

528.481

ПРО ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК НЕРІВНОМІРНОСТІ ОБЕРТОВОГО РУХУ ЗЕМЛІ ТА АНТАРКТИЧНОЇ ТЕКТОНІЧНОЇ ПЛИТИ**К. Р. Третяк, Ф. К. Ф. Аль-Алусі***Національний університет «Львівська політехніка»; kornel@lp.edu.ua, forat1601@mail.ru*

Реферат. Розроблено модифікований алгоритм визначення параметрів полюсу Ейлера і кутової швидкості обертання тектонічної плити із урахуванням безперервності і нерівномірності часових серій щоденних розв'язків перманентних ГНСС станцій. За даними 27 перманентних ГНСС станцій Антарктиди за період 1996—2014 рр. визначено положення середнього полюсу Ейлера і кутової швидкості обертання плити та їх щорічні зміни. Встановлено взаємозв'язок зміни кутових швидкостей обертання Землі і Антарктичної тектонічної плити ω .

О взаимосвязи неравномерности вращательного движения Земли и Антарктической тектонической плиты.
К. Р. Третяк, Ф. К. Ф. Аль-Алуси

Реферат. Разработан модифицированный алгоритм определения параметров полюса Эйлера и угловой скорости вращения тектонической плиты с учетом непрерывности и неравномерности временных серий ежедневных решений перманентных ГНСС станций. По данным 27 перманентных ГНСС станций Антарктиды за период 1996–2014 гг., определено положение среднего полюса Эйлера и угловой скорости вращения плиты и их ежегодные изменения. Установлена взаимосвязь изменения угловых скоростей вращения Земли и Антарктической тектонической плиты ω .

About relationship of uneven of the Earth rotational movement and Antarctic tectonic plate.

K. R. Tretyak, F. K. F. Al-Alusi

Abstract. The modified algorithm for determining the parameters of Euler pole and angular velocity of tectonic plate rotation is developed with regard to continuity and uneven of time series of permanent GNSS stations daily solutions. Using the data from 27 permanent GNSS stations on Antarctic area for the period 1996–2014 years we defined position of middle Euler pole and angular velocity of plate rotation, and their annual changes. The interrelation of angular velocities change of the Earth rotation and Antarctic tectonic plate ω is established.

Вступ

Відомо, що нерегулярності обертання Землі впливають на рівномірність шкали Всесвітнього часу UT. Нерівномірність обертання Землі визначається зміною кутової швидкості обертання і зміщенням положення осі обертання відносно твердої Землі (рухом полюса).

Варіації кутової швидкості обертання є трьох типів: 1) періодичні або квазіперіодичні; 2) вікові; 3) нерегулярні

Причиною періодичної зміни швидкості обертання Землі є земні припливи, викликані гравітацією Сонця і Місяця. Сила притягання Землі Сонцем і Місяцем утворює припливи в корі й океанах і змінює момент інерції Землі. Оскільки момент імпульсу Землі, який є добутком моменту інерції і кутової швидкості обертання, є сталим, то зміна моменту інерції Землі призводить до зміни кутової швидкості обертання Землі. Зміна моменту інерції Землі залежить від взаємного розташування Землі, Сонця і Місяця, яке періодично змінюється. Тому найбільш значні коливання швидкості

обертання Землі мають річний, піврічний, місячний і півмісячний період [Сидоренков Н.С., 2004]. Крім цього, сезонні коливання виникають внаслідок сезонного перерозподілу атмосферних мас і змін моменту імпульсу атмосфери та твердої Землі.

Вікове уповільнення швидкості обертання Землі пов'язане з існуванням припливного тертя в тілі Землі і океанах, що приводить до повільного зменшення кутової швидкості обертання Землі.

Приливні хвилі постійно рухаються по земній поверхні за Місяцем і Сонцем — зі сходу на захід в зворотному напрямку обертання Землі. При цьому в океанах і в тілі планети виникають сили тертя, які гальмують обертання Землі, завдяки чому і відбувається її монотонне вікове уповільнення.

Нерегулярні зміни швидкості Землі відбуваються стрибкоподібно через нерівномірні проміжки часу. Причинами їх прояву можуть бути зміни всередині планети (сильні землетруси, виверження вулканів) та дія позапланетних явищ [Пандул І.С., 2010] (викиди плазми Сонця).

Серед вікових змін обертання Землі виділяють періодичні зміни з довжиною періодів у десятироки років. Десятирічні зміни швидкості обертання Землі занадто великі, щоб їх можна було пояснити, як і сезонні коливання, перерозподілом моменту імпульсу між атмосферою і Землею. Відомо, уповільнення швидкості обертання з 1870 по 1903 року було таким, що момент імпульсу Землі зменшився на $(48 \cdot 1025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1})$. Якби уповільнення відбулося через перерозподіл моменту імпульсу між Землею і атмосферою, то момент імпульсу вітрів в 1870 р був би на $(48 \cdot 1025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1})$ менший, ніж в 1903 р. При цьому швидкість вітрів у атмосфері повинна була збільшитися більш ніж у три рази (за 33 роки західні вітри повинні були поступово підсилитися, а східні – ослабнути приблизно на 20 м / с). Однак настільки великих десятирічних коливань атмосферної циркуляції не помічено. Тому вважають, що довгоперіодична нерівномірність обертання Землі не може спричинитися геофізичними процесами, що протікають у атмосфері. Зазвичай її пов'язують з внутрішніми процесами взаємодії ядра, мантії та земної кори. Крім цього, на довгоперіодичні зміни обертального руху Землі можуть мати вплив переноси водних мас з океану на льодовиковий покрив Антарктиди та Гренландії, а також дрейф літосферних плит. Для цього в даній роботі зроблена спроба дослідити можливу наявність взаємозв'язку між нерівномірністю обертального руху Землі і Антарктичної тектонічної плити.

Мета роботи:

- 1) дослідити кінематичні параметри Антарктичної плити та щорічні зміни її кутової швидкості обертання та положення полюсу Ейлера за даними постійних ГНСС-станцій;
- 2) порівняти зміни кутової швидкості обертання Землі із нерівномірностями обертального руху Антарктичної плити.

Результати досліджень

Для дослідження обертального руху Антарктичної тектонічної плити були використані результати вимірів 27-ми ГНСС-станцій Антарктиди за період 1996–2014 рр (рис. 1).



Рис. 1. Схема розміщення постійних ГНСС-станцій Антарктиди

В табл. 1 приведено геодезичні координати станцій. Всі результати вимірів були відібрані з бази даних ГНСС-вимірів Геодезичної лабораторії NGL (The Nevada Geodetic Laboratory) [<http://geodesy.unr.edu/index.php>].

Таблиця 1

Координати ГНСС-станцій Антарктиди

Назва станції	B, °	L, °	H, м	Назва станції	B, °	L, °	H, м
BRIP	-75.80	-201.53	2110.910	IGGY	-83.31	-203.75	1898.167
BURI	-79.15	-204.11	2006.304	LWN0	-81.35	-207.27	1528.537
CAS1	-66.28	-249.48	22.443	MAW1	-67.60	-297.13	59.141
CLRK	-77.34	-141.87	999.827	MIN0	-78.65	-192.84	676.908
COTE	-77.81	-198.00	1878.395	PALV	-64.78	-64.05	31.135
CRAR	-77.85	-193.33	-19.811	RAMG	-84.34	-181.95	1062.348
DEVI	-81.48	-198.02	67.011	ROB4	-77.03	-196.81	-41.611
DUM1	-66.67	-220.00	-1.326	SCTB	-77.85	-193.24	-18.926
DUPT	-64.80	-62.82	43.466	SDLY	-77.14	-125.97	2097.301
FALL	-85.31	-143.63	260.186	SYOG	-69.01	-320.42	50.011
FLM5	-77.53	-199.73	1869.726	VESL	-71.67	-2.84	862.380
FTP4	-78.93	-197.44	243.223	VNAD	-65.25	-64.25	20.990
HOOZ	-77.53	-193.07	2070.409	WHN0	-79.85	-205.78	2192.643
HUGO	-64.96	-65.67	20.638				

Рис. 1 демонструє, що розташування ГНСС-станцій є нерівномірним, що обумовлено труднощами у освоєнні Антарктиди. Крім цього, зібрані результати вимірів так само мають нерівномірну цілісність і розподіл у часі. В табл. 2 наведено для кожної станції наявність кількості щоденних розв'язків по роках спостережень.

Проаналізувавши табл. 2, можна побачити, що п'ять ГНСС-станцій – CAS1, DUM1, MAW1, SYOG, VESL – мають найдовші ряди спостережень тривалістю до 20 років. Починаючи з 2010 року, накопичення даних є практично рівномірним і суцільним.

Таблиця 2

Розподіл кількості щоденних розв'язків по роках спостережень для перманентних ГНС-станцій Антарктиди.

Назва\Роки	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
BRIP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	364	365	360	365	364	365	361
BURI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	365	365	365	365	365	365	361
CASI	306	277	297	190	365	362	364	365	358	365	362	359	330	339	315	347	358	360	343
CLRK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	361	365	365	365	360
COTE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	337	365	365	365	364	365	361
CRAR	0	0	0	0	0	0	197	340	359	359	362	359	353	352	351	343	346	337	335
DEVI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	365	365	217	365	365	362
DUM1	0	0	250	201	354	360	308	301	213	360	348	358	352	240	315	361	253	354	77
DUPT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	272	365	363	363	365	363
FALL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	327	280	226	365	257
FLM5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	364	365	365	365	365	364	354	110	70
FTP4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	311	365	365	365	365	365	365	365	363
HO0Z	0	0	0	0	0	0	0	160	274	313	344	99	5	35	354	350	347	255	124
HUGO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	75	263	290	309	365	143
IGGY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	190	219	264	365	365	362
LWN0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	123	360	365	363	365	44	341
MAW1	231	313	344	340	361	357	349	351	333	362	332	359	294	330	319	345	343	355	359
MIN0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	364	365	182	365	365	362
PALV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	249	364	361	365	357	275
RAMG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	326	365	365	365	365	365	361
ROB4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	365	365	365	364	365	365	364	316	361
SCTB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	330	365	365	365	365	172	364	365	365	358
SDLY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	229	365	365	365	361
SYOG	320	306	334	314	352	334	358	365	365	365	363	361	364	359	364	337	365	356	354
VESL	0	0	139	346	281	162	212	327	275	262	161	283	308	267	312	360	348	58	39
VNAD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	274	365	365	365	357	365
WHN0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	226	365	365	365	365	365	362

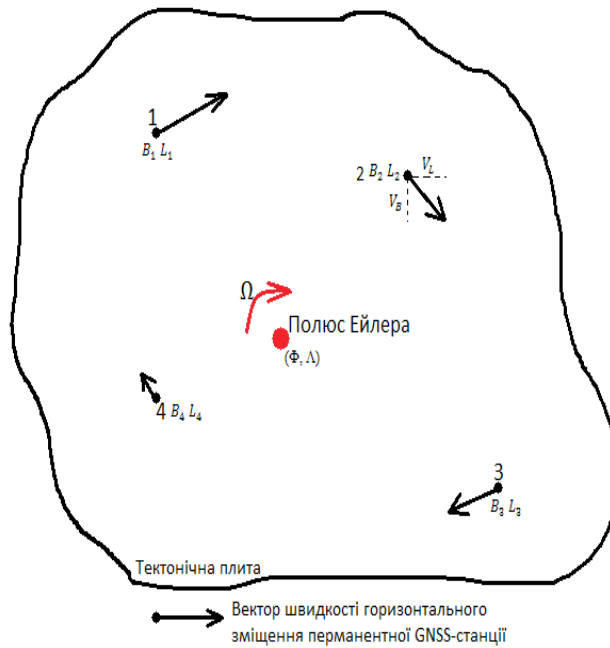


Рис. 2. Зображення полюсу Ейлера

Зв'язок швидкості зміщення постійної GNSS-станції з координатами полюсу Ейлера та її кутовою швидкістю обертання в геодезичних координатах можна представити наступними виразами:

$$V_B = \Omega \cdot \cos(\Phi) \cdot \sin(L - \Lambda) \quad (1)$$

$$V_L = \Omega \cdot (\sin(\Phi) \cdot \cos(B) - \cos(\Phi) \cdot \sin(B) \cdot \cos(L - \Lambda)) \quad (2)$$

де Ω — кутова швидкість обертання тектонічної плити; Φ, Λ — координати полюсу Ейлера; B, L — координати постійної GNSS-станції з визначеними швидкостями зміщень у широтному та довготному напрямках V_B, V_L .

Для кожного пункту з сукупності постійних станцій можна скласти нелінійні рівняння 1 і 2. В цих рівняннях є три невідомі: координати полюсу Ейлера (Φ, Λ) та кутова швидкість обертання плити (Ω). Залежно від кількості пунктів ми будемо мати подвоєну кількість рівнянь, отже, кількість рівнянь є завжди більшою за кількість невідомих (при $n \geq 2$, де n — кількість пунктів). У зв'язку з цим визначення невідомих параметрів (Ω, Φ, Λ) виконується за способом найменших квадратів [Третяк К. Р., Вовк А. І.].

Для цього диференціюємо рівняння 1 і 2 приводимо їх до лінійного виду.

$$\delta_{\dot{\Omega}} \left(\frac{dV_B}{d\Omega} \right) - \delta_{\Phi} \cdot \left(\frac{dV_B}{d\Phi} \right) - \delta_{\Lambda} \cdot \left(\frac{dV_B}{d\Lambda} \right) + (V_{B_0} - V_B) = v_B \quad (3)$$

$$\delta_{\dot{\Omega}} \cdot \left(\frac{dV_L}{d\Omega} \right) - \delta_{\Phi} \cdot \left(\frac{dV_L}{d\Phi} \right) - \delta_{\Lambda} \cdot \left(\frac{dV_L}{d\Lambda} \right) + (V_{L_0} - V_L) = v_L \quad (4)$$

де δ_Ω , δ_Φ , δ_Λ — поправки в наближені значення параметрів полюса Ейлера (Ω_0 , Φ_0 , Λ_0);
 $(\Omega_0, \Phi_0, \Lambda_0)$; $\frac{dV_B}{d\Omega}$, $\frac{dV_B}{d\Phi}$, $\frac{dV_L}{d\Lambda}$, $\frac{dV_L}{d\Phi}$, $\frac{dV_B}{d\Lambda}$, — часткові похідні V_{B_0} ; V_{L_0} та — наближене зна-

чення проєкції вектора швидкості абсолютного горизонтального зміщення ГНСС-станції у широтному та довготному напрямках, обчислені за наближеними значеннями параметрів полюса Ейлера; V_B та V_L — виміряні значення вектора швидкості абсолютного горизонтального зміщення ГНСС-станції у широтному та довготному напрямках.

$$\frac{dV_B}{d\Omega} = \sin(L - \Lambda) \cdot \cos(\Phi) \quad (5)$$

$$\frac{dV_B}{d\Phi} = -\Omega \cdot \sin(L - \Lambda) \cdot \sin(\Phi) \quad (6)$$

$$\frac{dV_B}{d\Lambda} = -\Omega \cdot \cos(L - \Lambda) \cdot \cos(\Phi) \quad (7)$$

$$(8) \quad \frac{dV}{d\Omega} = \cos(B) \cdot \sin(\Phi) - \cos(L - \Lambda) \cdot \sin(B) \cdot \cos(\Phi)$$

$$\frac{dV_L}{d\Phi} = \Omega(\cos(B) \cdot \cos(\Phi) + \cos(L - \Lambda) \cdot \sin(B) \cdot \sin(\Phi)) \quad (9)$$

$$\frac{dV_L}{d\Lambda} = -\Omega \cdot \sin(L - \Lambda) \cdot \sin(B) \cdot \cos(\Phi) \quad (10)$$

Підставивши похідні (5) — (10) у рівняння (3), (4) отримаємо рівняння поправок виду (11) та (12).

$$\begin{aligned} & \delta_\Omega \cdot (\sin(L - \Lambda_0) \cdot \cos(\Phi_0)) - \delta_\Phi \cdot (\Omega_0 \cdot \sin(L - \Lambda_0) \cdot \sin(\Phi_0)) - \\ & - \delta_\Lambda \cdot (\Omega_0 \cdot \cos(L - \Lambda_0) \cdot \cos(\Phi_0)) + \\ & + \Omega_0 \cdot \cos(\Phi_0) \cdot \sin(L - \Lambda_0) - (V_{B_0} - V_B) = v_B \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \delta_\Omega \cdot (\cos(B) \cdot \sin(\Phi_0) - \cos(L - \Lambda_0) \cdot \sin(B) \cdot \cos(\Phi_0)) + \\ & + \delta_\Phi \cdot (\Omega_0 \cdot (\cos(B) \cdot \cos(\Phi_0) + \cos(L - \Lambda_0) \cdot \sin(B) \cdot \sin(\Phi_0))) - \\ & - \delta_\Lambda \cdot (\Omega_0 \cdot \sin(L - \Lambda_0) \cdot \sin(B) \cdot \cos(\Phi_0)) + \\ & + \Omega_0 \cdot (\sin(\Phi_0) \cdot \cos(B) - \cos(\Phi_0) \cdot \sin(B) \cdot \cos(L - \Lambda_0)) - (V_{L_0} - V_L) = v_L \end{aligned} \quad (12)$$

Для визначення складових векторів швидкостей горизонтальних зміщень та ми використаємо часові серії, тобто щоденні розв'язки перманентної ГНСС станції (рис. 3).

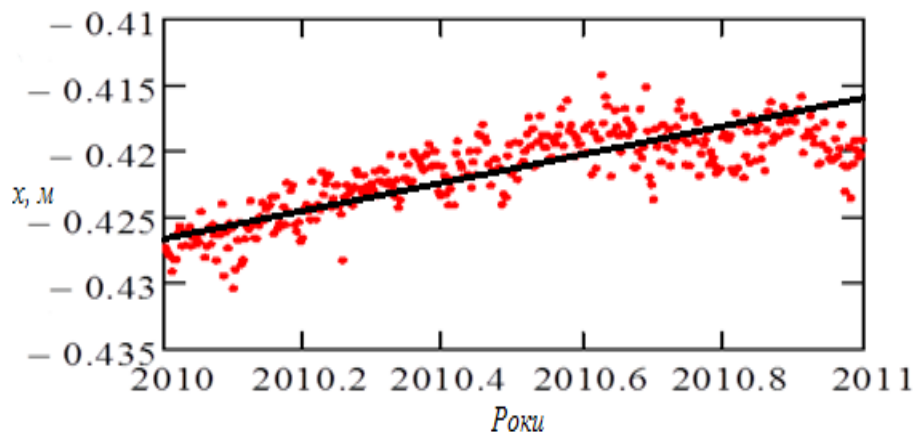


Рис. 3. Приклад часової серії щоденних розв'язків перманентної ГНСС станції.

Для кожного розв'язку за координатами складаємо лінійні рівняння:

$$x_i = V_B \cdot t_i + c_B \quad (13)$$

$$y_i = V_L \cdot t_i + c_L \quad (14)$$

де t_i — епоха спостереження, c_B і c_L — постійні.

За способом найменших квадратів розв'язуємо окремо системи рівнянь (13) і (14) та визначаємо складові векторів швидкостей горизонтальних зміщень V_B та V_L і виконуємо оцінку точності визначених параметрів m_{V_B} та m_{V_L} .

Вага кожного рівняння (13–14) залежить від безперервності та рівномірності розподілу даних протягом часу спостережень. На рис. 4 представлена безперервна часова серія щоденних розв'язків. Вага безперервності та рівномірності розподілу даних такої часової серії рівна 1. На рис. 5 представлена часова серія із розривами у результатах спостережень, а на (рис. 6) представлена часова серія зі розривами даних та нерівномірним їх розподілом на інтервалі спостережень. Відповідно вага цих часових серій буде відмінною від 1. Для обчислення їх ваг необхідно знайти довжину інтервалу спостережень

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (15)$$

де t_1 , t_2 — відповідно епоха початку та кінця спостережень.

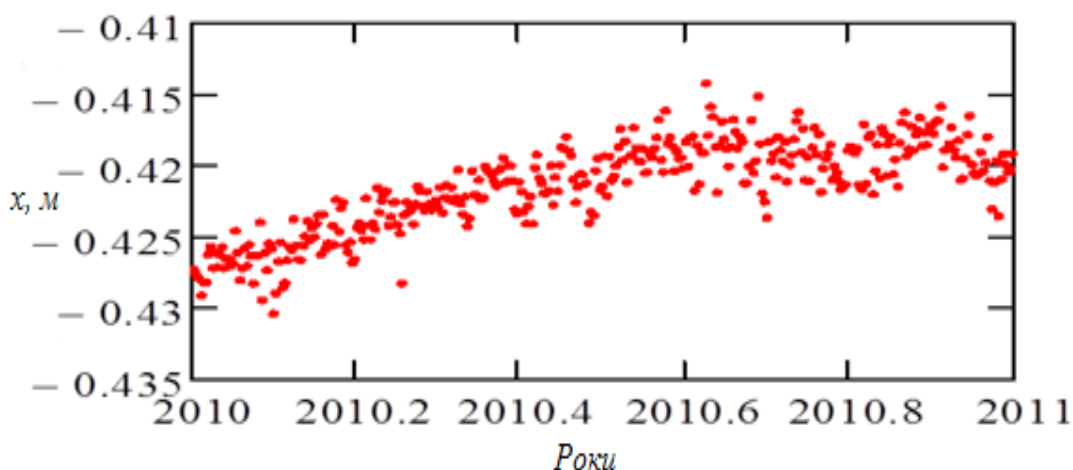


Рис. 4. Безперервна часова серія щоденних розв'язків перманентної ГНСС-станції за період 2010 — 2011 рр.

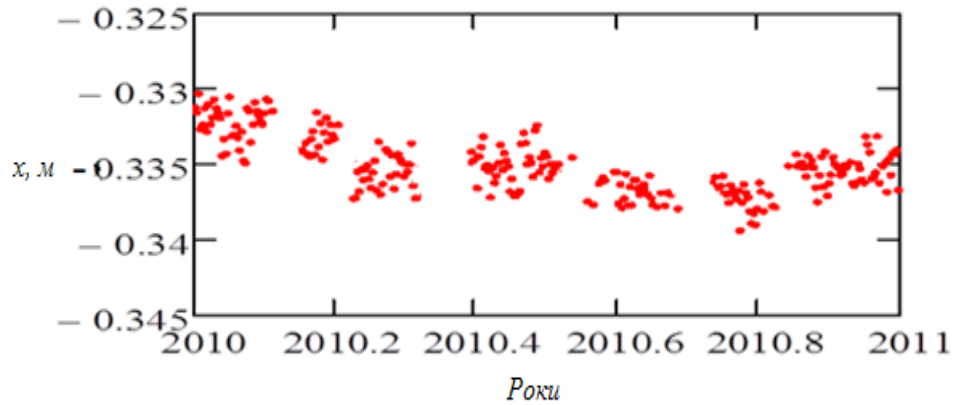


Рис. 5. Розриви в часовій серії щоденних розв'язків перманентної ГНСС- станції за період 2010 — 2011 рр.

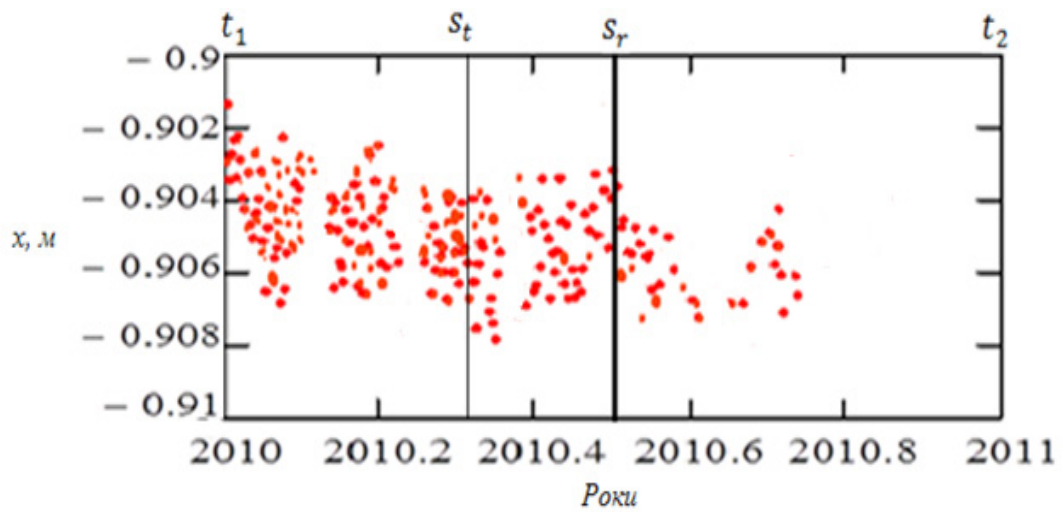


Рис. 6. Часова серія з розривами та нерівномірністю розподілу щоденних розв'язків перманентної ГНСС-станції

Визначаємо середню довжину усього інтервалу спостережень незалежно від кількості розв'язків:

$$s_r = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (16)$$

Визначаємо середню епоху усіх наявних розв'язків:

$$s_r = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (17)$$

де t_i — епоха i -го розв'язку, n — кількість розв'язків, яка може не збігатися з середньою довжиною інтервалу спостережень s_r (рис. 6).

Вагу за нерівномірність даних обчислюють як

$$P_1 = 1 - \frac{2|s_r - s_t|}{\Delta t}, \quad (18)$$

Чим більше відхилення, тобто різниця $s_r - s_t$, тим менша вага, але якщо $s_r = s_t$, то вага буде рівна одиниці. Для знаходження ваги за безперервність даних використаємо наступний вираз:

$$P_2 = 1 - \frac{4\left|\frac{\Delta t}{4} - \delta t\right|}{\Delta t}, \quad (19)$$

де $\delta t = \frac{\sum |t_i - s_t|}{n}$ — сума середнього відхилення епох усіх наявних розв'язків від s_t .

Кінцеву вагу кожного складової вектора V_B та V_L , обчислюємо за виразом

$$P = \frac{P_1 P_2}{m^2}, \quad (20)$$

де P_1 — вага за нерівномірність даних, P_2 — вага за безперервність даних, m^2 — відповідно с.к.п. відхилення m_{V_B} та m_{V_L} .

Для кожної визначеної складової вектора та z відповідними вагами, використовуючи наближені значення параметрів полюса Ейлера ($\Omega_0, \Phi_0, \Lambda_0$) складаємо рівняння поправок (11—12). Розв'язуючи складену систему рівнянь за способом найменших квадратів визначаємо поправки ($\delta_0, \delta_\Phi, \delta_\Lambda$), та обчислюємо остаточні значення координат полюса Ейлера та кутової швидкості обертання плити (Ω, Φ, Λ)

$$\Omega = \Omega_0 + \delta_\Omega \quad (21)$$

$$\Phi = \Phi_0 + \delta_\Phi \quad (22)$$

$$\Lambda = \Lambda_0 + \delta_\Lambda, \quad (23)$$

За остаточними параметрами знаходимо модельні швидкості зміщення ГНСС — станцій. За урівноваженими значення параметрів полюса Ейлера (Ω, Φ, Λ) визначаємо їх оцінку точності

$$m_{\Omega} = \mu \cdot \sqrt{Q_{\Omega\Omega}} \quad (25)$$

$$m_{\Phi} = \mu \cdot \sqrt{Q_{\Phi\Phi}} \quad (26)$$

$$m_{\Lambda} = \mu \cdot \sqrt{Q_{\Lambda\Lambda}}, \quad (27)$$

де: $Q_{\Omega\Omega}, Q_{\Phi\Phi}, Q_{\Lambda\Lambda}$ — діагональні елементи кореляційної матриці, $\mu = \sqrt{v^T \cdot \frac{v}{2n-1}}$ — похибка оди-

ниці ваги виміряних векторів, v — відхилення модельних значень швидкостей зміщення перманентних ГНСС-станцій у широтному та довготному напрямках від виміряних.

На підставі описаного алгоритму було визначено складові векторів горизонтальних швидкостей перманентних ГНСС-станцій Антарктичної тектонічної плити, їх точність та вагу на весь період спостережень (табл. 3).

Таблиця 3

**Складові векторів швидкостей горизонтальних зміщень
 перманентних ГНСС станцій за період 1996 — 2014 рр.**

№	Назва станції	$B, ^\circ$	$L, ^\circ$	$V_B, \text{мм}$	$V_L, \text{мм}$	$m_{V_B}, \text{мм}$	$m_{V_L}, \text{мм}$	P_B	P_L
1	BRIP	-75.796	158.469	-12	8	2.5	2.5	0.336	0.336
2	BURI	-79.147	155.894	-12	6	2.2	2.4	0.337	0.337
3	CAS1	-66.283	110.52	-10	2	0.7	0.8	0.968	0.966
4	CLRK	-77.34	218.126	-3	17	4.9	4.4	0.222	0.222
5	COTE	-77.806	161.998	-12	8	2.5	2.3	0.329	0.329
6	CRAR	-77.848	166.668	-11	9	0.9	1.1	0.637	0.647
7	DEVI	-81.477	161.977	-12	7	3.0	3.2	0.301	0.284
8	DUM1	-66.665	140.002	-12	8	1.1	1.0	0.867	0.868
9	DUPT	-64.805	297.183	10	12	3.8	3.4	0.264	0.264
10	FALL	-85.306	216.368	-6	12	4.7	4.5	0.238	0.227
11	FLM5	-77.533	160.271	-12	8	1.6	1.7	0.412	0.489
12	FTP4	-78.928	162.565	-12	8	1.4	1.5	0.439	0.437
13	HOOZ	-77.532	166.933	-11	11	1.3	1.7	0.712	0.575
14	HUGO	-64.963	294.332	10	15	4.7	4.3	0.244	0.225
15	IGGY	-83.307	156.25	-13	4	3.7	5.0	0.297	0.257
16	LWN0	-81.346	152.732	-12	5	3.2	3.3	0.255	0.349
17	MAW1	-67.605	62.871	-2	-4	0.6	0.6	0.979	0.985
18	MIN0	-78.65	167.164	-11	9	4.2	4.6	0.302	0.281
19	PALV	-64.775	295.949	10	13	4.8	3.6	0.260	0.261
20	RAMG	-84.338	178.047	-11	9	2.4	2.3	0.327	0.327
21	ROB4	-77.034	163.19	-12	9	1.4	1.6	0.442	0.457
22	SCTB	-77.849	166.758	-12	9	1.4	1.3	0.511	0.502
23	SDLY	-77.135	234.025	1	19	7.4	5.1	0.214	0.208
24	SYOG	-69.007	39.584	3	-4	0.7	0.6	0.981	0.979
25	VESL	-71.674	357.158	10	0	0.7	0.7	0.858	0.871
26	VNAD	-65.246	295.746	10	13	3.9	3.7	0.263	0.265
27	WHN0	-79.846	154.22	-12	5	2.6	2.6	0.321	0.318

З табл. 3 видно, що точність визначення складових векторів складає середньому 10% від довжини вектора. На рис. 7 зображено рух векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС станцій Антарктичної тектонічної плити за період з 1996 р. по 2014 р. Розташування векторів зміщень має ротаційний характер за напрямом руху годинникової стрілки.

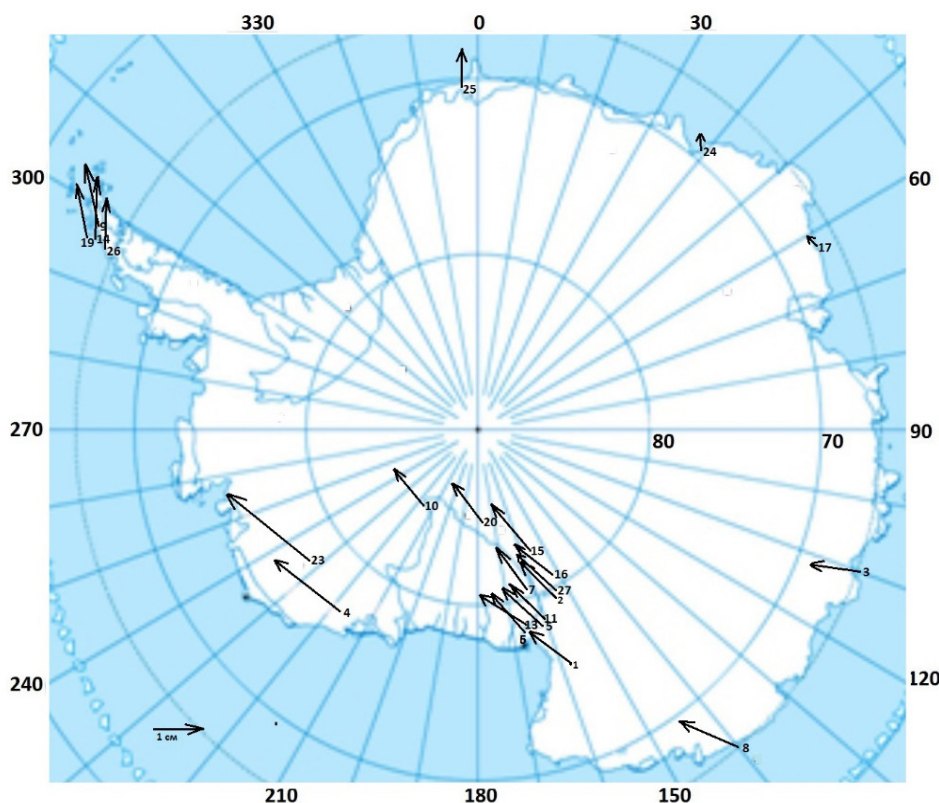


Рис. 7. Рух векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС станцій Антарктичної тектонічної плити за період з 1996 р. по 2014 р.

На весь період спостережень обчислено середню кутову швидкість обертання плити та координати середнього полюсу Ейлера, визначено їх оцінку точності та ср. кв. похибку визначення модельних векторів горизонтальних швидкостей $m_{V_{\text{точ}}}$ (табл. 4).

Таблиця 4

Середня кутова швидкість обертання Антарктичної тектонічної плити та координати середнього полюса Ейлера визначені за даними ГНСС вимірів на перманентних станціях за період 1996 — 2014 рр.

ω , °/рік (кутових секундах за рік)	0.00075
Φ , ° полюсу Ейлера	58.4211
Λ , ° полюсу Ейлера	53.2085
m_{ω} , °/рік (кутових секундах за рік)	0.000009
m_{Φ} , °	0.289
m_{Λ} , °	0.386
$m_{V_{\text{точ}}}$, мм	0.8

Точність визначення кутової швидкості обертання плити на два порядки менша за саме значення швидкості, а точність визначення векторів горизонтальних швидкостей перебуває у межах 1 мм. Положення середнього полюсу Ейлера за період (1996–2014) показано на рис. 8.

На рис. 8 наведено положення полюсів Ейлера, визначених як середній за період (1996–2014) та іншими моделями кінематики літосферних плит APKIM-2000, SOPAC, NNR-NUVEL-1A, [Третяк К. Р., Голубінка Ю. І., 2006, Марченко О. М., Третяк К. Р. та ін., 2012, Dietrich R., 2001] і SCAR, REVEL 2000, ENS 97 [Jiang Wei-Ping, 2009].

Слід зауважити, що визначений нами полюс Ейлера розташований практично з полюсом визначеним SCAR за період (1997–2004).

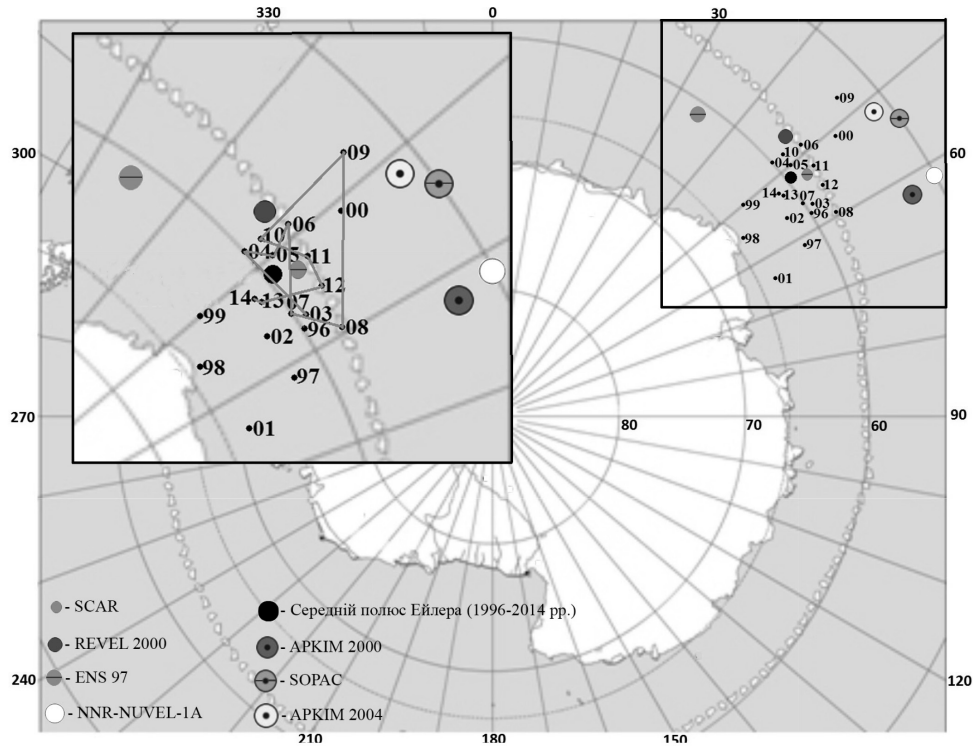


Рис. 8. Рух полюса Ейлера Антарктичної тектонічної плити за результатами ГНСС вимірів (1996–2014).

За результатами обчислення річних швидкостей горизонтальних зміщень перманентних станцій (період 1996–2014 р) визначено щорічні параметри полюсу Ейлера Антарктичної плити та її кутової швидкості (табл. 5). Щорічну міграцію положення полюсу Ейлера зображено на рис. 8. На рис. 9 а, б, в представлено графіки щорічних змін широти та довготи полюсу Ейлера та кутової швидкості обертання плити.

Таблиця 5

Визначення щорічних параметрів полюсу Ейлера, кутової швидкості та їх оцінки точності за результатами ГНСС вимірів з 1996 р. по 2014 р.

Роки	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
ω , "/рік	0.00082	0.00118	0.00104	0.00083	0.00078	0.00083	0.00090	0.00080	0.00073	0.00074
Φ , °	60.7776	62.807	66.3516	64.3746	55.0378	65.4897	62.277	59.9986	60.1678	58.5402
Λ , °	57.0776	61.413	55.819	50.3325	51.84	64.5556	56.6911	57.118	48.1944	50.0889
m_{ω} , "/рік	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.00004	0.00004	0.00002
m_{Φ} , °	1.9052	0.9123	2.7606	1.6352	2.5384	1.3573	1.6645	1.4356	1.3695	0.7366
m_{Λ} , °	3.1847	1.5563	8.0076	3.6375	3.4286	3.5377	3.0341	2.1659	2.0484	1.0804
$m_{V_{\text{тон}}}$, ММ	0.8	0.7	7.6	2.8	1.4	1.3	2.6	1.2	0.9	4.0

Роки	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
ω , "/рік	0.00075	0.00077	0.00079	0.00072	0.00076	0.00080	0.00070	0.00086	0.00080
Φ , °	57.2516	60.4786	57.1111	53.334	59.3266	57.5323	57.2313	61.6613	61.2197
Λ , °	49.9822	56.8593	59.7934	47.8922	48.5171	52.1939	55.383	53.9952	53.1236
m_ω , "/рік	0.00003	0.00002	0.00003	0.00002	0.00003	0.00003	0.00002	0.00002	0.00003
m_Φ , °	1.5485	0.8679	1.1793	1.3285	1.4084	1.4247	1.3735	1.0962	1.5191
m_Λ , °	1.6932	1.1579	1.0772	0.913	1.4242	1.3101	1.2815	1.1385	1.5995
$m_{V_{\text{точ}}}$, мм	1.0	6.2	12.1	6.7	3.1	2.5	1.3	3.0	4.9

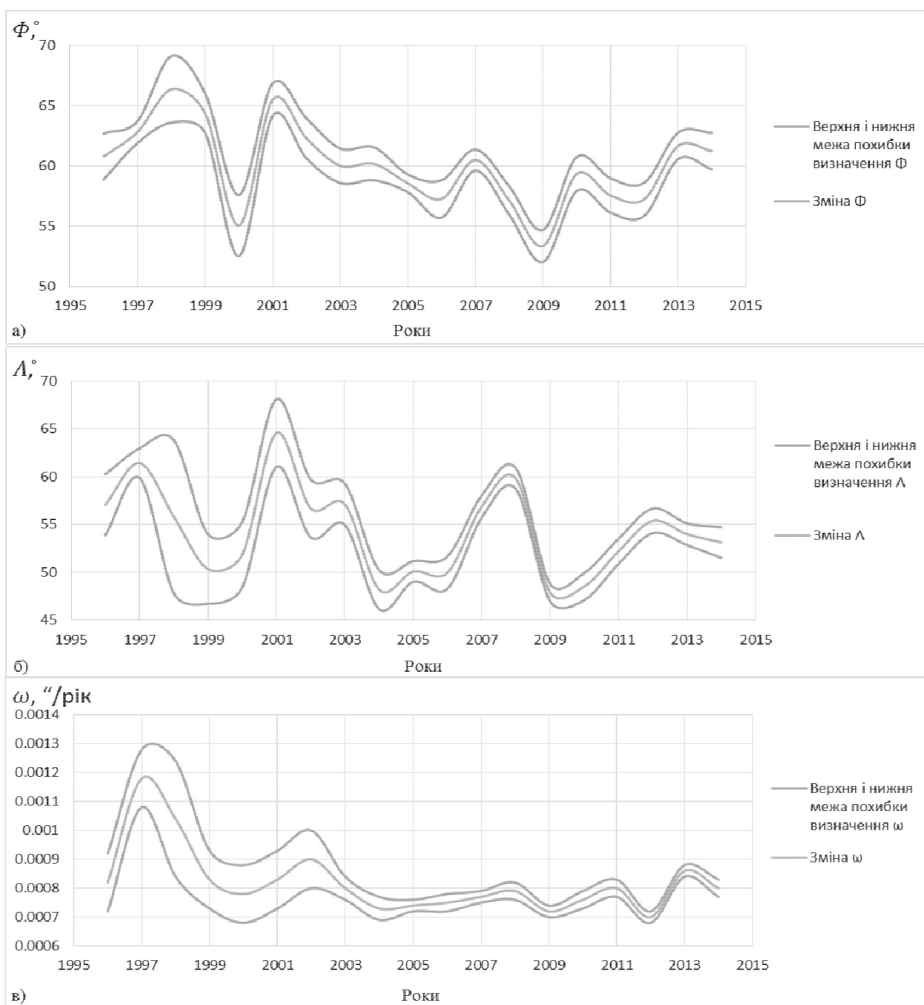


Рис. 9 (а, б, в). Зміна середньорічних параметрів полюсу Ейлера Антарктичної тектонічної плити та кутової швидкості обертання Землі за період 1994 – 2014 рр.: а) широти Φ , б) довготи Λ , в) кутової швидкості Антарктичної тектонічної плити ω ,

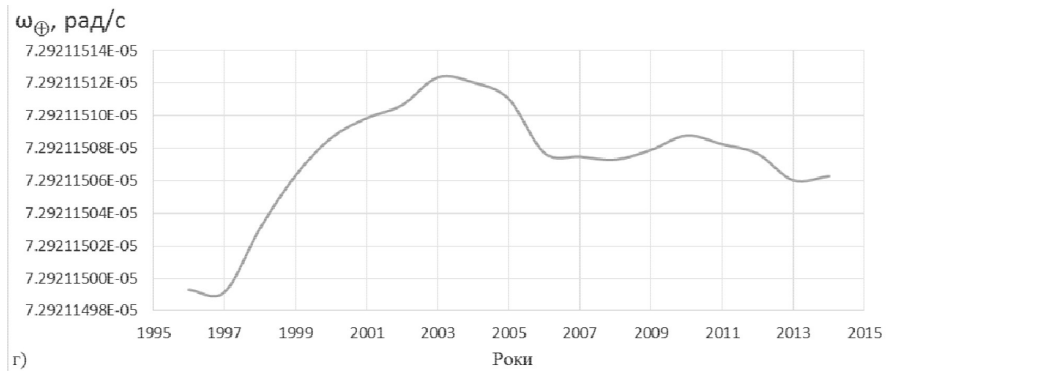


Рис. 9 (г). Зміна середньорічних параметрів полюсу Ейлера Антарктичної тектонічної плити та кутової швидкості обертання Землі за період 1996 – 2014 рр.: г) кутової швидкості обертання Землі ω_{\oplus} .

Необхідно зауважити наявність взаємозв'язку між зміною широти полюсу Ейлера та кутової швидкості обертання тектонічної плити. При зменшенні кутової швидкості зменшується широта полюсу Ейлера і відповідно навпаки. Одночасною зміною цих параметрів корегується момент імпульсу Антарктичної тектонічної плити.

З метою встановлення можливого зв'язку між нерівномірністю обертових рухів Землі і антарктичної тектонічної плити виконано розрахунок зміни середньорічної кутової швидкості Землі. Для цього нами використано дані Міжнародної служби обертання Землі (IERS) про зміну значення LOD (Length of Day), що визначаються в мс (мілісекундах) як різниця величин періодів ($P_z - P_a$), де P_a — період астрономічної доби (86400 с.), а P_z — період земної доби (рис 10). За осередненими річними значеннями LOD обчислено середню щорічну кутову швидкість обертання Землі

$$\omega_{\oplus} = \Omega_N (1 - LOD / T),$$

де $\Omega_N = 72921151.467064 \cdot 10^{-12}$ рад/с є номінальна швидкість обертання (відповідає швидкості обертання середньої епохи 1820 р.), T – тривалість середньої сонячної доби 86400 с. TAI.

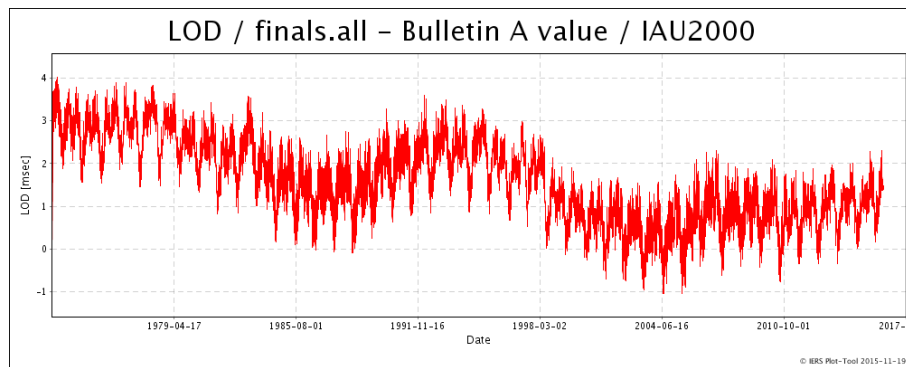


Рис 10. Зміна параметра LOD за даними IERS.

Результати обчислення зміни середньорічної швидкості обертання Землі ω_{\oplus} представлені на рис. 9г. Порівнюючи зміну кутових швидкостей обертання Землі ω_{\oplus} і Антарктичної тектонічної плити, можна зауважити, що при збільшенні ω_{\oplus} кутова швидкість ω зменшується і навпаки. Цю закономірність так само можна пояснити законом збереження моменту імпульсу. Момент кількості руху у замкненій системі (літосфера, мантія і ядро Землі) зберігається під час еволюції цієї системи з часом. Зменшення моменту імпульсу системи ядро-мантія компенсується збільшенням моменту імпульсу літосфери (тектонічних плит).

Аналогічні залежності проявляються у системі Земля — атмосфера. Періодичні варіації швидкості обертання Землі з періодом від декількох днів до декількох років викликаються зміною кутового моменту атмосфери. Причиною нерегулярних варіацій можуть бути різні процеси. Найбільш відоме явище Ель-Ніньо (переміщення мас повітря над тропічними частинами Індійського і Тихого океанів в екваторіальній зоні через аномальний розподіл температури верхніх шарів води в океанах). Аномально велика зміна швидкості обертання Землі в 1983 році викликана якраз потужним явищем Ель-Ніньо. [Коновалов Г. В., 2009, Жаров В. Е., 2002, Зотов Л. В., 2005]

Висновки

1. Розроблено модифікований алгоритм визначення параметрів полюсу Ейлера і кутової швидкості обертання тектонічної плити із урахуванням безперервності і нерівномірності часових серій щоденних розв'язків перманентних ГНСС станцій.

2. Із використанням результатів щоденних розв'язків 27 перманентних ГНСС станцій Антарктиди за період 1996–2014 рр. визначено положення середнього полюсу Ейлера, кутової швидкості обертання плити та їх щорічні зміни.

3. Встановлено наявність взаємозв'язку між щорічною зміною широти полюсу Ейлера та кутовою швидкістю обертання тектонічної плити ω . Очевидно, зміною цих параметрів корегується момент імпульсу Антарктичної тектонічної плити.

4. Встановлено взаємозв'язок зміни кутових швидкостей обертання Землі ω_{\oplus} і Антарктичної тектонічної плити ω . При збільшенні ω_{\oplus} рад/с кутова швидкість ω зменшується і навпаки. Цю закономірність так само можна пояснити законом збереження моменту імпульсу. Момент кількості руху в замкненій системі (літосфера, мантія і ядро Землі) зберігається під час еволюції цієї системи з часом. Зменшення моменту імпульсу системи ядро–мантія компенсується збільшення моменту імпульсу літосфери (тектонічних плит). Аналогічний взаємозв'язок уже встановлено у системі Земля — атмосфера.

Література

1. **Жаров В. Е.**, Сферическая астрономия. М., 2002.
2. **Зотов Л. В.** Вращение Земли: анализ вариаций и их прогнозирование // Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, МГУ. — М., 2005. — С. 10.
3. **Коновалов Г. В.**, Меккель А. М. Шкалы времени: история, регламентация в рекомендациях МСЭ и воплощение в моделях // Наукові записки УНДІЗ. — 2009. — № 3 (11). — С. 16.
4. **Марченко О. М.**, Третьяк К. Р., Кульчицький А. Я., Голубінка Ю. І., Марченко Д. О., Третьяк Н. П. Дослідження гравітаційного поля, топографії океану та рухів земної кори в регіоні Антарктики. Львів, Видавництво Львівської політехніки. — 2012. — С. 306.
5. **Пандул И. С.** Геодезическая астрономия применительно к решению инженерно-геодезических задач. СПб.: Политехника, 2010.
6. **Сидоренков Н. С.** Природа нестабильностей вращения Земли // Природа. — 2004. — № 8. — С. 8 — 18.
7. **Третьяк К. Р.**, Голубінка Ю. І. Оцінка та диференціація рухів Земної кори Антарктиди // УАЖ. — 2006. — № 4 — 5. — С. 72 — 83.
8. **Третьяк К. Р.**, Вовк А. І. Диференціація ротаційних рухів земної кори Європейського континенту. https://www.irsm.cas.cz/index_en.php?page=acta_detail_doi&id=147
9. **Dietrich R.**, Dach R., Engelhardt G. ITRF coordinates and plate velocities from GPS campaigns in Antarctica — an analysis based on different individual solutions // Journal of Geodesy Vol.74, No.11, 2001. — P. 756 — 766.
10. **Jiang Wei-Ping.** New Model of Antarctic Plate Motion and Its Analysis // Chinese Journal of Geophysics. Vol. 52. No. 1, 2009. — P. 23 — 32.
11. **Nevada** Geodetic Laboratory. <http://geodesy.unr.edu/index.ph>