) -$ $- 2.94 \times 10^{-8}T\cos(N11) + 2.64 \times 10^{-9}T\sin(N11)$	$\alpha_0 = 299.36 + 0.70\sin(N) - 0.28\sin(N2)$ $\Delta\alpha_0 = 0.1006T + 0.0002T^2 +$ $+ 1.22 \times 10^{-7}\cos(N2) + 1.71 \times 10^{-7}\sin(N2) +$ $+ 8.62 \times 10^{-8}T\cos(N2) + 6.73 \times 10^{-9}T\sin(N2) +$ $+ 7.89 \times 10^{-9}\cos(N12) + 1.03 \times 10^{-8}\sin(N12) +$ $+ 2.76 \times 10^{-8}T\cos(N12) - 1.78 \times 10^{-8}T\sin(N12) +$ $+ 4.86 \times 10^{-9}\cos(N13) - 4.61 \times 10^{-9}\sin(N13) -$ $- 3.99 \times 10^{-9}T\cos(N13) - 2.13 \times 10^{-9}T\sin(N13)$
$\delta_0 = 43.36 - 0.51\cos(N) - 4.75\cos(N1) + 0.09\cos(2N1)$ $\Delta\delta_0 = 0.0361T + 0.0005T^2 +$ $+ 6.02 \times 10^{-6}\cos(N1) - 1.17 \times 10^{-6}\sin(N1) +$ $+ 2.97 \times 10^{-7}T\cos(N1) + 2.24 \times 10^{-6}T\sin(N1) +$ $+ 1.91 \times 10^{-10}\cos(N10) + 5.05 \times 10^{-10}\sin(N10) +$ $+ 3.18 \times 10^{-9}T\cos(N10) + 7.46 \times 10^{-10}T\sin(N10) -$ $- 6.93 \times 10^{-9}\cos(N11) - 4.82 \times 10^{-9}\sin(N11) -$ $- 1.00 \times 10^{-8}T\cos(N11) + 7.36 \times 10^{-9}T\sin(N11)$	$\delta_0 = 43.45 - 0.51\cos(N) - 0.21\cos(N2)$ $\Delta\delta_0 = 0.0331T + 0.0004T^2 +$ $+ 2.01 \times 10^{-7}\cos(N2) - 8.51 \times 10^{-8}\sin(N2) -$ $- 3.00 \times 10^{-8}T\cos(N2) - 8.74 \times 10^{-8}T\sin(N2) +$ $+ 7.68 \times 10^{-9}\cos(N12) + 1.12 \times 10^{-9}\sin(N12) +$ $+ 5.55 \times 10^{-9}T\cos(N12) - 1.49 \times 10^{-8}T\sin(N12) +$ $+ 3.43 \times 10^{-9}\cos(N13) + 2.38 \times 10^{-9}\sin(N13) +$ $+ 4.85 \times 10^{-9}T\cos(N13) - 4.10 \times 10^{-9}T\sin(N13)$
$W = 254.06 + 1222.8441209d -$ $- 0.48\sin(N) + 4.40\sin(N1) - 0.27\sin(2N1)$ $\Delta W = -0.1311T + 0.0001T^2 +$ $+ 4.30 \times 10^{-6}\cos(N1) + 1.50 \times 10^{-5}\sin(N1) -$ $- 3.54 \times 10^{-7}T\cos(N1) + 1.40 \times 10^{-6}T\sin(N1) -$ $- 1.36 \times 10^{-9}\cos(N10) - 1.06 \times 10^{-9}\sin(N10) -$ $- 1.70 \times 10^{-9}T\cos(N10) + 2.24 \times 10^{-9}T\sin(N10) +$ $+ 4.75 \times 10^{-9}\cos(N11) + 2.33 \times 10^{-8}\sin(N11) +$ $+ 4.23 \times 10^{-8}T\cos(N11) - 4.63 \times 10^{-9}T\sin(N11)$	$W = 102.06 + 1155.7555612d -$ $- 0.48\sin(N) + 0.19\sin(N2)$ $\Delta W = -0.1209T + 0.0002T^2 +$ $+ 1.69 \times 10^{-7}\cos(N2) + 6.53 \times 10^{-7}\sin(N2) +$ $+ 1.46 \times 10^{-8}T\cos(N2) - 4.85 \times 10^{-8}T\sin(N2) -$ $- 1.33 \times 10^{-8}\cos(N12) - 1.74 \times 10^{-8}\sin(N12) -$ $- 4.21 \times 10^{-8}T\cos(N12) + 2.78 \times 10^{-8}T\sin(N12) -$ $- 2.08 \times 10^{-9}\cos(N13) + 2.52 \times 10^{-9}\sin(N13) -$ $- 5.43 \times 10^{-10}T\cos(N13) - 3.22 \times 10^{-9}T\sin(N13)$
Деспина (N5)	Галатея (N6)
$\alpha_0 = 299.36 + 0.70\sin(N) - 0.09\sin(N3)$ $\Delta\alpha_0 = 0.0892T + 0.0001T^2 -$ $- 9.27 \times 10^{-9}\cos(N3) - 2.83 \times 10^{-8}\sin(N3) +$ $+ 7.74 \times 10^{-10}T\cos(N3) - 1.36 \times 10^{-8}T\sin(N3) +$ $+ 5.17 \times 10^{-9}\cos(N14) + 1.56 \times 10^{-8}\sin(N14) +$ $+ 2.14 \times 10^{-9}T\cos(N14) + 4.06 \times 10^{-9}T\sin(N14) +$ $+ 3.49 \times 10^{-9}\cos(N15) - 2.39 \times 10^{-9}\sin(N15) -$ $- 1.86 \times 10^{-9}T\cos(N15) - 5.56 \times 10^{-10}T\sin(N15)$	$\alpha_0 = 299.36 + 0.70\sin(N) - 0.07\sin(N4)$ $\Delta\alpha_0 = 0.0590T + 0.0001T^2 +$ $+ 3.26 \times 10^{-8}\cos(N4) - 1.55 \times 10^{-8}\sin(N4) +$ $+ 3.72 \times 10^{-9}T\cos(N4) - 4.53 \times 10^{-9}T\sin(N4) +$ $+ 6.42 \times 10^{-9}\cos(N16) + 1.19 \times 10^{-8}\sin(N16) +$ $+ 1.81 \times 10^{-8}T\cos(N16) - 7.36 \times 10^{-9}T\sin(N16) +$ $+ 3.50 \times 10^{-9}\cos(N17) - 3.24 \times 10^{-9}\sin(N17) -$ $- 3.34 \times 10^{-9}T\cos(N17) - 1.73 \times 10^{-9}T\sin(N17)$
$\delta_0 = 43.45 - 0.51\cos(N) - 0.07\cos(N3)$ $\Delta\delta_0 = 0.0294T + 0.0003T^2 +$ $+ 9.19 \times 10^{-9}\cos(N3) + 5.86 \times 10^{-8}\sin(N3) -$ $- 1.50 \times 10^{-8}T\cos(N3) + 5.04 \times 10^{-9}T\sin(N3) +$ $+ 6.84 \times 10^{-9}\cos(N14) + 4.17 \times 10^{-9}\sin(N14) +$ $+ 6.65 \times 10^{-10}T\cos(N14) + 1.36 \times 10^{-8}T\sin(N14) +$ $+ 2.00 \times 10^{-9}\cos(N15) + 3.46 \times 10^{-9}\sin(N15) +$ $+ 8.29 \times 10^{-10}T\cos(N15) - 7.20 \times 10^{-10}T\sin(N15)$	$\delta_0 = 43.43 - 0.51\cos(N) - 0.05\cos(N4)$ $\Delta\delta_0 = 0.0194T + 0.0002T^2 -$ $- 2.87 \times 10^{-9}\cos(N4) + 1.16 \times 10^{-8}\sin(N4) -$ $- 1.92 \times 10^{-9}T\cos(N4) + 2.36 \times 10^{-10}T\sin(N4) +$ $+ 7.24 \times 10^{-9}\cos(N16) + 2.07 \times 10^{-9}\sin(N16) +$ $+ 4.82 \times 10^{-9}T\cos(N16) - 4.54 \times 10^{-9}T\sin(N16) +$ $+ 2.80 \times 10^{-9}\cos(N17) + 2.93 \times 10^{-9}\sin(N17) +$ $+ 2.89 \times 10^{-9}T\cos(N17) - 2.37 \times 10^{-9}T\sin(N17)$

Таблица 3. Окончание

$W = 306.51 + 1075.7341562d - 0.49\sin(N) + 0.06\sin(N3)$ $\Delta W = -0.1073T + 0.0002T^2 +$ $+ 2.88 \times 10^{-9}\cos(N3) + 2.55 \times 10^{-7}\sin(N3) -$ $- 4.63 \times 10^{-9}T\cos(N3) + 2.94 \times 10^{-9}T\sin(N3) -$ $- 8.63 \times 10^{-9}\cos(N14) - 2.41 \times 10^{-8}\sin(N14) +$ $+ 1.08 \times 10^{-8}T\cos(N14) - 7.90 \times 10^{-9}T\sin(N14) +$ $+ 1.91 \times 10^{-10}\cos(N15) + 8.06 \times 10^{-10}\sin(N15) +$ $+ 1.28 \times 10^{-9}T\cos(N15) - 7.59 \times 10^{-10}T\sin(N15)$	$W = 258.09 + 839.6597686d - 0.48\sin(N) + 0.05\sin(N4)$ $\Delta W = -0.0710T + 0.0001T^2 +$ $+ 1.13 \times 10^{-8}\cos(N4) + 1.93 \times 10^{-7}\sin(N4) +$ $+ 5.92 \times 10^{-10}T\cos(N4) + 3.43 \times 10^{-9}T\sin(N4) -$ $- 1.11 \times 10^{-8}\cos(N16) - 1.94 \times 10^{-8}\sin(N16) -$ $- 2.37 \times 10^{-8}T\cos(N16) + 1.08 \times 10^{-8}T\sin(N16) -$ $- 2.92 \times 10^{-10}\cos(N17) + 1.04 \times 10^{-9}\sin(N17) +$ $+ 9.90 \times 10^{-10}T\cos(N17) - 1.77 \times 10^{-9}T\sin(N17)$
Ларисса (N7)	Протей (N8)
$\alpha_0 = 299.36 + 0.70\sin(N) - 0.27\sin(N5)$ $\Delta\alpha_0 = 0.0385T + 0.0001T^2 +$ $+ 2.23 \times 10^{-7}\cos(N5) + 3.65 \times 10^{-7}\sin(N5) -$ $- 1.51 \times 10^{-8}T\cos(N5) - 3.07 \times 10^{-9}T\sin(N5) +$ $+ 5.13 \times 10^{-9}\cos(N18) + 1.20 \times 10^{-8}\sin(N18) +$ $+ 1.10 \times 10^{-8}T\cos(N18) - 3.08 \times 10^{-9}T\sin(N18) +$ $+ 2.86 \times 10^{-9}\cos(N19) - 2.75 \times 10^{-9}\sin(N19) -$ $- 2.60 \times 10^{-9}T\cos(N19) - 1.48 \times 10^{-9}T\sin(N19)$	$\alpha_0 = 299.27 + 0.70\sin(N) - 0.05\sin(N6)$ $\Delta\alpha_0 = 0.0119T + 6 \times 10^{-6}T^2 -$ $- 6.99 \times 10^{-8}\cos(N6) - 1.09 \times 10^{-7}\sin(N6) +$ $+ 1.05 \times 10^{-7}T\cos(N6) - 1.18 \times 10^{-7}T\sin(N6) +$ $+ 3.34 \times 10^{-9}\cos(N20) + 9.90 \times 10^{-9}\sin(N20) +$ $+ 5.28 \times 10^{-9}T\cos(N20) - 1.56 \times 10^{-9}T\sin(N20) +$ $+ 2.01 \times 10^{-9}\cos(N21) - 2.30 \times 10^{-9}\sin(N21) -$ $- 1.70 \times 10^{-9}T\cos(N21) - 1.18 \times 10^{-9}T\sin(N21)$
$\delta_0 = 43.41 - 0.51\cos(N) - 0.20\cos(N5)$ $\Delta\delta_0 = 0.0126T + 0.0001T^2 +$ $+ 3.79 \times 10^{-7}\cos(N5) - 2.27 \times 10^{-7}\sin(N5) +$ $+ 9.57 \times 10^{-9}T\cos(N5) + 2.06 \times 10^{-8}T\sin(N5) +$ $+ 6.48 \times 10^{-9}\cos(N18) + 2.42 \times 10^{-9}\sin(N18) +$ $+ 3.39 \times 10^{-9}T\cos(N18) + 8.88 \times 10^{-10}T\sin(N18) +$ $+ 2.33 \times 10^{-9}\cos(N19) + 2.85 \times 10^{-9}\sin(N19) +$ $+ 1.93 \times 10^{-9}T\cos(N19) - 1.59 \times 10^{-9}T\sin(N19)$	$\delta_0 = 42.91 - 0.51\cos(N) - 0.04\cos(N6)$ $\Delta\delta_0 = 0.0039T + 0.0001T^2 -$ $- 7.47 \times 10^{-9}\cos(N6) + 1.64 \times 10^{-7}\sin(N6) -$ $- 9.99 \times 10^{-8}T\cos(N6) + 5.58 \times 10^{-8}T\sin(N6) +$ $+ 4.90 \times 10^{-9}\cos(N20) + 2.02 \times 10^{-9}\sin(N20) +$ $+ 1.85 \times 10^{-9}T\cos(N20) + 2.48 \times 10^{-9}T\sin(N20) +$ $+ 1.76 \times 10^{-9}\cos(N21) + 2.20 \times 10^{-9}\sin(N21) +$ $+ 1.36 \times 10^{-9}T\cos(N21) - 1.11 \times 10^{-9}T\sin(N21)$
$W = 179.41 + 649.0534470d - 0.48\sin(N) + 0.19\sin(N5)$ $\Delta W = -0.0462T + 0.0001T^2 +$ $+ 3.16 \times 10^{-7}\cos(N5) + 8.93 \times 10^{-7}\sin(N5) -$ $- 7.86 \times 10^{-9}T\cos(N5) + 5.01 \times 10^{-9}T\sin(N5) -$ $- 9.08 \times 10^{-9}\cos(N18) - 1.92 \times 10^{-8}\sin(N18) -$ $- 1.10 \times 10^{-8}T\cos(N18) + 3.61 \times 10^{-9}T\sin(N18) +$ $+ 2.79 \times 10^{-10}\cos(N19) + 7.98 \times 10^{-10}\sin(N19) +$ $+ 1.18 \times 10^{-9}T\cos(N19) - 9.53 \times 10^{-10}T\sin(N19)$	$W = 93.38 + 320.7654228d - 0.48\sin(N) + 0.04\sin(N6)$ $\Delta W = -0.0141T + 5 \times 10^{-5}T^2 -$ $- 4.30 \times 10^{-8}\cos(N6) + 3.44 \times 10^{-7}\sin(N6) +$ $+ 8.30 \times 10^{-8}T\cos(N6) - 8.57 \times 10^{-8}T\sin(N6) -$ $- 6.21 \times 10^{-9}\cos(N20) - 1.55 \times 10^{-8}\sin(N20) -$ $- 3.11 \times 10^{-9}T\cos(N20) + 1.16 \times 10^{-9}T\sin(N20) +$ $+ 5.22 \times 10^{-10}\cos(N21) + 7.65 \times 10^{-10}\sin(N21) +$ $+ 7.49 \times 10^{-10}T\cos(N21) - 4.79 \times 10^{-10}T\sin(N21)$

$$N16 = \lambda_{86} - \lambda_8 = -46^\circ.26 + 30668354^\circ.56T, N17 = \lambda_{86} + \lambda_8 = 202^\circ.44 + 30668791^\circ.53T,$$

$$N18 = \lambda_{87} - \lambda_8 = -124^\circ.94 + 23706458^\circ.67T, N19 = \lambda_{87} + \lambda_8 = 123^\circ.76 + 23706895^\circ.64T,$$

$$N20 = \lambda_{88} - \lambda_8 = -210^\circ.97 + 11715738^\circ.58T, N21 = \lambda_{88} + \lambda_8 = 37^\circ.73 + 11716175^\circ.55T.$$

На рис. 1–4 представлена вычисленная скорость геодезического вращения спутников Нептуна в углах Эйлера. Белая линия на графиках показывает вековой ход.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для спутников Нептуна с известными параметрами вращения впервые были вычислены наиболее существенные периодические и смешанные члены геодезической нутации в углах их вращения относительно неподвижного экватора Земли эпохи J2000.0, определенного в международной системе координат (ICRF), и точки весеннего равноденствия эпохи J2000.0 и в углах Эйлера относительно их собственных систем координат. Были выявлены гармоники, вызванные

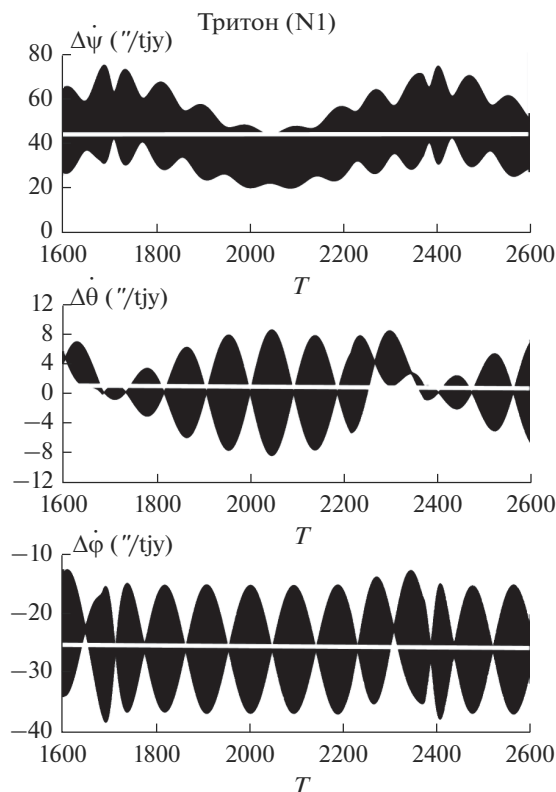


Рис. 1. Скорость изменения геодезического вращения Тритона в углах Эйлера (T — время в юлианских годах, $''/\text{tjy}$ — угловые секунды за тысячелетие).

орбитальным вращением и прецессией узлов орбит и отражающие определяющее влияние притяжения Нептуна и Солнца.

Было показано, что величины геодезической прецессии спутников Нептуна находятся в пределах от $43''.$ 45 за тысячу лет до $-6670''.$ 30 за тысячу лет. В системе исследуемых спутников Нептуна Тритон (рис. 1) представляет наибольший интерес. Этот спутник, как и спутники Урана, имеет положительное значение скорости геодезической прецессии и обратное вращение.

Скорость геодезической прецессии других спутников Нептуна оказалась в среднем на порядок выше скорости геодезической прецессии Меркурия, ближайшей к Солнцу планеты Солнечной системы и уступает только спутникам Юпитера.

Результаты исследований могут быть использованы для учета влияния геодезических эффектов при построении теории вращения тел, находящихся в системе с двумя притягивающими центрами, как, например, экзопланта, обращающаяся вокруг одного из компонентов двойной системы.

Полученные аналитические значения геодезического вращения исследованных небесных тел

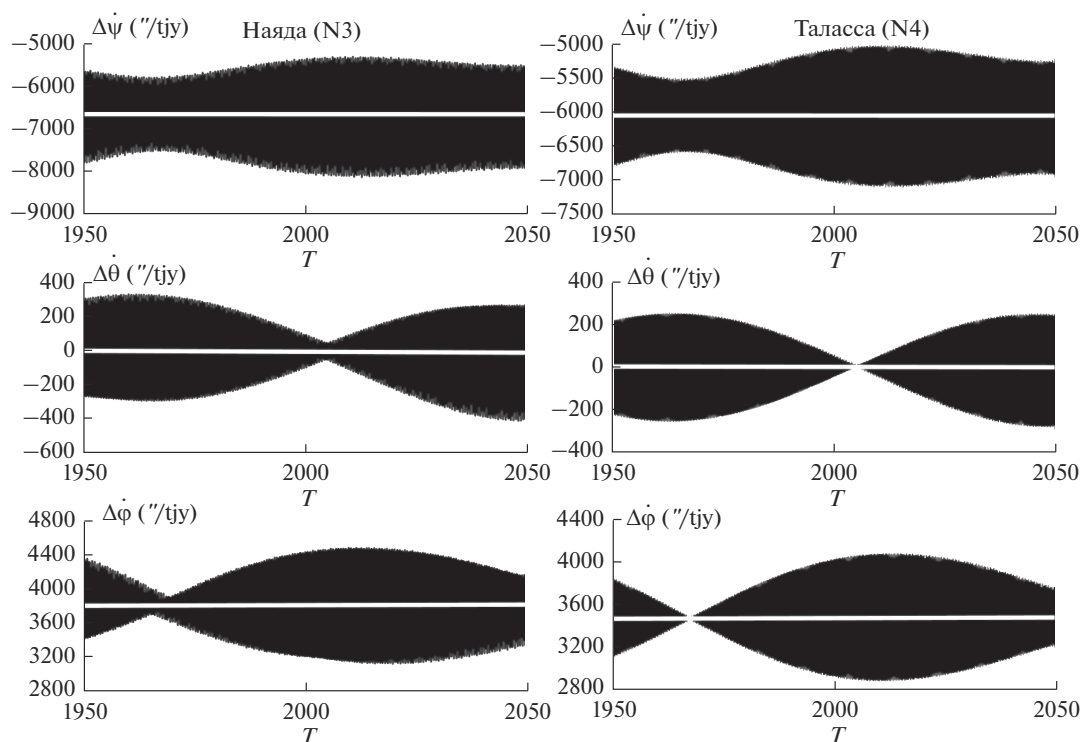


Рис. 2. Скорость изменения геодезического вращения Найды и Талассы в углах Эйлера (T — время в юлианских годах, $''/\text{tjy}$ — угловые секунды за тысячелетие).

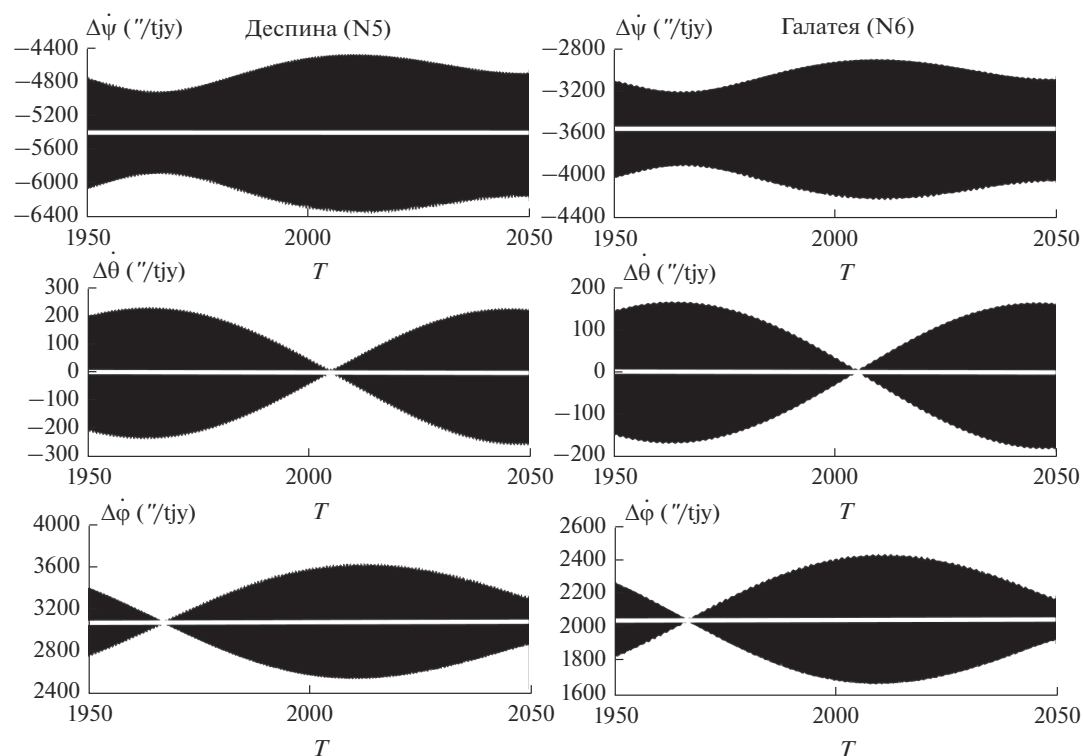


Рис. 3. Скорость изменения геодезического вращения Деспины и Галатеи в углах Эйлера (T — время в юлианских годах, $''/\text{tjy}$ — угловые секунды за тысячелетие).

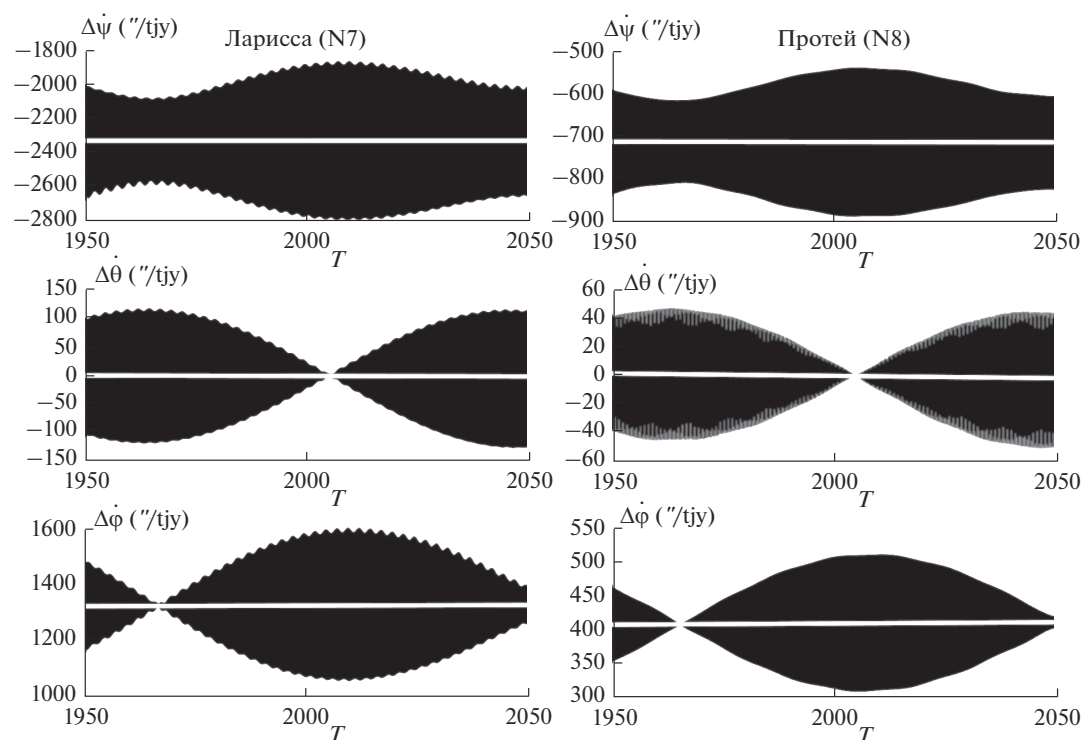


Рис. 4. Скорость изменения геодезического вращения Лариссы и Протея в углах Эйлера (T — время в юлианских годах, $''/\text{tjy}$ — угловые секунды за тысячелетие).

могут быть использованы для численного исследования их вращения в релятивистском приближении, а также для построения моделей вращательного движения экзолун.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ “Экзопланеты”, научный проект № 075-15-2020-780.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пашкевич В.В. Геодезическое (релятивистское) вращение тел Солнечной системы // Вестн. СПбГУ. 2016. Сер. 1. Т. 3 (61). Вып. 3. С. 506–516.
- Пашкевич В.В., Вершков А.Н. Учет релятивистских эффектов во вращении Марса и его спутников // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 6. С. 423–427.
(Pashkevich V.V., Vershkov A.N. Consideration of relativistic effects in the rotation of Mars and its satellites // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 6. P. 431–435.
<https://doi.org/10.1134/S0038094619060066>.
<https://doi.org/10.1134/S0320930X19060069>
- Пашкевич В.В., Вершков А.Н., Мельников А.В. Динамика вращения внутренних спутников Юпитера // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 1. С. 50–64.
(Pashkevich V.V., Vershkov A.N., Mel'nikov A.V. Rotational dynamics of the inner satellites of Jupiter // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. No 1. P. 47–60.
<https://doi.org/10.1134/S0038094620330035>.
<https://doi.org/10.31857/S0320930X20330038>
- 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 // Celest. Mech. Dyn. Astron. 2018. V. 130. № 22. P. 1–46.
- Biscani F., Carloni S. A first-order secular theory for the post-Newtonian two-body problem with spin. II. A complete solution for the angular coordinates in the restricted case // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2015. V. 446. P. 3062–3077.
- Brumberg V.A., Bretagnon P. Kinematical Relativistic Corrections for Earth's Rotation Parameters // Proc. IAU Colloq. 180 / Eds Johnston K., McCarthy D., Luzum B., Kaplan G. U.S. Naval Observatory, 2000. P. 293–302.
- Folkner W.F., Williams J.G., Boggs D.H., Park R.S., Kuchynka P. The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431 // IPN Progress Report 42–196, February 15, 2014.
- Fox C., Wiegert P. Exomoon candidates from transit timing variations: Eight Kepler systems with TTVs explainable by photometrically unseen exomoons // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2021. V. 501. P. 2378–2393.
- Giorgini J.D., Chodas P.W., Yeomans D.K. Orbit Uncertainty and Close-Approach Analysis Capabilities of the Horizons On-Line Ephemeris System // 33rd AAS/DPS meeting in New Orleans. LA. Nov 26. 2001–Dec 01. 2001.
- Pashkevich V.V., Vershkov A.N. Relativistic effects in the rotation of Jupiter's inner satellites /Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy. 2020. V. 55. № 3. P. 118–129.
<https://doi.org/10.2478/arsa-2020-0009>
- Pashkevich V.V., Vershkov A.N. Geodetic precession of the Sun, Solar System planets and their satellites // Artificial Satellites, J. Planetary Geodesy. 2022. V. 57. № 1. P. 77–109.
<https://doi.org/10.2478/arsa-2022-0005>.
- Smith B.A., Soderblom L.A., Banfield D., Barnet C., Basilevsky A.T., Beebe R.F., Bollinger K., Boyce J.M., Brahic A., Briggs G.A., Brown R.H., Chyba C., Collins S.A., Colvin T., Cook A.F., Crisp D., Croft S.K., Cruikshank D., Cuzzi J.N., Danielson G.E., Davies M.E., de Jong E., Dones L., Godfrey D., Goguen J., Grenier I., Haemmerle V.R., Hammel H., Hansen C.J., Helfenstein C.P., Howell C., Hunt G.E., Ingersoll A.P., Johnson T.V., Kargel J., Kirk R., Kuehn D.I., Limaye S., Masursky H., McEwen A., Morrison D., Owen T., Owen W., Pollack J.B., Porco C.C., Rages K., Rogers P., Rudy D., Sagan C., Schwartz J., Shoemaker E.M., Showalter M., Sicardy B., Simonelli D., Spencer J., Stromovsky L.A., Stoker C., Strom R.G., Suomi V.E., Synott S.P., Terrile R.J., Thomas P., Thompson W.R., Verbiscer A., Veverka J. Voyager 2 at Neptune: Imaging science results // Science. 1989. V. 246. № 4936. P. 1422–1449.