

ВИЗНАЧЕННЯ СУЧАСНИХ РОТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ОСНОВНИХ ТЕКТОНІЧНИХ ПЛИТ НА ОСНОВІ ГНСС-ДАНИХ

Основна мета роботи – визначення та аналіз сучасних ротаційних параметрів основних тектонічних плит на основі вимірювань перманентних ГНСС-станцій для періоду 2002–2021 рр. Із використанням процедур, що ґрунтуються на методі найменших квадратів, запропоновано та реалізовано у програмному пакеті MathCAD алгоритм визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій. Цей алгоритм використовує, узагальнює та модернізує підходи, наведені у попередніх дослідженнях. Структурно запропонований алгоритм складається із п’яти послідовних етапів: трансформація даних у внутрішній формат; перевірка на відповідність вимогам та фільтрація часових рядів; визначення швидкостей горизонтальних зміщень; перевірка на відповідність вимогам та фільтрація визначених швидкостей; визначення ротаційних параметрів. Алгоритм передбачає використання наявних у вільному доступі часових рядів щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій або будь-яких інших даних, підготовлених у аналогічному форматі. Розроблено алгоритм визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій. Алгоритм апробовано для визначення сучасних ротаційних параметрів основних тектонічних плит. Визначено складові векторів сучасних горизонтальних зміщень 3169 перманентних ГНСС-станцій, розташованих на семи великих, семи середніх та трьох мікроплитах, для періоду 2002–2021 рр. у системі координат ITRF2014/IGS14. Точність визначення складових векторів горизонтальних зміщень у межах 0,9–6,4 мм та становить у середньому 10–15 % від довжини вектора. Побудовано карто-схему просторового розподілу поля швидкостей сучасних горизонтальних рухів перманентних ГНСС-станцій. Визначено сучасні ротаційні параметри основних тектонічних плит для 2002–2021 рр. у системі координат ITRF2014/IGS14. Встановлено, що загалом отримані значення сучасних ротаційних параметрів добре корелюють із відомими моделями рухів тектонічних плит. Це підтверджує правильність вибраного методу, а також достовірність отриманих результатів. Сучасні ротаційні параметри тектонічних плит є основою для моделювання та аналізу глобальних, регіональних та локальних геодинамічних процесів, тому їх точне визначення – актуальне завдання, яке необхідно виконати. Альтернативною, а останнім часом і практично незамінною основою для визначення таких параметрів є ГНСС-дані. Стрімке збільшення кількості перманентних ГНСС-станцій, а також висока якість їх вимірювань сприяють підвищенню точності визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит, але призводять до необхідності їх постійного переобчислення та уточнення. Запропонований алгоритм та отримані результати можна використати для розроблення нових та уточнення наявних моделей рухів тектонічних плит та систем координат, а також для прогнозування рухів земної кори.

Ключові слова: ротаційні параметри; основні тектонічні плити; часові ряди щоденних розв’язків; перманентні ГНСС-станції; система координат ITRF2014/IGS14.

Вступ

Відомо, що рух тектонічних плит на поверхні сферичної Землі можна представити, використовуючи теорему обертання Ейлера [Euler, 1776]: тверде тіло, закріплене в одній точці, можна перевести із одного положення в інше за допомогою одного повороту на деякий кут навколо нерухомої осі, яка проходить через закріплену точку [Le Richon, 1968]. Для описання рухів тектонічних плит важливий наслідок, який випливає із цієї теореми: рух закріпленого в певній точці твердого тіла в кожен момент часу можна розглядати як обертання навколо миттєвої осі, яка проходить

через цю точку. Використання теореми обертання Ейлера [Euler, 1776] дає можливість знайти місце (розташування полюса Ейлера) для фіксації тектонічної плити в просторі, що забезпечує можливість аналізу рухів всередині плит. Для моделювання рухів тектонічних плит необхідно враховувати такі їх властивості:

1. Границі плит неперервні. Великим тектонічним плитам, як правило, відповідають центри спредингу, зони субдукції та трансформні розломи.

2. Гіпотеза твердості тектонічних плит дає змогу використовувати теорему обертання Ейлера [Euler, 1776] для побудови достатньо простих моделей відносного руху плит на геосфері.

3. Тектонічні плити розглядають як тверді сферичні оболонки певної площі на поверхні сфери, а швидкість спредингу - як ключову інформацію для пояснення їх руху.

Зважаючи на це, відносний рух між будь-якими двома тектонічними плитами можна розглядати як просте обертання навкруги полюса Ейлера, тому теорема обертання Ейлера [Euler, 1776] відіграє важливу роль у побудові моделей руху тектонічних плит.

Використання теореми обертання Ейлера в геодинаміці зробило концепцію тектоніки плит кількісною і відкрило перед теоретичною геологією шлях поступового перетворення її з описової науки на точну наукову дисципліну [Лобковский, 1988]. Як зазначають [Хайн, Полетаев, 2007], ротаційний режим повинен слугувати відправним моментом і основою числового і фізичного моделювання будь-яких геологічних (як і всіх інших) процесів, тобто будь-які дослідження у тектонофізиці повинні починатися з аналізу ролі ротаційних параметрів у геодинамічних рухах.

Існує достатня кількість методів визначення ротаційних параметрів, які ґрунтуються на дослідженні азимутів розломів, векторів сповзання землетрусів та швидкостей поширення серединно-океанічних хребтів [Chase, 1972; Minster and Jordan, 1978; DeMets et al., 1990; Argus and Gordon, 1991]. Натомість останнім часом через стрімке збільшення кількості перманентних ГНСС-станцій, а також високу якість їх вимірювань вони стали альтернативним методом для оцінювання ротаційних параметрів [Argus and Heflin, 1995; Sella, Dixon and Mao, 2002; Altamimi, Sillard and Boucher, 2002; Kreemer et al., 2006; Altamimi et al., 2007; Altamimi, Métivier and Collilieux, 2012; Goudarzi, Cocard and Santerre, 2015]. Уже накопичено довготривалі ряди спостережень перманент-

них ГНСС-станцій, розташованих на всіх материках та на багатьох островах. Очевидно, на основі цих даних можна достовірно простежити зміни сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит у часі.

Мета

Основні цілі роботи – визначення та аналіз сучасних ротаційних параметрів основних тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій за останні 20 років (2002–2021 рр.).

Методика

Використовуючи процедури, основані на методі найменших квадратів, запропоновано та реалізовано у програмному пакеті MathCAD алгоритм визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на підставі опрацювання часових рядів щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій (рис. 1). Необхідно зазначити, що цей алгоритм використовує, узагальнює та модернізує підходи, наведені у [Марченко та ін., 2012; Tretuyak, Al-Alusi, & Babi, 2018; та Savchyn, 2022].

У запропонованому алгоритмі вхідними даними є географічні координати та часові ряди щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій, а також вимоги до часових рядів і до визначених швидкостей перманентних ГНСС-станцій. Алгоритм передбачає використання наявних у вільному доступі на Nevada Geodetic Laboratory, 2022 [Blewitt, Hammond and Kreemer, 2018] часових рядів щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій або будь-яких інших даних, підготованих у аналогічному форматі.

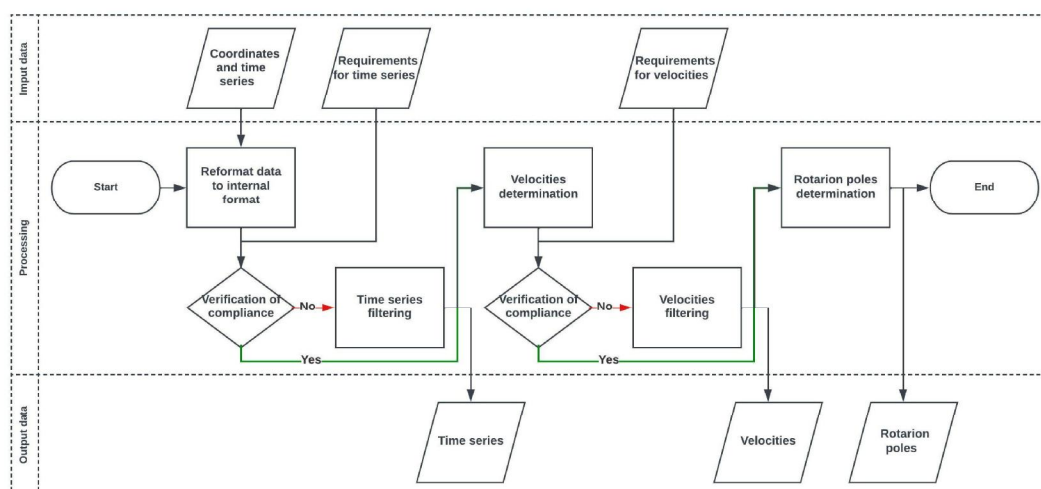


Рис. 1. Алгоритм визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій

Вихідними даними є опрацьовані (фільтровані) часові ряди та визначені швидкості перманентних ГНСС-станцій, а також встановлені ротаційні параметри досліджуваних тектонічних плит.

Запропонований алгоритм передбачає п'ять основних етапів:

1. *Трансформація даних у внутрішній формат.*

На цьому етапі наявні у вільному доступі та завантажені із Nevada Geodetic Laboratory (2022) дані трансформуються у внутрішній формат.

2. *Перевірка на відповідність вимогам та фільтрація часових рядів.* Відбір даних відбувається на основі критеріїв стосовно перманентних ГНСС-станцій, запропонованих [Altamimi et al., 2017]. Виявлення та видалення викидів та грубих помилок у часових рядах щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій відбувається із використанням порога 3δ (тобто, якщо деяке значення з-поміж щоденних розв'язків більше ніж утричі перевищувало стандартне відхилення, ми вважали це значення викидом та/або грубою помилкою).

3. *Визначення швидкостей горизонтальних зміщень.* На цьому етапі для усіх розв'язків перманентних ГНСС-станцій складають лінійні рівняння виду:

$$f(t_i) = v(t_i - t_o) + y_o, \quad (1)$$

де t_i – епоха спостереження; v – лінійна швидкість перманентної ГНСС-станції; y_o – зсув часового ряду (на епоху t_o – початкову епоху).

Системи рівнянь для кожної компоненти розв'язують окремо методом найменших квадратів, визначають складові векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій, а також виконують оцінку точності розрахованих параметрів.

4. *Перевірка на відповідність вимогам та фільтрація визначених швидкостей.* На цьому етапі визначають та відбраковують перманентні ГНСС-станції із низькою точністю визначення складових швидкостей горизонтальних зміщень.

5. *Визначення ротаційних параметрів.* Використовують математичний апарат, наведений у [Марченко та ін., 2012], який ґрунтується на взаємозв'язку між компонентами швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій та ротаційних параметрів плити:

$$\begin{aligned} v_{B_i} &= w \cos(f) \sin(L_i - l), \\ v_{L_i} &= w [\sin(f) - \cos(L_i - l) \sin(B_i) \cos(f)], \end{aligned} \quad (2)$$

де w – кутова швидкість плити; f, l – координати полюса; B, L – координати перманентної ГНСС-станції із визначеними компонентами горизонтальних зміщень v_B та v_L . У такій системі кількість рівнянь подвоєна, тобто кількість рівнянь завжди більша за кількість невідомих.

Системи рівнянь розв'язують методом найменших квадратів, із використанням ваг спостережень, які враховують безперервність та рівномірність роз-

поділу даних упродовж спостережень [Treyak, Al-Alusi and Babi, 2018]. У результаті отримують значення сучасних ротаційних параметрів плит, а також встановлюють точність їх визначення.

Дані

Вихідними даними для проведення досліджень були координати та часові ряди щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій, завантажені із сайту Nevada Geodetic Laboratory, 2022 [Blewitt, Hammond and Kreemer, 2018], обчислені із використанням програмного забезпечення GIPSY-OASIS-II з PPP методу (Precise Point Positioning).

Сьогодні за рахунок використання високоточних супутникових орбіт, поправок до годинника супутників і досконаліших геофізичних моделей у режимі постопрацювання метод PPP все частіше заміняє DD метод (Double Differences). Для геодинамічних задач важливим аспектом є те, що цей метод дає змогу отримати координати незалежно, тобто не потребує синхронних спостережень на кількох перманентних ГНСС-станціях, на відміну від DD методу. Така особливість PPP методу дає змогу не враховувати спотворення координат, спричинені іншими перманентними ГНСС-станціями.

Сучасні моделі поділяють земну кулю на 56 тектонічних плит [Argus, Gordon and DeMets, 2011], серед яких 7 великих, 15 середніх та 34 мікроплити. Проте на значній кількості середніх та мікроплит немає достатньої кількості перманентних ГНСС-станцій, які відповідають вимогам до визначення ротаційних параметрів. Тому в цій роботі виконано визначення та дослідження сучасних ротаційних параметрів тільки тих тектонічних плит, на яких є достатня кількість перманентних ГНСС-станцій, що відповідають вимогам, викладеним у [Altamimi et al., 2017]. Зазначимо, що в роботі використано межі тектонічних плит, вказані у [Bird, 2003].

У результаті до опрацювання долучено часові ряди щоденних розв'язків 3169 перманентних ГНСС-станцій, розташованих на семи великих, семи середніх та трьох мікроплитах. На рис. 2 наведено характеристики мереж відібраних перманентних ГНСС-станцій окремо для кожної досліджуваної тектонічної плити. Розподіл відібраних перманентних ГНСС-станцій між тектонічними плитами подано у табл. 1 та на рис. 3.

Аналізуючи рис. 2, можна зауважити зростання кількості перманентних ГНСС-станцій у кожній мережі із часом, що безпосередньо пов'язано із розвитком та популяризацією ГНСС-технологій. Часові ряди щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій неоднорідні в часі. Тривалість найдовших вибраних часових рядів щоденних розв'язків – двадцять років, а найкоротших – три роки. Основна група спостережень характеризується тривалістю 5–15 років. Проте, починаючи з 2010 р., часові ряди практично усіх ГНСС-станцій однорідні та безперервні.

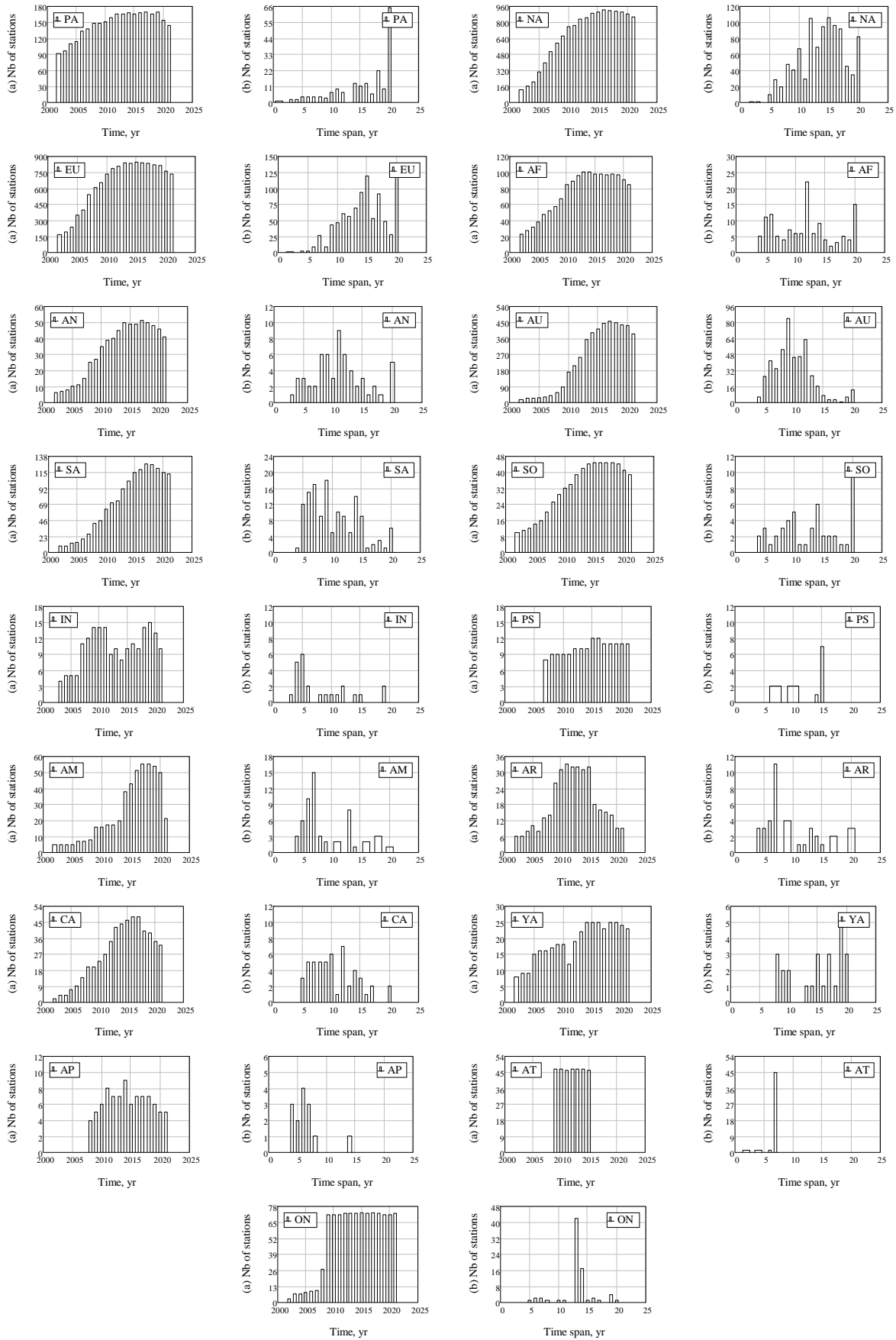


Рис. 2. Характеристика мереж постійних ГНСС-станцій за кількістю станцій (а) та тривалістю спостережень (б)

Таблиця 1

Розподіл відібраних перманентних ГНСС-станцій між тектонічними плитами

Тип плити	Ідентифікатор плити	Назва плити	Площа, стерадіани	Площа, км ²	Відібрані перманентні ГНСС-станції
Велика плита	PA	Pacific	2,57685	103 300 000	178
	NA	North America	1,36559	75 900000	965
	EU	Eurasia	1,19630	67 800 000	879
	AF	Africa	1,44065	61 300 000	126
	AN	Antarctica	1,43268	60 900 000	58
	AU	Australia	1,13294	47 000 000	474
	SA	South America	1,03045	43 600 000	112
Середня плита	SO	Somalia	0,47192	16 700 000	49
	IN	India	0,30637	11 900 000	21
	PS	Philippine Sea	0,13409	5 500 000	12
	AM	Amur	0,13066	–	50
	AR	Arabia	0,12082	5 000 000	38
	CA	Caribbean	0,07304	3 300 000	46
	YA	Yangtze	0,05425	–	25
Мікро-плита	AP	Altiplano	0,02050	–	15
	AT	Anatolia	0,01418	–	48
	ON	Okinawa	0,00802	–	73

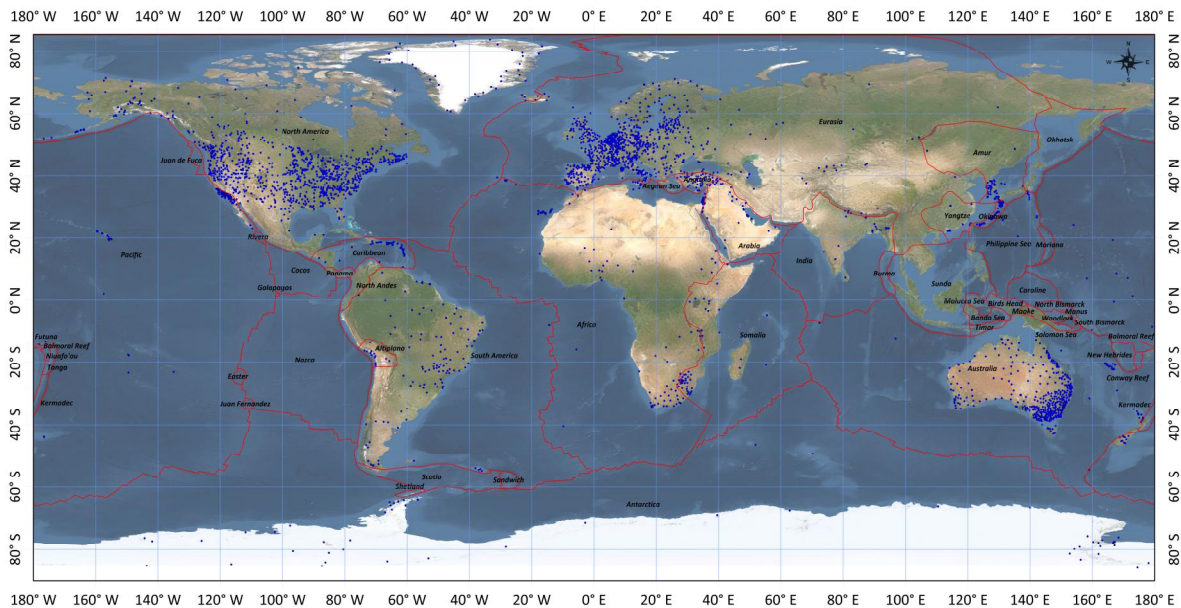


Рис. 3. Розташування відібраних перманентних ГНСС-станцій (карту складено із використанням меж плит, наведених у [Bird, 2003])

Аналізуючи наведені результати (див. табл. 1 та рис. 3), бачимо, що кількість відібраних перманентних ГНСС-станцій для різних плит неоднакова. Найменшу кількість перманентних ГНСС-станцій відібрано для PS та AP плит (12 та 15 відповідно), натомість найбільшу для NA, EU та AU плит (965, 879 та 474 відповідно). Також надзвичайно різняться густота та рівномірність розташування відібраних перманентних ГНСС-станцій.

Важливо зазначити, що координати та часові ряди щоденних розв'язків перманентних ГНСС-

станцій доступні на сайті Nevada Geodetic Laboratory (2022) у системі IGS14. Figurski and Nykiel [2017] зазначають, що реалізацію IGS14 опубліковано у 2017 р. паралельно із перевизначеною реалізацією ITRF (ITRF2014) [Altamimi et al., 2016]. Параметри трансформації між реалізаціями ITRF2014 і IGS14 не публікували, оскільки передбачається, що їх глобальні значення дорівнюють нулю. У зв'язку із практичною ідентичністю цих систем у цій роботі оперуватимемо аббревіатурою ITRF2014/IGS14.

Результати

Із використанням запропонованої методики визначено складові векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій,

розташованих на семи великих, семи середніх та трьох мікроплитах, для 2002–2021 рр. у системі ITRF2014/IGS14. Розподіл визначених швидкостей відображено на рис. 4.

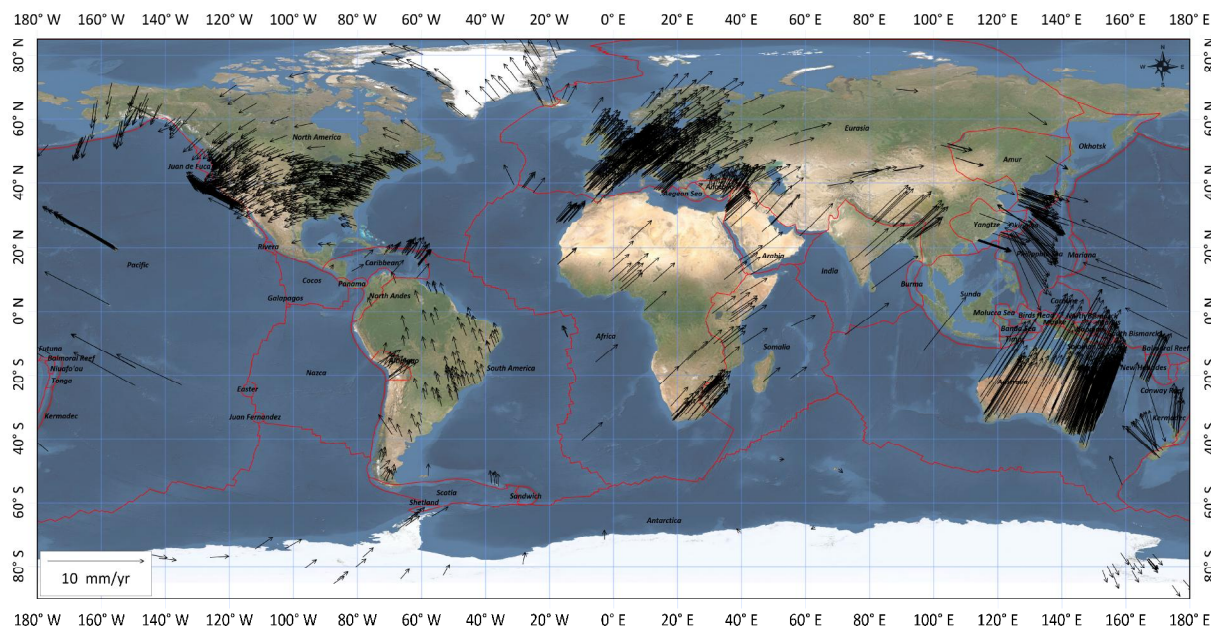


Рис. 4. Картохема розподілу швидкостей горизонтальних зміщень continuous GNSS stations (Карту складено із використанням меж плит, наведених у [Bird, 2003])

Аналізуючи наведену картохему (див. рис. 4), зауважимо, що перманентні GNSS-станції, розташовані на EU, AF, AU, SO, IN, AR, CA, AP та AT плитах, характеризуються північно-східним напрямком руху, проте горизонтальна швидкість їхніх рухів відрізняється. Для EU плити горизонтальна швидкість рухів становить 17–46 мм/рік, для AF плити – 19–31 мм/рік, для AU плити – 35–71 мм/рік, для SO плити – 20–37 мм/рік, для IN плити – 30–59 мм/рік, для AR плити – 30–48 мм/рік, для CA плити – 5–23 мм/рік, для AP плити – 13–33 мм/рік, AT плити – 4–28 мм/рік.

Перманентні GNSS-станції, розташовані на PA та PS плитах, характеризуються північно-західним напрямком, швидкість їхніх горизонтальних рухів 32–77 мм/рік для PA та 4–50 мм/рік для PS плити.

Перманентні GNSS-станції, розташовані на AM, YA та ON плитах, характеризуються південно-східним напрямком, зі швидкістю їхніх горизонтальних рухів 25–37 мм/рік для AM плити, 29–35 мм/рік для YA та 30–88 мм/рік для ON плити.

Перманентні GNSS-станції, розташовані на NA плиті, характеризуються західним напрямком руху із горизонтальною швидкістю 6–31 мм/рік, AN плиті – східним напрямком руху зі швидкістю 4–22 мм/рік, а SA плиті – північним напрямком руху зі швидкістю 10–24 мм/рік.

Зазначимо, що максимальні зміщення ідентифікуються для перманентних GNSS-станцій, роз-

ташованих на AU, PA та YA плитах, натомість мінімальні – на AN, SA, CA та AT плитах.

Точність визначення складових векторів горизонтальних зміщень у межах 0,9–6,4 мм та становить у середньому 10–15 % від довжини вектора.

Отримано значення швидкостей порівняно із відомими моделями рухів тектонічних плит NNR-NUVEL1 [Argus and Gordon, 1991], REVEL2000 [Sella, Dixon and Mao, 2002], ITRF2000 [Altamimi, Sillard and Boucher, 2002], APKIM2005 [Drewes, 2009], NNR-MORVEL56 [Argus, Gordon and DeMets, 2011] and ITRF2014 [Altamimi et al., 2017]. Встановлено, що, загалом, одержані значення добре корелюють із порівнюваними моделями, найвищу кореляцію ідентифіковано для ITRF2014 [Altamimi et al., 2017].

Отримані швидкості горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій використано для визначення ротаційних параметрів досліджуваних тектонічних плит на 2002–2021 рр. у системі координат ITRF2014/IGS14. Розташування визначених сучасних полюсів обертання основних тектонічних плит подано на рис. 5.

Оскільки вісь обертання перетинає земну кулю у двох місцях, відповідно Cox and Hart (1986), у табл. 2 додатково наведено сучасні ротаційні параметри, які забезпечують позитивне (додатне) значення кутової швидкості, встановлене на основі правила правої руки.

Точність визначення кутової швидкості у діапазоні 0,001–0,206°/м.р. та дорівнює у середньому 0,5–18 % від значення кутової швидкості. Найвищою точністю визначення кутової

швидкості характеризуються NA, EU, AF, AU та SA плити (0,001°/м. р), натомість найнижчою – CA, AT, PS, ON та AP плити (0,022–0,206°/м. р.).

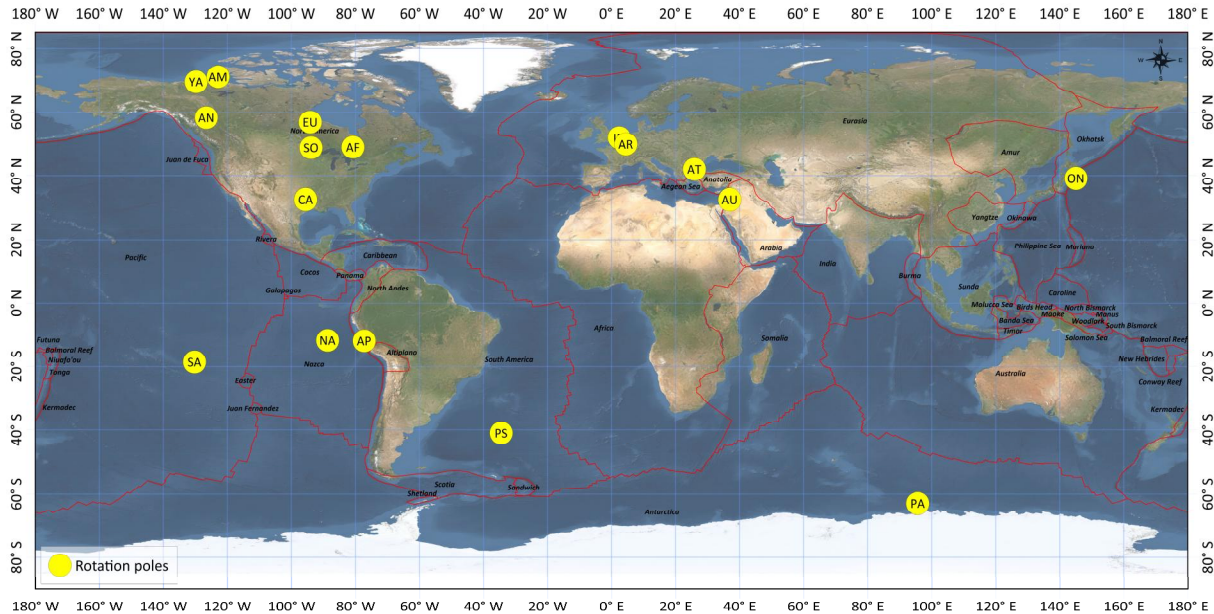


Рис. 5. Розташування сучасних полюсів обертання основних тектонічних плит (карту складено із використанням меж плит, наведених у [Bird, 2003])

Таблиця 2

Сучасні ротаційні параметри основних тектонічних плит на 2002–2021 рр. у системі координат ITRF2014/IGS14

Тип плити	Ідентифікатор плити	Ротаційні параметри			Точність ротаційних параметрів		
		w , °/м.р.	f , °N	l , °E	m_w , °/м.р.	m_f , °N	m_l , °E
Велика плита	PA	0,665	-63,046	94,362	±0,006	±0,280	±0,799
	NA	0,176	-11,766	-88,722	±0,001	±0,614	±0,244
	EU	0,264	55,577	-96,888	±0,001	±0,186	±0,350
	AF	0,274	48,949	-80,786	±0,001	±0,213	±0,519
	AN	0,211	58,277	-126,531	±0,002	±0,348	±0,417
	AU	0,637	32,647	36,957	±0,001	±0,040	±0,089
	SA	0,122	-18,569	-130,232	±0,001	±0,531	±1,434
Середня плита	SO	0,303	48,824	-93,855	±0,003	±0,153	±1,119
	IN	0,525	51,980	2,623	±0,005	±0,163	±1,144
	PS	1,200	-41,033	-34,479	±0,098	±1,205	±1,153
	AM	0,327	71,209	-122,871	±0,009	±1,408	±1,444
	AR	0,578	49,907	4,477	±0,010	±0,273	±0,868
	CA	0,280	32,691	-95,533	±0,022	±1,161	±1,927
Мікро-плита	YA	0,320	69,617	-129,762	±0,006	±1,428	±1,348
	AP	1,152	-11,914	-77,284	±0,206	±0,906	±1,108
	AT	1,359	41,992	25,896	±0,057	±0,239	±0,382
	ON	1,308	39,783	146,054	±0,110	±0,939	±1,813

Точність визначення довготи міститься у діапазоні 0,089–1,927° та становить у середньому 0,1–2 %

від значення довготи. Найвищою точністю визначення довготи характеризується AU плита (0,089°),

натомість найнижчою – ON та CA плити (1,813–1,927°). Точність визначення широти – у діапазоні 0,040–1,428° та дорівнює у середньому 0,1–2 % від значення широти. Найвищою точністю визначення широти характеризується AU плита (0,040°), натомість найнижчою – AM та YA плити (1,408–1,428°).

Загалом можна зробити висновок, що точність визначення ротаційних параметрів певною мірою залежить від кількості використаних перманентних ГНСС-станцій для їх обчислення. Тому ротаційні параметри малих та середніх плит через невелику кількість перманентних ГНСС-станцій визначають із нижчою точністю, ніж ротаційні па-

раметри великих плит, де кількість перманентних ГНСС-станцій надлишкова. Очевидно, встановлення нових, якісних перманентних ГНСС-станцій на малих та середніх плитах сприятиме підвищенню точності визначення їх ротаційних параметрів.

Отримані значення ротаційних параметрів порівняно із відомими моделями рухів тектонічних плит (табл. 3) NNR-NUVEL1 [Argus and Gordon, 1991], REVEL2000 [Sella, Dixon and Mao, 2002], ITRF2000 [Altamimi, Sillard and Boucher, 2002], APKIM2005 [Drewes, 2009], NNR-MORVEL56 [Argus, Gordon and DeMets, 2011] and ITRF2014 [Altamimi et. al., 2017].

Таблиця 3

Різниця значень ротаційних параметрів цієї роботи та відомих моделей

Плита	Ротаційні параметри	NNR-NUVEL1	REVEL 2000	ITRF 2000	APKIM 2005	NNR-MORVEL56	ITRF 2014	СКП	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Велика плита	PA	ϕ , °N	0,05	-1,16	-1,13	-0,15	-0,53	0,44	0,59
		λ , °E	13,04	18,38	15,83	16,14	20,34	16,98	2,26
		ω , °/m.y	0,005	-0,010	0,001	0,006	-0,014	0,014	0,010
	NA	ϕ , °N	9,27	9,38	6,73	7,47	6,92	6,58	1,16
		λ , °E	2,72	9,64	5,58	4,52	8,08	0,70	3,03
		ω , °/m.y	0,044	0,023	0,018	0,018	0,033	0,018	0,010
	EU	ϕ , °N	-4,98	2,69	2,39	-2,18	-6,73	-0,51	3,50
		λ , °E	-15,51	-5,32	-2,49	1,19	-9,61	-2,21	5,50
		ω , °/m.y	-0,024	-0,007	-0,004	-0,005	-0,041	-0,003	0,014
	AF	ϕ , °N	1,65	3,30	-	-0,85	-1,27	0,74	1,67
		λ , °E	6,79	0,61	-	1,49	12,35	-0,05	4,72
		ω , °/m.y	0,026	-0,021	-	0,005	0,018	-0,007	0,017
	AN	ϕ , °N	4,72	0,20	3,55	2,82	7,14	0,57	2,38
		λ , °E	10,63	-7,47	0,96	6,03	8,42	-0,90	6,13
		ω , °/m.y	0,039	0,015	0,020	0,032	0,039	0,008	0,012
	AU	ϕ , °N	1,15	2,21	-0,32	0,15	1,21	-0,29	0,92
		λ , °E	-3,76	1,30	2,48	-0,26	0,98	1,10	1,98
		ω , °/m.y	0,043	-0,010	-0,023	0,002	-0,005	-0,006	0,021
SA	ϕ , °N	-6,83	-7,26	-2,89	3,97	-4,05	-0,53	3,84	
	λ , °E	5,63	-5,15	-4,40	8,23	17,40	-1,66	8,00	
	ω , °/m.y	-0,002	-0,016	-0,009	0,001	-0,013	-0,003	0,006	
Середня плита	SO	ϕ , °N	-	4,69	-	2,48	1,13	-1,08	2,09
		λ , °E	-	-7,70	-	8,55	9,33	-4,81	7,67
		ω , °/m.y	-	0,007	-	0,005	0,036	0,029	0,013
	IN	ϕ , °N	-6,48	1,67	-	-3,78	-1,61	-0,42	2,80
		λ , °E	-2,22	-16,61	-	16,48	-5,91	-2,87	10,68
		ω , °/m.y	0,045	-0,042	-	0,063	0,019	-0,009	0,038
	PS	ϕ , °N	2,03	-5,49	-	-	-4,99	-	3,43
		λ , °E	-2,22	4,07	-	-	3,12	-	2,77
		ω , °/m.y	-0,250	-0,290	-	-	-0,290	-	0,019
	AM	ϕ , °N	-	-7,46	-	-18,41	-8,04	-	5,03
		λ , °E	-	-10,89	-	31,47	0,05	-	17,95
		ω , °/m.y	-	0,000	-	-0,059	-0,030	-	0,024

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	AR	ϕ , °N	-4,71	1,56	-	-1,01	-1,03	1,27	2,25
		λ , °E	-8,88	-1,59	-	-0,68	-12,97	-11,20	5,02
		ω , °/m.y	-0,008	-0,057	-	0,021	-0,019	-0,063	0,031
	CA	ϕ , °N	-7,69	5,05	-	-0,09	2,51	-	4,77
		λ , °E	2,43	4,67	-	-23,37	2,91	-	11,59
		ω , °/m.y	-0,060	-0,008	-	-0,094	0,006	-	0,040
	YA	ϕ , °N	-	-	-	-13,02	-6,59	-	3,22
		λ , °E	-	-	-	31,56	13,14	-	9,21
		ω , °/m.y	-	-	-	-0,005	0,014	-	0,010
Мікроплита	AP	ϕ , °N	-	-	-	-	5,33	-	-
		λ , °E	-	-	-	-	-6,70	-	-
		ω , °/m.y	-	-	-	-	-0,664	-	-
	AT	ϕ , °N	-	0,20	-	-1,99	-1,88	-	1,01
		λ , °E	-	0,28	-	2,10	0,76	-	0,77
		ω , °/m.y	-	-0,477	-	0,662	-0,149	-	0,479
	ON	ϕ , °N	-	-	-	-	-3,66	-	-
		λ , °E	-	-	-	-	-8,13	-	-
		ω , °/m.y	-	-	-	-	1,231	-	-
СКП	ϕ , °N	5,21	4,61	3,21	6,41	4,46	2,08	-	
	λ , °E	8,04	8,54	6,59	13,38	9,46	6,73	-	
	ω , °/m.y	0,082	0,137	0,015	0,175	0,349	0,023	-	

Аналізуючи отримані різниці (див. табл. 3), можна стверджувати про високу кореляцію із відомими моделями, що підтверджує правильність вибраного методу, а також достовірність отриманих результатів. Найвищу кореляцію ідентифіковано для ITRF2000 [Altamimi, Sillard and Boucher, 2002] та ITRF2014 [Altamimi et al., 2017], і це очікувано, оскільки ми використовуємо ідентичну систему координат. Натомість найнижчу кореляцію ідентифіковано для ARKIM2005 [Drewes, 2009].

Середньоквадратичні відхилення значень кутової швидкості містяться у діапазоні 0,015–0,349°/м. р. Середньоквадратичні відхилення значень довготи в діапазоні 6,59–13,38°, а широти – в діапазоні 2,08–6,41°.

Найменші відхилення ротаційних параметрів ідентифіковано для AU та PA плит, натомість найбільші – для IN, CA та AM плит. Такий розподіл підтверджує залежність точності визначення ротаційних параметрів тектонічних плит від кількості та густоти перманентних ГНСС-станцій на кожній плиті, а також від якості використаних часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій.

Наукова новизна

Сучасні ротаційні параметри тектонічних плит є основою для моделювання та аналізу глобальних, регіональних та локальних геодинамічних процесів, тому їх точне визначення є актуальним завданням. Альтернативною, а останнім часом і

практично незамінною основою для визначення таких параметрів є ГНСС-дані. Стрімке збільшення кількості перманентних ГНСС-станцій, а також висока якість їх вимірювань сприяють підвищенню точності визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит, але призводить до необхідності їх постійного переобчислення та уточнення.

Практична значущість

Запропонований алгоритм та отримані результати можна використати для розроблення нових та уточнення наявних моделей рухів тектонічних плит і систем координат, а також для прогнозування рухів земної кори.

Висновки

Розроблено алгоритм визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій. Цей алгоритм використовує, узагальнює та модернізує підходи, наведені у попередніх дослідженнях. Алгоритм апробовано для визначення сучасних ротаційних параметрів основних тектонічних плит.

Визначено складові векторів сучасних горизонтальних зміщень 3169 перманентних ГНСС-станцій, розташованих на семи великих, семи середніх та трьох мікроплитах, для 2002–2021 рр. у системі координат ITRF2014/IGS14. Точність визначення складових векторів горизонтальних змі-

шень міститься у межах 0,9–6,4 мм та становить у середньому 10–15 % від довжини вектора. Побудовано картосхему просторового розподілу поля швидкостей сучасних горизонтальних рухів перманентних ГНСС-станцій.

Визначено сучасні ротаційні параметри семи великих, семи середніх та трьох мікроплит для 2002–2021 рр. в системі координат ITRF2014/IGS14. Встановлено, що загалом отримані значення сучасних ротаційних параметрів добре корелюють із відомими моделями рухів тектонічних плит. Це підтверджує правильність вибраного методу, а також достовірність отриманих результатів

Список літератури

- Хаин, В., & Полетаев, А. (2007). Ротационная тектоника Земли. *Наука в России*, (6), 14–21.
- Лобковский, Л. И. (1988). Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. Наука. 251 с.
- Марченко, О. М., Третяк, К. Р., Кульчицький, А. Я., Голубінка, Ю. І., Марченко, Д. О., Третяк, Н. П. (2012). Дослідження гравітаційного поля, топографії океану та рухів земної кори в регіоні Антарктики. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 306.
- Altamimi, Z., Sillard, P., & Boucher, C. (2002). *ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B10), ETG 2–1–ETG 2–19. <https://doi.org/10.1029/2001jb000561>.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., & Boucher, C. (2007). *ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. Journal of Geophysical Research*, 112(B9). <https://doi.org/10.1029/2007jb004949>.
- Altamimi, Z., Métivier, L., & Collilieux, X. (2012). *ITRF2008 plate motion model. Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7), n/a–n/a. <https://doi.org/10.1029/2011jb008930>.
- Altamimi, Z., Métivier, L., Reischung, P., Rouby, H., & Collilieux, X. (2017). *ITRF2014 plate motion model. Geophysical Journal International*, 209(3), 1906–1912. DOI:10.1093/gji/ggx136.
- Altamimi, Z., Reischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). *ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016jb013098>
- Argus, D. F., & Gordon, R. G. (1991). *No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1. Geophysical Research Letters*, 18(11), 2039–2042. <https://doi.org/10.1029/91gl01532>
- Argus, D. F., & Heflin, M. B. (1995). *Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the Global Positioning System. Geophysical Research Letters*, 22(15), 1973–1976. <https://doi.org/10.1029/95gl02006>
- Argus, D. F., Gordon, R. G., & DeMets, C. (2011). Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(11), n/a–n/a. <https://doi.org/10.1029/2011gc003751>.
- Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3). <https://doi.org/10.1029/2001gc000252>.
- Blewitt, G., W. C. Hammond, & C. Kreemer (2018), Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science, *Eos*, 99, <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.
- Chase, C. G. (1972). *The N Plate Problem of Plate Tectonics. Geophysical Journal International*, 29(2), 117–122. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1972.tb02202.x>.
- Cox, A., & Hart, R. B. (1986). *Plate Tectonics: How It Works: Blackwell Scientific Publications. Inc. Boston*, 63–84.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1990). *Current plate motions. Geophysical Journal International*, 101(2), 425–478. DOI: 10.1111/j.1365-246x.1990.tb06579.x
- Drewes, H. (2009). *The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model APKIM2005 as Basis for a Non-Rotating ITRF. International Association of Geodesy Symposia*, 95–99. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00860-3_15.
- Euler's theorem and its proof are contained in paragraphs 24–26 of the appendix (*Additamentum*. pp. 201–203) of L. Euler (Leonhard Euler), *Formulae generales pro translatione quacunque corporum rigidorum* (General formulas for the translation of arbitrary rigid bodies), presented to the St. Petersburg Academy on October 9, 1775, and first published in *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae* 20, 1776, pp. 189–207 (E478) and was reprinted in *Theoria motus corporum rigidorum*, ed. nova, 1790, pp. 449–460 (E478a) and later in his collected works *Opera Omnia*, Series 2, Volume 9, pp. 84–98.
- Figurski, M., & Nykiel, G. (2017). Investigation of the impact of ITRF2014/IGS14 on the positions of the reference stations in Europe. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 14, No. 4 (188), 401–410. <https://doi.org/10.13168/AGG.2017.0021>
- Goudarzi, M. A., Cocard, M., & Santerre, R. (2015). *Estimating Euler pole parameters for eastern Canada using GPS velocities. Geodesy and Cartography*, 41(4), 162–173. <https://doi.org/10.3846/20296991.2015.1123445>.

- Kreemer, C., Lavallée, D. A., Blewitt, G., & Holt, W. E. (2006). *On the stability of a geodetic no-net-rotation frame and its implication for the International Terrestrial Reference Frame. Geophysical Research Letters*, 33(17). <https://doi.org/10.1029/2006gl027058>.
- Le Pichon, X. (1968). Sea-floor spreading and continental drift. *Journal of Geophysical Research*, 73(12), 3661–3697.
- Minster, J. B., & Jordan, T. H. (1978). *Present-day plate motions. Journal of Geophysical Research*, 83(B11), 5331. <https://doi.org/10.1029/jb083ib11p05331>.
- Nevada Geodetic Laboratory. Nevada Geodetic Laboratory – Home. (n.d.). Retrieved March 22, 2022, from <http://geodesy.unr.edu/>
- Savchyn, I. (2022). Establishing the correlation between changes of absolute rotation poles of major tectonic plates based on continuous GNSS stations data. *Acta Geodyn. Geomater.*, 19, No. 2 (206), 167–176. <https://doi.org/10.13168/AGG.2022.0006>.
- Sella, G. F., Dixon, T. H., & Mao, A. (2002). *REVEL: A model for Recent plate velocities from space geodesy. Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4), ETG 11–1–ETG 11–30. <https://doi.org/10.1029/2000jb000033>.
- Tretyak, K., Al-Alusi, F. K. F., & Babiy, L. (2018). *Investigation of the interrelationship between changes and redistribution of angular momentum of the earth, the Antarctic tectonic plate, the atmosphere, and the ocean. Geodynamics*, 1 (24), 5–26. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.005>.

Ihor SAVCHYN

Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: savchyn.ih@gmail.com

DETERMINATION OF THE RECENT ROTATION POLES OF THE MAIN TECTONIC PLATES ON THE BASE OF GNSS DATA

The main goal is to determine and analyze the recent rotation poles of the main tectonic plates based on measurements of continuous GNSS stations for the period of 2002–2021. Using procedures based on the method of the least squares, we suggested an algorithm to determine recent rotation poles of tectonic plates on the basis of processing time series of daily solutions of continuous GNSS stations. The algorithm was implemented in the MathCAD software package. It uses, generalizes, and modernizes the approaches presented in previous studies. Structurally, this algorithm consists of five consecutive stages: transformation of data into an internal format; compliance check and time series filtering; determination of horizontal displacement rates; compliance check and filtering of specified velocities; determination of rotation poles. The algorithm involves the use of freely available time series of daily solutions of continuous GNSS stations, or any other data prepared in a similar format. The study has developed an algorithm to determine recent rotation poles of tectonic plates. It is based on processing time series of daily solutions of continuous GNSS stations. The algorithm was tested to define the recent rotation poles of the main tectonic plates. We determined the components of recent horizontal displacement vectors of 3169 continuous GNSS stations located on 7 large, 7 medium and 3 micro plates for the period of 2002–2021 in the ITRF2014/IGS14 reference frame. The accuracy of determining the component vectors of horizontal displacements is in the range of 0.9–6.4 mm and is on average 10–15 % of the vector length. The research allowed us to construct a map scheme of the spatial distribution of the velocity field of recent horizontal movements of continuous GNSS stations. Recent rotation poles of the main tectonic plates were determined for the period 2002–2021 in ITRF2014/IGS14 reference frame. It was established that, in general, the obtained values of recent rotation poles correlate well with known models of tectonic plate movements. This confirms the correctness of the chosen method, as well as the reliability of the obtained results. Recent rotation poles of tectonic plates are the basis for modeling and analysis of global, regional and local geodynamic processes, so their accurate determination is an urgent and necessary task. GNSS data is an alternative, and recently, practically irreplaceable basis for determining such parameters. The rapid increase in the number of continuous GNSS stations, as well as the high quality of their measurements, contributes to improving the accuracy of determining the recent rotation poles of tectonic plates, but leads to the need for their constant recalculation and refinement. The presented algorithm and the obtained results can be used to develop new and refine existing models of tectonic plate movements and reference frames, as well as to forecast the movements of the Earth's crust.

Key words: rotation poles; main tectonic plates; time series of daily solutions; continuous GNSS stations; ITRF2014/IGS14 reference frame.

Надіслано 03.09.2022 р.