

ПРАКТИЧЕСКАЯ НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Оглавление.

Глава 8. Построенные, работающие и используемые модели движения реальных небесных тел.

8.11. Аналитические теории движения планет. Обзор аналитических теорий движения планет от Леверье до наших дней

Эфемериды, публиковавшиеся в *Connaissance des Temps* (французский астрономический ежегодник) до 1983 года, вычислялись с помощью теории Леверье и теории Леверье и Гайо.

Леверье построил теорию движения восьми больших планет Солнечной системы: Меркурия, Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Результаты его работы были опубликованы между 1855 и 1877 годами в *Annales de l'Observatoire de Paris*. Он строил свою теорию используя классические кеплеровские элементы $a, e, i, \lambda, \pi, \Omega$ и интегрировал уравнения методом малого параметра по отношению к массам планет разлагая решение с точностью до второго порядка относительно масс. Его теория сначала была полностью аналитической по отношению ко всем переменным. Затем формулы были разложены в ряды Пуассона относительно средних долгот планет с полиномиальными по времени коэффициентами. Для планет земной группы (Меркурий - Марс) возмущения второго порядка содержат только по несколько членов (по два для Земли и Марса и один для Венеры). Для больших планет члены второго порядка представлены достаточно полно, особенно что касается взаимных возмущений Юпитер-Сатурн. Чтобы построить теорию движения планет земной группы Леверье взял значения масс такими, какие даются в Табл. 1 в графе "Леверье, 1856". Однако затем он их улучшил, нашел для Меркурия $m = 1/5310000$, а для Венеры, Земли и Марса - значения, приведенные в графе "Гайо, 1913" Табл. 1.

Таблица 1: Отношения массы Солнца к массам планетных систем (планета вместе с ее спутниками), принятые в различных планетных теориях, в системе постоянных IAU 1976 и в стандартах IERS 1992.

	Леверье (1856)	Гайо (1913)	Ньюком (1898)	IAU (1976)	IERS (1992)
Меркурий	3000000	-	6000000	6000000	6023600
Венера	401847	412150	408000	408523.5	408523.71
Земля	354936	324439	329390	328900.5	328900.56
Марс	2680337	2812526	3093500	3098710	3098708
Юпитер	1050	1047.52	1047.35	1047.355	1047.3486
Сатурн	3512	3499.8	3501.6	3498.5	3497.90
Уран	24000	22453	22756	22869	22902.94
Нептун	14400	19094	19540	19314	19412.24

В начале 20-го века Гайо (1904) констатировал, что теория Леверье принципиально расходится с наблюдениями больших планет, для которых он предпринял построение теории. Гайо использовал те же переменные, что и Леверье, но строил теорию прямо в форме рядов Пуассона относительно средних долгот. Для пары Юпитер-Сатурн он применил метод интерполяции, который в действительности является итеративным методом, основанным на анализе Фурье (Гайо, 1904, 1913). Он использовал как отправную точку теорию Леверье второго порядка и выполнил одну итерацию, получив тем самым члены третьего порядка и члены более высоких порядков, происходящих от членов первого и второго порядков. Исходя из этого результата, он вычисляет аналитически некоторое число членов четвертого порядка, происходящих из членов третьего порядка для Сатурна. Гайо таким образом продвинул теорию движения Юпитера и Сатурна. Его работа позволила, в частности, улучшить определение масс четырех больших планет, особенно массы Сатурна. Что касается Урана и Нептуна Гайо (1910) повторил работу Леверье, используя самые лучшие значения масс планет и постоянные интегрирования. В итоге Гайо построил прекрасную теорию второго порядка относительно масс для четырех больших планет с наиболее полным вычислением взаимных возмущений пары Юпитер-Сатурн с точностью до третьего порядка относительно масс.

Возмущения в движении планет земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) имеют малые амплитуды, и ошибки теории Леверье происходят главным образом из неопределенности масс планет при вычислениях вековых вариаций элементов.

К концу 19-го века Ньюком предпринял работу, сравнимую в работе Леверье. Он построил решение второго порядка относительно масс планет для возмущений планет земной группы. Он использовал более точные значения масс, чем те, которые были известны Леверье. Его значения были в 10-100 раз более точными, как показывает Табл. 1. Воспользовавшись дополнительными наблюдениями, сделанными за сорок лет, он получил очень хорошее определение постоянных интегрирования.

Теория движения Солнца Ньюкома, опубликованная в 1898 году в *Астрономических бумагах Американских эфемерид (Astronomical Papers of the American Ephemeris, vol. VI)*, использовалась в эфемеридах *American Ephemeris* до 1983 года. Ее ошибка для современной эпохи имеет величину порядка 0.9 секунд дуги, в то время как теория Леверье имеет отличия от наблюдений, которые могут достигать 1.6 секунд дуги. Для Меркурия, Венеры и Марса улучшение достигнутое Ньюкомом еще более значительно. Эфемериды, следующие из его теории, являются в три-пять раз более точными, чем эфемериды по теории Леверье.

Что касается больших планет, эфемериды, публиковавшиеся до 1959 года в *American Ephemeris*, основаны на теории Хилла для Юпитера и Сатурна и на теории Ньюкома для Урана и Нептуна. Ошибки этих эфемерид имеют тот же порядок величины, что и ошибки решения Гайо, включая Нептун. В решениях Хилла и Ньюкома ошибки имеют порядок 1 секунды дуги для Юпитера и Урана, 2 секунды дуги для Сатурна и могут достигать 10 секунд дуги для Нептуна.

В последние годы в Бюро долгот (Институт небесной механики и вычисления эфемерид с 1998 г., Париж) были построены несколько теорий движения планет, которые служили для эфемерид и средних элементов орбит планет, публикуемых в *Connaissance des Temps*. Эти теории очень близки по форме. Они являются теориями вековых вариаций коэффициентов рядов Пуассона относительно средних долгот и используют значения масс, приведенные под заголовком "IAU (1976)" в Табл. 1. Постоянные интегрирования в этих теориях не были определены непосредственно из наблюдений. Они уточнялись по данным численного интегрирования DE200, выполненного в JPL.

Бретаньон (1982) построил теорию движения восьми больших планет VSOP82 (*Variations seculaires des orbites planetaires*). Эта теория использует переменные a, λ, k, h, q, p . Она построена путем интегрирования уравнений движения восьми планет методом малого параметра по отношению к массам планет. Правые части уравнений и их производные вычисляются в замкнутой форме. Решение получено с точностью до 3-го порядка относительно масс. Для четырех больших планет теория дополнена членами более высоких порядков, полученными итерационным методом. Это позволяет получить возмущения в форме рядов Пуассона с использованием разложений по степеням времени с точностью до 5-й степени. Теория содержит также возмущения от Луны на движение барицентра системы Земля-Луна и релятивистские поправки в изотропической и стандартной системах координат. На теории VSOP82 основаны эфемериды, публикуемые в *Connaissance de Temps* с 1984 года.

Симон (1983) построил теорию движения четырех больших планет TOP82 (*Theory of outer planets*). Эта теория использует эллиптические переменные $a, \lambda, e, \pi, \gamma, \Omega$. Она построена интегрированием методом малого параметра по отношению к массам уравнений движения четырех больших планет. Правые части уравнений и их производные вычислены по формулам Брумберга (1967) и Шапрона (1970). Разложение решения получено с точностью до 3-го порядка относительно масс. Для системы Юпитер-Сатурн оно уточнено итеративным методом, основанным на гармоническом анализе, подсказанном интерполяционным методом Гайо. Это уточнение позволило получить взаимные возмущения между Юпитером и Сатурном в форме рядов Пуассона с точностью до членов 6-го порядка по степеням времени. Эта теория содержит также возмущения, обусловленные теллурическими планетами и следующими из теории VSOP82, а также релятивистские эффекты. С той точностью, с которой теории опубликованы, VSOP82 и TOP82 идентичны для Юпитера и Сатурна.

Исходя из теории TOP82, Симон и Бретаньон (1984) построили теорию движения Юпитера и Сатурна JASON84 (*Jupiter and Saturn orbits from Neolithic*), в которой взаимные возмущения Юпитера и Сатурна вычисляются методом гармонического анализа в форме рядов Пуассона с точностью до 20 степени по отношению ко времени. Интервал справедливости теории таким образом значительно расширился. Решение представляет движение Юпитера и Сатурна на интервале времени 12000 лет. Используемые переменные те же, что и в теории TOP82.

Эта теория построена не для того, чтобы вычислять эфемериды, публикуемые в *Connaissance des Temps*, но она позволяет дать очень точные средние элементы Юпитера и Сатурна.

Преыдушие теории используют эллиптические переменные. Но на основе VSOP82 Бретеньон и Франку (1988) построили решение VSOP87, которое выражено в прямоугольных координатах X, Y, Z или в сферических координатах, долготе, широте и расстоянии. Используемые системы координат - эклиптика и равноденствие J2000 или эклиптика и равноденствие даты. Координаты являются гелиоцентрическими или барицентрическими. Это решение не служит для составления эфемерид, но оно очень полезно в некоторых задачах, например, при вычислении планетных возмущений в движении Луны, при получении аналитических выражений для видимых положений, вывода аналитических выражений для нутации или для разности $TDB - TT$.

В аналитической теории движения присутствуют буквенно постоянные параметры, значения которых подлежат определению из наблюдений, после чего теория становится моделью движения и может использоваться для эфемерид. Однако теории движения планет, разработанные в Бюро долгот, были обработаны иначе. За основу была взята численная модель DE200/LE200, которая уже была уточнена по всем имеющимся в мире пригодным для использования наблюдениям. Параметры описанных выше аналитических теорий движения планет были определены методом дифференциального уточнения по координатам, вычисленным с помощью эфемерид DE200/LE200. После этого модели движения планет Бюро долгот также наилучшим образом соответствуют всем наблюдениям. Однако формулы аналитической теории сами по себе являются приближенными. Поэтому эфемериды, вычисленные по аналитическим моделям движения Бюро долгот, содержат как погрешности формул, так и погрешности наблюдений. Оказалось возможным сделать погрешности формул существенно меньшими погрешностей, следующих из ошибок наблюдений. Кроме того, при построении численных моделей и при использовании формул аналитической теории движения должны быть заданы массы планет. Значения масс также определяются на основе наблюдений, поэтому существуют несколько систем планетных масс. В теориях движения планет Бюро долгот и в численных эфемеридах DE200/LE200 принятые значения масс немного различаются. Это также вносит расхождения между моделями.

Аналитические теории движения планет описываются формулами

Таблица 2: Различия между теориями, точность теорий и точность публикуемых эфемерид в *Connaissance de Temps*. Приведенные оценки даны для гелиоцентрических долгот планет.

Планета	Различия между VSOP82 и DE200/LE200	Точность теорий BDL	Точность публикуемых эфемерид
Меркурий	0.001''	0.10''	0.9''
Венера	0.006''	0.10''	0.3''
Земля	0.005''	0.10''	0.3''
Марс	0.023''	0.10''	0.4''
Юпитер	0.071''	0.35''	0.5''
Сатурн	0.144''	0.50''	0.9''
Уран	0.017''	0.70''	0.5''
Нептун	0.087''	1.00''	1.0''

огромного объема. Поэтому для представления эфемерид в публикациях используют разложения по полиномам Чебышева относительно времени на отдельных отрезках времени. Используемое представление для элементов орбит, публикуемых в *Connaissance de Temps*, не увеличивает их погрешности, однако разложение прямых восхождений планет сделано с меньшей точностью.

Различия между координатами планет, получаемые из разных источников, наиболее существенны в долготе. В табл. 2 даны максимальные различия в гелиоцентрической долготе между координатами планет, вычисляемыми по теории VSOP82 и из эфемерид DE200/LE200, точность аналитических моделей движения, используемых для вычисления эфемерид в Институте небесной механики и вычисления эфемерид (Бюро долгот до 1998 г.), а также реальная точность эфемерид планет, публикуемых в *Connaissance de Temps*.

Аналитическая теория движения 8-ми планет VSOP82, представленная формулами для возмущений элементов кеплеровской орбиты в форме рядов Пуассона, доступна на сайте Института небесной механики и вычисления эфемерид <http://www.imcce.fr>. Для практического использования теория представлена в форме отрезков рядов по полиномам Чебышева для прямоугольных

гелиоцентрических координат планет на интервалах времени от 4 до 32 суток для разных планет. Чтобы воспользоваться эфемеридами в вычислительных программах, решающих различные практические задачи, необходимо иметь файл с коэффициентами рядов, размещенных в определенном порядке, и программу, выдающую координаты заданной планеты на заданный момент времени. Такая программа использует при своей работе вышеупомянутый файл данных.

ЛИТЕРАТУРА

- Bretagnon P.* (1982) Théorie du mouvement de l'ensemble des planètes. Solution VSOP82. *Astron. Astrophys.* V. 114. P. 278.
- Bretagnon P., Francou G.* (1988) Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP87 solutions. *Astron. Astrophys.* V. 202. P. 309.
- Chapront J.* (1970) Construction d'une théorie littérale planétaire jusqu'au second ordre des masses. *Astron. Astrophys.* V. 7. P. 175.
- Брумберг В. А.* (1967) Разложение пертурбационной функции в спутниковых задачах. Бюллетень ин-та теор. астрон. АН СССР. Т. 11. С. 73-83.
- Gaillot A.* (1904) Application intégrale de la méthode d'interpolation. Tables rectifiées du mouvement de Saturne. *Annales de l'observatoire de Paris.* V. 24. P.1. Gauthier-Villars. Paris.
- Gaillot A.* (1910) Tables nouvelles des mouvements d'Uranus et de Neptune. *Annales de l'observatoire de Paris.* V. 28. P.1. Gauthier-Villars. Paris.
- Gaillot A.* (1913) Tables rectifiées du mouvement de Jupiter. *Annales de l'observatoire de Paris.* V. 31. P.1. Gauthier-Villars. Paris.
- Simon J.-L.* (1983) Théorie du mouvement des quatre grosses planètes. Solution TOP82. *Astron. Astrophys.* V. 120. P. 197.
- Simon J.-L., Bretagnon P.* (1984) Théorie du mouvement de Jupiter et Saturne sur un intervalle de temps de 6000 ans. Solution JASON84. *Astron. Astrophys.* V. 138. P. 169.