Труды Института прикладной астрономии РАН, вып. 45, 2018

Определение кинематических параметров движения тектонических плит

© А. А. Клюйков, С. П. Кузин

ИНАСАН, г. Москва, Россия

Повышение точности определения координат пунктов геодезических сетей посредством использования современных измерительных средств (GPS, SLR, VLBI, DORIS) позволило выявить факторы, которые раньше считались малозначимыми. К таким факторам относится движение тектонических плит. Для учета влияния движения тектонических плит на координаты пунктов необходимо знать кинематические параметры движения тектонических плит — параметры вектора Эйлера — угловую скорость вращения тектонической плиты и координаты (широту и долготу) полюса вращения тектонической плиты. В статье представлен алгоритм, позволяющий оценивать параметры движения тектонических плит из математической обработки геодезических измерений, выполненных на пунктах, распределенных по поверхности тектонических плит. На основе представленного алгоритма была разработана программа Euler на алгоритмическом языке FORTRAN, с помощью которой были выполнены экспериментальные вычисления.

Ключевые слова: вектор Эйлера, движение тектонических плит, система координат, GPS-измерения, угловая скорость вращения, координаты полюса Эйлера.

Введение

Значительный прогресс в повышении точности определения координат пунктов методами и средствами космической геодезии позволил разрабатывать кинематические модели движения тектонических плит, опираясь на результаты, полученные только методами космической геодезии. Начиная с 1995 года, появляются первые геодезические модели движения тектонических плит. В данной статье представлен алгоритм определения кинематических параметров движения тектонических плит, основанный на использовании геодезических измерений, выполненных на пунктах, распределенных по поверхности тектонических плит.

Теоретические основы алгоритма

Движение тектонических плит характеризуется параметрами, являющиеся составляющими вектора Эйлера (угловая скорость вращения плиты и координаты (широта и долгота) полюса вращения плиты. Движение тектонических плит по земной поверхности может быть представлено в соответствии с теоремой Эйлера, как вращение вокруг оси, проходящей через центр сферы. Полюсом вращения является одна из двух точек пересечения оси с поверхностью сферы, называемая полюсом Эйлера (рис. 1).

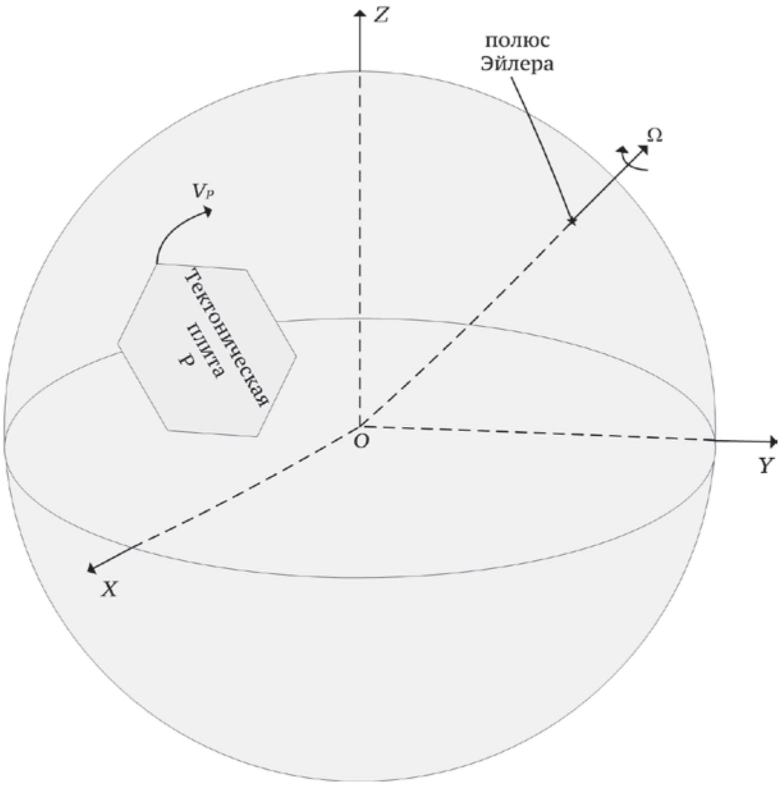

Рис. 1. Кинематическая модель движения тектонической плиты

Если известны координаты и скорости пунктов, расположенных на тектонической плите, то параметры вектора Эйлера могут быть определены на основании следующего уравнения [1]:

$$\bar{V}_i^P = \bar{x}_i^p \cdot \bar{\Omega}^P = \begin{bmatrix} 0 & Z & -Y \\ -Z & 0 & X \\ Y & -X & 0 \end{bmatrix}^P \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}^P, \quad (1)$$

где $\bar{V}_i^P$ — вектор скорости пункта i на плите P;

$\bar{x}_i^p = (X_i^P, Y, Z_i^P)^T$ — вектор координат пункта i на плите P;

$\overline{\Omega}^P = \left(\omega_x, \omega_y, \omega_z\right)^T$ — параметры вектора Эйлера для плиты *P*.

Формула (1) является основой при разработке алгоритма определения кинематических параметров движения тектонических плит. Формула (1) записана для случая единичного пункта на тектонической плите *P*. Для случая *n* пунктов формула (1) будет иметь следующий вид:

$$\begin{bmatrix} v_1^x \\ v_1^y \\ v_1^z \\ \cdots \\ v_n^x \\ v_n^y \\ v_n^z \end{bmatrix}_{3n\times 1} = \begin{bmatrix} o & Z_1 & -Y_1 \\ -Z_1 & o & X_1 \\ Y_1 & -X_1 & o \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ o & Z_n & -Y_n \\ -Z_n & o & X_n \\ Y_n & -X_n & o \end{bmatrix}_{3n\times 3}^P \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{3\times 1}^P . \tag{2}$$

В соответствии с принципом наименьших квадратов систему условных уравнений (2) преобразуем в систему нормальных уравнений, решив которую определим искомые параметры вектора Эйлера:

$$\begin{cases} \left|\Omega^P\right| = \sqrt{(\omega_x^P)^2 + \left(\omega_y^P\right)^2 + (\omega_z^P)^2}; \\ \varphi^P = \arctan\left(\dfrac{\omega_z^P}{\sqrt{\left(\omega_x^P\right)^2 + \left(\omega_y^P\right)^2}}\right); \\ \lambda^P = \arctan\left(\dfrac{\omega_y^P}{\omega_x^P}\right). \end{cases} \tag{3}$$

Таблица

Параметры вектора Эйлера для Североамериканской, Евразийской и Африканской тектонических плит

Модели	Северная Америка	Евразия	Nubia (W. Africa)
AM1-2	φ = −58.31°	φ = 0.70°	φ = 18.76°
	λ = −40.67°	λ = −23.19°	λ = −21.76°
	ω = 0.247°/Myr	ω = 0.038°/Myr	ω = 0.139°/Myr
NUVEL-1A	φ = −2.429°	φ = 50.655°	φ = 50.656°
	λ = −86.035°	λ = 112.562°	λ = −74.081°
	ω = −0.2064°/Myr	ω = 0.2336°/Myr	ω = 0.2906°/Myr
ITRF 2005	φ = −4.291°	φ = 56.330°	φ = 49.955°
	λ = −87.385°	λ = −95.979°	λ = −82.501°
	ω = 0.192°/Myr	ω = 0.261°/Myr	ω = 0.269°/Myr
ITRF 2008	φ = −4.29°	φ = 54.64°	φ = 51.37°
	λ = −85.43°	λ = −81.69°	λ = −71.88°
	ω = 0.194°/Myr	ω = 0.264°/Myr	ω = 0.303°/Myr
Euler	φ = −7.764°	φ = 52.900°	φ = 51.144°
	λ = −86.154°	λ = −95.284°	λ = −73.642°
	ω = 0.185°/Myr	ω = 0.202°/Myr	ω = 0.312°/Myr

Вышеизложенный алгоритм был реализован в виде программы Euler на алгоритмическом языке FORTRAN. С помощью этой программы были выполнены экспериментальные вычисления по определению параметров вектора Эйлера для трех тектонических плит: Североамериканской, Евразийской и Африканской с использованием координат и скоростей пунктов ITRF 1992 [2]. Результаты вычислений представлены в таблице наряду с результатами, полученными по другим моделям [3, 4].

Заключение

Анализ результатов показал, что параметры вектора Эйлера, полученные по программе Euler, хорошо согласуются с результатами, полученными по моделям ITRF 2005 и ITRF 2008.

Литература

1. *Mohammad Ali Goudarzi, Marc Cocard, Rock Santerre.* EPC: Matlab software to estimate Euler pole parameters // GPS Solutions. —2014. —Vol. 18, Issue 1. — P. 153–162.

2. 1992 IERS. Annual Reports. — Paris, 1992 — 166 pp.

3. Sciences of Geodesy — I. Advaces and Future Directions. — Springer. —2010. — 488 pp.

4. *Zhu Ze, Meng Guojie, Su Xiaonning, Wu Jicag, Li Jean Xiaojing.* Global crustal movement and tectonic plate boundary deformation con strained by the ITRF2008 // Geodesy and Geodynamics. —2012. — Vol. 3, Issue 3. — P. 40–45.

Estimating Kinematic Parameters of the Tectonic Plate Motion

A. A. Kluykov, S. P. Kuzin

The modern space geodesy techniques (GPS, SLR, VLBI and DORIS) have improved the accuracy in positioning of geodetic network points and identified the new factors which had been considered insignificant before. For example, the tectonic plate motion is among the factors which give us an opportunity to replace the static coordinate system model by the kinematic one. The effect of the tectonic plate motion can be estimated if you know such kinematic parameters as the Euler's vector (angular velocity of the tectonic plate rotation and the coordinates of the rotation poles, i.e. their latitude and longitude). Many modern kinematic models of the tectonic plates use observations based on geophysical methods in order to estimate kinematic parameters of the tectonic plate motion. The article presents an algorithm to estimate the parameters of the tectonic plate motion using observations based on space geodesy techniques. Based on this algorithm, the EULER program has been developed and tested experimentally. The results of the analysis show us that the parameters of the Euler's vector obtained by the EULER program are in good agreement with the results obtained using the ITRF 2005 and the ITRF 2008 models.

Keywords: Euler's vector, motion of tectonic plates, coordinate system, GPS measurements, angular velocity rotation, coordinates of the Euler pole.