

Марина БАТУР¹, Катерина БАБІЙ²¹ Стамбульський технічний університет, докторант кафедри інженерної геоматики, Кампус Аязага, Маслак, Стамбул, 34469, Туреччина, e-mail: baturm20@itu.edu.tr, ORCID 0000-0001-9284-8858² Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, 49005, Україна, e-mail: babiyev@i.ua, ORCID 0000-0002-0733-2732

ТЕНДЕНЦІЇ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ І ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМНОЇ КОРИ НА ОСНОВІ ДАНИХ МІЖНАРОДНИХ СЛУЖБ GNSS: ПРИКЛАД НОВОЇ ЗЕЛАНДІЇ

Проаналізовано річне переміщення часових рядів координат п'яти постійних станцій Міжнародної служби GNSS (IGS), розташованих у Новій Зеландії, за 2009–2018 рр. Неопрацьовані дані у формі файлів Receiver Independence Exchange (RINEX) отримано із бази даних IGS і процесів за допомогою служби онлайн-обробки AUSPOS. Із використанням часових рядів координат розраховано швидкості горизонтального та вертикального зміщення за десятирічний період дослідження. Згідно з результатами, станції, розташовані на Північному острові Нової Зеландії, показали підняття земної кори в середньому на 31–32 мм/рік, тоді як за даними станцій, розміщених на Південному острові, встановлено 21–22 мм/рік позитивного вертикального зміщення. А швидкість горизонтальних переміщень у регіоні дослідження зростає у напрямку північ – південь. Зокрема, дві станції, розташовані в північно-західній частині Північного острова, дали змогу встановити зміщення 24–25 мм/рік, а одна станція в південній частині Північного острова – 35 мм/рік. Станції, встановлені на Південному острові, зафіксували швидкості горизонтальних зміщень 41–56 мм/рік. Це дослідження підтверджує основний внесок, зроблений у галузі вивчення деформації земної кори, тобто оновлені параметри зміщень разом із їх напрямками за останні роки. Одержані результати можуть бути використані для подальших геодинамічних досліджень, а також для пошуку найвірогідніших місць землетрусів на території дослідження.

Ключові слова: деформації земної кори; зміщення; дані IGS; часові ряди; Нова Зеландія; землетрус; сейсмічна область.

Вступ

Щороку в світі ресструють у середньому близько 2000 землетрусів магнітудою 5,0 і більше [Luginbuhl et al., 2019]. Землетруси з M_w 5,0–5,9 класифікують як середні, M_w 6,0–6,9 як сильні, M_w 7,0–7,9 як важкі пошкодження та $M_w \geq 8,0$ як руйнівні сейсмічні події. Щорічно у світі може відбуватися близько 20 великих землетрусів, з них 1–2 з M_w понад 8,0, які зазвичай спричиняють значні розриви поверхні та зміщення ґрунту [Luginbuhl et al., 2019]. Навіть найменші землетруси призводять до деформацій земної кори, зокрема інтерсейсмічні (інтервал між землетрусами), косейсмічні (безпосередньо час землетрусу) і постсейсмічні (час після землетрусу) етапи сейсмічного циклу, не кажучи вже про руйнівні землетруси. Оскільки активні геологічні розломи Нової Зеландії існують завдяки тектонічним кордонам між Австралійською та Тихоокеанською плитами, це спричиняє велику кількість тектонічних стискань. Наприклад, один із найбільш руйнівних землетрусів у Крайстчерчі 2011 р. забрав життя 185 людей і спричинив

значні структурні пошкодження та обвалення будівель [Johnston et al., 2014]. Виявити деформації земної кори та зміщення плити важливо не лише для досліджень Землі, але й для того, щоб вжити необхідних заходів з метою пом'якшення небезпеки землетрусів, у дослідженнях потенціалу землетрусів та їх раннього попередження [Четверик та ін., 2017; Cremen and Galasso, 2020].

GPS/GNSS нині є одним із економічно найефективніших інструментів для моніторингу та вимірювання деформацій земної кори. Останні вдосконалення в розробленні GPS/GNSS великою мірою сприяли вивченню тектонічних рухів, зон розломів, механізмів субдукції, вулканічних процесів тощо. У більшості попередніх досліджень застосували швидкості GPS/GNSS станцій для аналізу геодинамічних процесів. Наприклад, сучасні деформації земної кори з використанням даних GNSS для регіону південного патагонського льодового поля вивчено в [Richter et al., 2016; Larson et al., 2004], виміряно деформації кори для Мексики; [Shen et al., 2001] вели дослідження навколо Тибетської плити; [Zheng et al., 2017] використали дані GPS-спостережень за 25 років для вивчення деформацій

земної кори в зоні зіткнення Індії та Євразії. Низка досліджень була зосереджена на оцінюванні швидкості зміщення за допомогою вимірювань GPS [Johnson, 2013; Metzger та ін., 2011; Alif та ін., 2020]. Численні дослідження були спрямовані на вивчення швидкості деформації земної кори [Ishchenko, 2017; Dumka et al., 2018; Koulali et al., 2016].

Поки що геодезичні дослідження, здійснювані в Новій Зеландії, зосереджені переважно на деформаціях ґрунту (земної поверхні), спричинених сильними землетрусами, які належать до косейсмічної та постсейсмічної стадій сейсмічного циклу. Основні цілі й ключові висновки деяких із цих досліджень висвітлено в табл. 1.

Таблиця 1

Геодезичні дослідження у Новій Зеландії

Автор	Назва публікації	Мета дослідження та основні висновки
[Beavan et al., 2012]	Fault slip models of the 2010–2011 Canterbury, New Zealand, earthquakes from geodetic data and observations of postseismic ground deformations	Деформації земної кори визначено за допомогою даних GPS після чотирьох різних сейсмічних подій. Вдалось побудувати модель розлому та виявити постсейсмічні деформації
[Tenzer et al., 2012]	A compilation of a preliminary map of vertical deformations in New Zealand from continuous GPS data	Основна мета – встановити вертикальні деформації для регіону Нової Зеландії, де вони істотно відрізняються за величиною та швидкістю від інших регіонів країни
[Bartlow et al., 2014]	Time-dependent modeling of slow slip events and associated seismicity and tremor at the Hikurangi subduction zone, New Zealand	Зона субдукції Хікуруангі: досліджено зміщення та зсуви протягом 2010–2011 рр. за допомогою щоденних GPS-спостережень
[Beavan et al., 2016]	New Zealand GPS velocity field: 1995–2013	Визначено деформації земної кори для Нової Зеландії упродовж майже двадцятирічного періоду із використанням спостережень під час масштабної кампанії GPS
[Hamling and Hreinsdottir, 2016]	Reactivated afterslip induced by a large regional earthquake, Fiordland, New Zealand	Автори цього дослідження об'єднали дані GPS з InSAR для розрахунку косейсмічних і постсейсмічних деформацій після двох незалежних сейсмічних подій з M_W 6,8 і 7,8 відповідно
[Arnadottir et al., 2018]	A preseismic strain anomaly detected before M6 earthquake in the South Iceland seismic zone from GPS station velocities	Вимірювання GPS-кампанії 2001–2015 рр. використали для оцінювання швидкостей переміщення станцій і розрахунку швидкості деформації. Завдяки цьому виявлено істотні варіації швидкості, що вказує на підвищені швидкості деформації для досліджуваної області
[Su et al., 2020]	Coseismic and early postseismic deformation of the 2016 M_W 7.8 Kaikoura earthquake, New Zealand, from continuous GPS observations	За допомогою даних GNSS вдалось оцінити косейсмічний зсув після сильного землетрусу

Мета роботи – дослідити геодинамічні процеси земних плит Нової Зеландії та визначити оновлені горизонтальні та вертикальні переміщення (зміщення) п'яти постійних станцій за 2009–2018 рр.

Ця робота спрямована на дослідження горизонтальних (X і Y) і вертикальних (Z) зміщень п'яти станцій IGS, розташованих у Новій Зеландії. З цією метою взято файли RINEX з бази даних IGS й оброблено за допомогою служби онлайн-обробки GPS AUSPOS, наданої урядом Австралії. Дані збирали за часовий інтервал 2009–2018 рр. двічі на рік (1 січня та 1 червня), вони охоплюють десятирічний період. У результаті часові ряди координат отримано для кожної осі окремо, а остаточні швидкості зміщення розраховано як різниці координат, поділені на загальний час спостереження [Зуска, 2014].

Результати цього дослідження – значний внесок у вирішення загальної проблеми, розкритої у

працях групи вчених – геологів, геодезистів, географів тощо (див. табл. 1) щодо процесів переміщення масивів плит. Отримано нові дані про зміщення, які доцільно використовувати під час оновлення або покращення оцінки сейсмічної небезпеки в Новій Зеландії.

Тектонічна обстановка і сейсмічність Нової Зеландії

Нова Зеландія – країна, розташована в океані, загальною площею понад 250 000 км². Незважаючи на те, що країна складається з великої кількості островів, є два основних масиви суші – Північний і Південний острови (рис. 1, а). Географічне розташування на межі двох основних тектонічних плит світу, Австралійської та Тихоокеанської, робить Нову Зеландію активною сейсмічною країною із землетрусами магнітудою понад 7,0 балів. Ці плити натикаються одна на одну, унаслідок чо-

го одна проштовхується повз іншу. Загалом територію Нової Зеландії за тектонічною обстановкою можна розділити на три основні зони. Перша – це зона субдукції Хікуруангі, вузька смуга, що тягнеться від східного узбережжя Північного острова до північного сходу Південного острова. Уздовж цієї лінії Тихоокеанська плита просувається під Австралійську плиту, утворюючи конвергентну межу плити. Друга зона починається на східному узбережжі Південного острова і перетинає острів до Фіордленда. Тут плити ковзають одна повз одну й утворюють правобічний зсув – Альпійський розлом, який відноситься до межі трансформаційної плити. У південній частині Фіордленда Австралійська плита субдукує нижче від Тихоокеанської плити, утворюючи третю зону, названу

зоною субдукції Фіордленда. Подібно до першої зони, ця лінія геологічного розлому стосується межі конвергентної плити, де виникають насуви. Крім того, країна розташована на поясі діючих вулканів, так званому Вогняному кільці, до якого належать найбільші сейсмічні та вулканічні гарячі точки. Щороку в Новій Зеландії стаються тисячі землетрусів. Більшість із них невідчутні, оскільки занадто слабкі, але деякі землетруси спричиняють поштовхи, яких достатньо, щоб завдати значної шкоди [Leite et al., 2013]. На рис. 1, б показано кількість землетрусів з МВт 5,0 і більше, які відбулися за 1900–2022 рр. в околицях Нової Зеландії. Згідно з графіком, понад 75 % – це події з МВт 5,0–5,4, 15 % – з МВт 5,5–5,9, 6 % – із МВт 6,0–6,4 і зовсім незначна частина припадає на МВт 6,5–7,9.

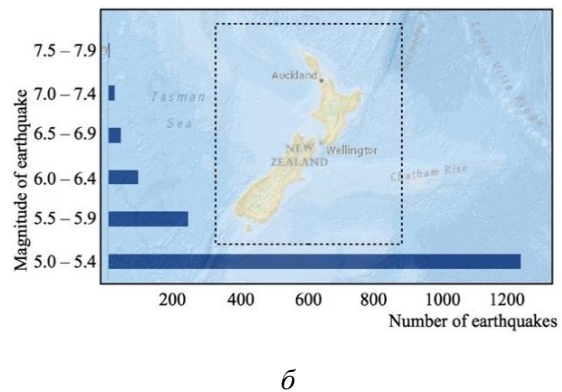
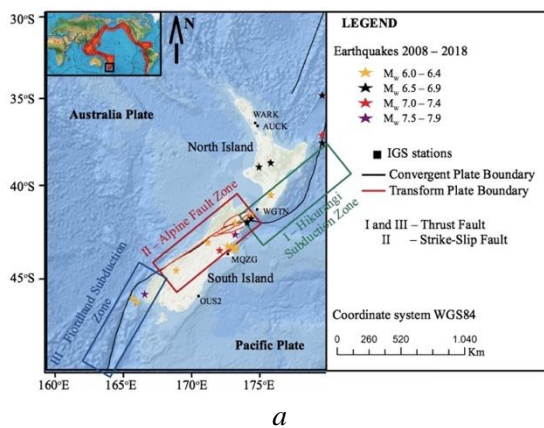


Рис. 1. Область дослідження:

а – тектонічні умови Нової Зеландії (дані про землетруси взято з USGS; дані про тектонічні налаштування із UNAVCO; на прямокутній карті в лівому верхньому куті Вогняне кільце); б – статистичні дані про землетруси в Новій Зеландії за 1900–2022 рр. (із USGS); прямокутна область відображає географічний регіон, для якого аналізували землетруси

Матеріали та методи

IGS створила в 1994 р. Міжнародна асоціація геодезії (IAG) з метою підтримки різноманітних наукових застосувань, пов’язаних із спостереженнями за Землею, океаном і кліматом. Нині він у вільному доступі для всіх користувачів із більш ніж 500 станціями у всьому світі та робить вагомий внесок у геодезичне вивчення деформацій земної кори. З моменту створення мережу IGS впровадили багато вчених для підтримки геодезичних досліджень тектонічних плит. У [Lee et al., 2008] автори використовували дані IGS для вивчення зміщення станцій через землетрус, який стався в Індонезії; [Yildirim et al., 2014] за допомогою даних IGS визначали тектонічні зміщення внаслідок Ванського землетрусу 2011 р. у Туреччині; [Altiner et al., 2006] зосередилися на оцінках швидкості навколо плити Адрія із використанням набору даних IGS. У цьому дослідженні дані збирали з бази

даних IGS у формі файлів RINEX із п’яти станцій, розташованих на Північному та Південному островах Нової Зеландії. На рис. 2 показано пам’ятку станцій, використаних у дослідженні, а в табл. 2 наведено їх географічні параметри. Файли RINEX отримано за десятирічний період із 2009 р. до 2018 р. включно. Для кожного року дані брали за ті самі дні року, а саме 1 січня та 1 червня. Необроблені дані опрацьовано за допомогою служби онлайн-обробки AUSPOS, із Geoscience Австралія. AUSPOS обчислює координати в декартовій і геодезичній системах координат, а також у системі UTM Grid з використанням еліпсоїда GRS80. Фазову попередню обробку виконували з використанням потрібної різниці, а невизначеності координат надавали щодо 95 % рівня довіри. У цьому дослідженні координати станцій визначено в декартовій міжнародній наземній системі відліку 2014 (ITRF2014). Зміщення в позиціонуванні то-

чок разом із відповідними темпами обчислено на основі розрахункових часових рядів.

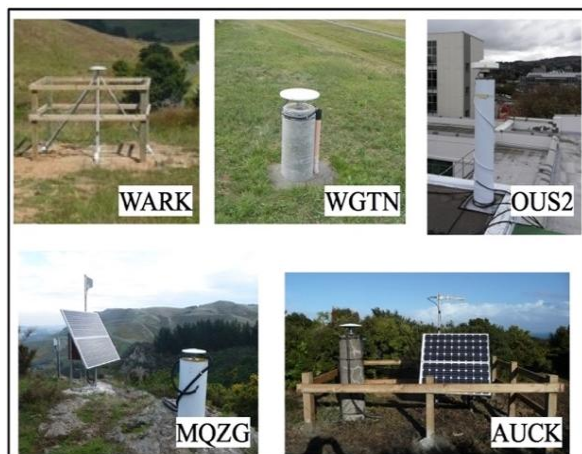


Рис. 2. Станції IGS, використані в дослідженні
Джерело: IGS.

Таблиця 2

Координати станцій IGS у системі відліку ITRF2014

Station	Широта, десятковий градус	Довгота, десятковий градус	Висота над рівнем моря, м
WARK	-36,434	174,663	111,000
AUCK	-36,603	174,834	132,711
WGTN	-41,323	174,806	26,060
MQZG	-43,703	172,655	154,680
OUS2	-45,869	170,511	26,100

Результати

Розбіжності у розташуванні станції розраховано із використанням широти, довготи та висоти станцій 1 січня 2009 року як базової епохи та 1 січня 2018 року як кінцевої епохи в системі відліку ITRF2014. На рис. 3–7 наведено графіки часових рядів позицій станцій IGS у північному, східному напрямках та висотному плані для кожної зі станцій. На цих рисунках зелений прямокутник містить інформацію про максимальні, мінімальні та середні переміщення, а сині графіки показують кумулятивні переміщення за увесь час. Період між 2009 і 2018 рр. демонструє майже схожі результати – лінійна модель часових рядів, за винятком станції MQZG у північному часовому ряді, де відхилення різко зростають, і за винятком точки 1 червня 2011 року для станції WARK за східним

часом серії. Це також можна помітити, аналізуючи кумулятивні графіки. Для станції MQZG такі відхилення від прямої лінії моделі цілком можна пояснити геологічними умовами досліджуваного району та наявністю косейсмічних деформацій. Що стосується станції WARK, то таке зміщення може бути зумовлене великою позиційною невизначеністю під час опрацювання даних, яка становила 0,053 м. Точність розрахованої координати довготи за межами 95 % рівня довіри і може вважатися викидом. У всіх інших випадках отримано позиційні невизначеності в діапазоні 0,002–0,009 м для широти та довготи та в діапазоні 0,007–0,013 м для положення.

На рис. 8 подано прямокутні графіки позиційних невизначеностей для всього періоду дослідження та в усіх напрямках.

Як видно з графіків часових рядів, дві станції, розташовані на Північному острові (WARK і AUCK), зміщені в південно-західному напрямку з підняттям на 310 мм і 303 мм відповідно. Три інші станції, одна на Північному острові (WGTN), і дві інші, розташовані на Південному острові (MQZG і OUS2), були зміщені в південно-східному напрямку з підняттями 303 мм, 203 мм і 211 мм відповідно. Максимальне зміщення по осі X (напрямок північ – південь) зафіксовано на станції WGTN – 255 мм, найбільше значення по осі Y (напрямок схід – захід) виявлено на OUS2, тобто 31 мм, а також найбільше підняття на станції WARK – 310 мм.

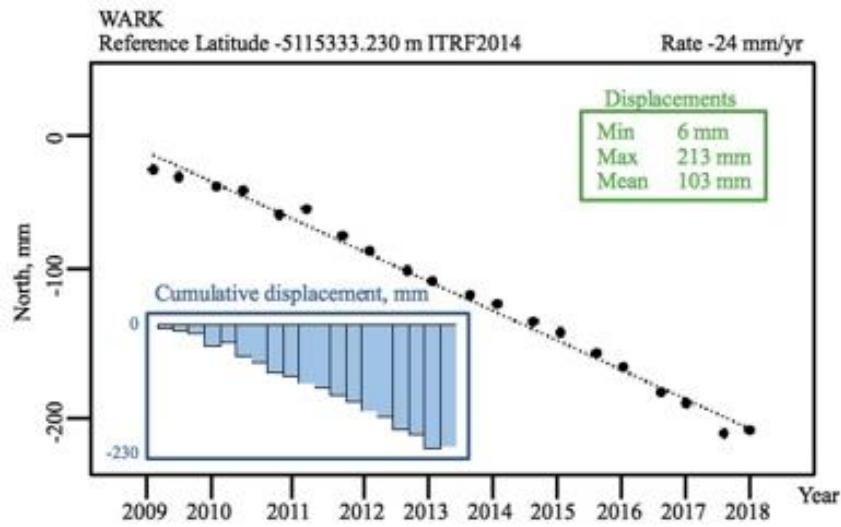
У табл. 3 наведено швидкості зміщення, розраховані на кожній станції, разом із коефіцієнтами невизначеності за 2009–2018 рр.

Таблиця 3

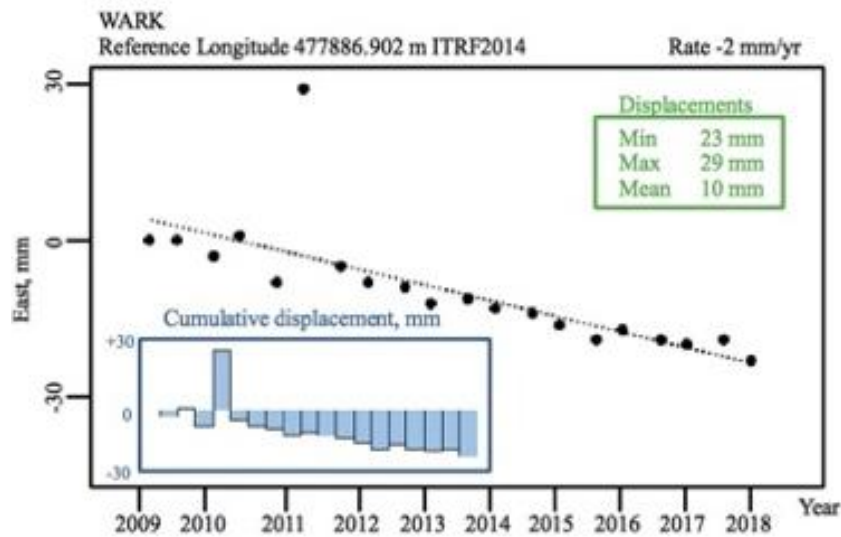
Швидкості горизонтального (D_N і D_E) і вертикального (D_U) зміщення станцій IGS з відповідними коефіцієнтами невизначеності в системі відліку ITRF2014 за 2009–2018 рр.

Станція	Швидкість переміщення, мм/рік			2D коефіцієнти невизначеності D_{NE} , мм/рік
	D_N	D_E	D_U	
WARK	-24±0,1	-2±0,1	32±0,1	24
AUCK	-25±0,2	-2±0,1	31±0,1	25
WGTN	-27±0,4	22±0,3	32±0,6	35
MQZG	-10±0,2	56±0,1	21±0,3	57
OUS2	-14±0,3	39±0,3	22±0,6	41

Північ



Схід



Висота

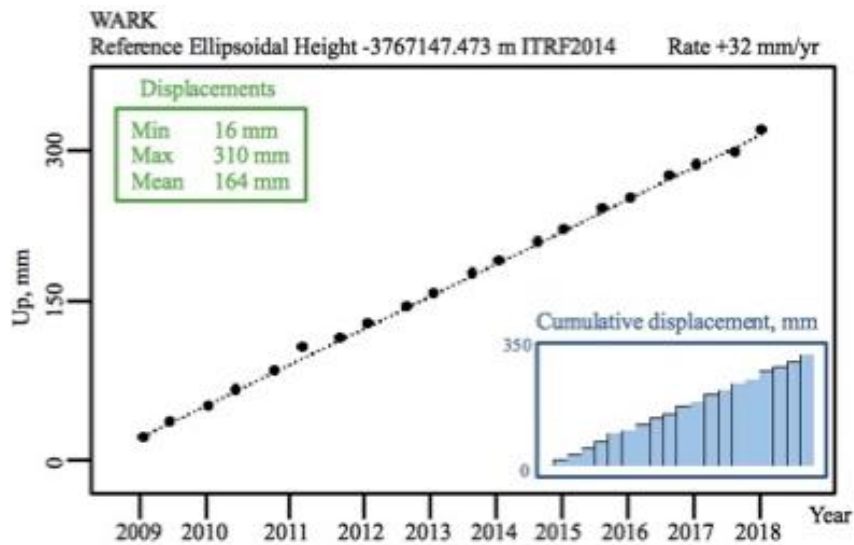


Рис. 3. Графіки часових рядів позицій станцій WARK

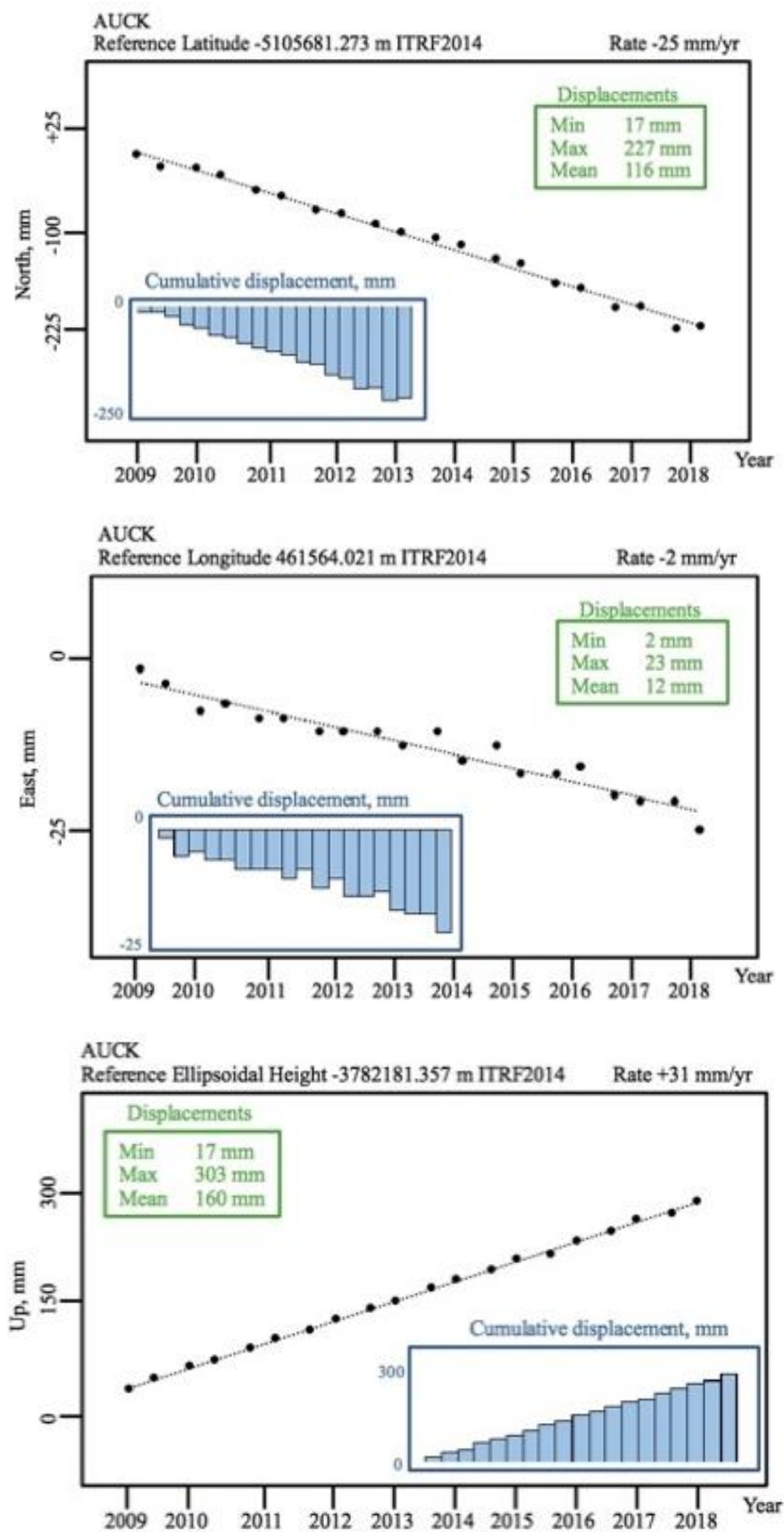


Рис. 4. Графіки часових рядів позицій станцій AUCK

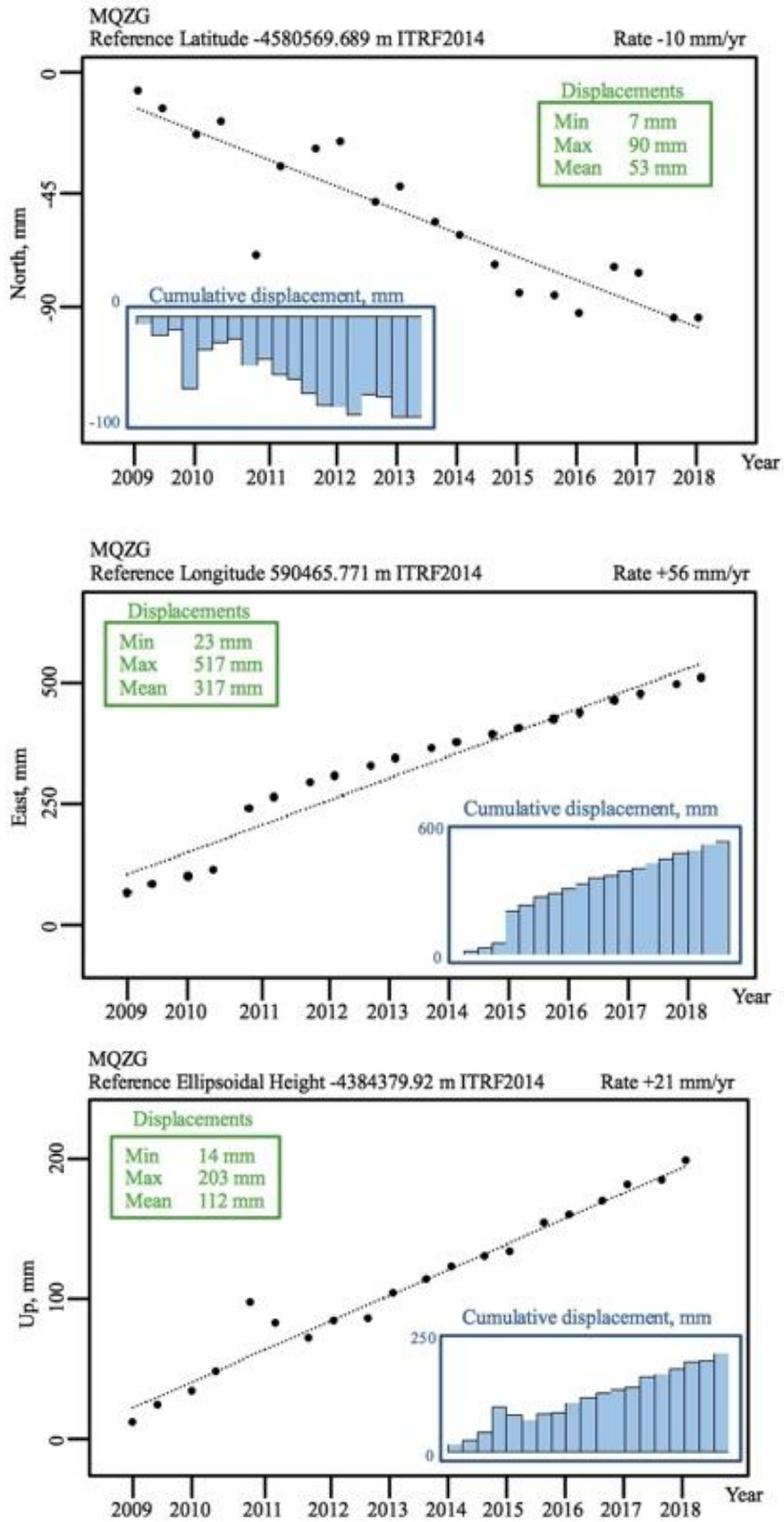


Рис. 5. Графіки часових рядів позицій станцій MQZG

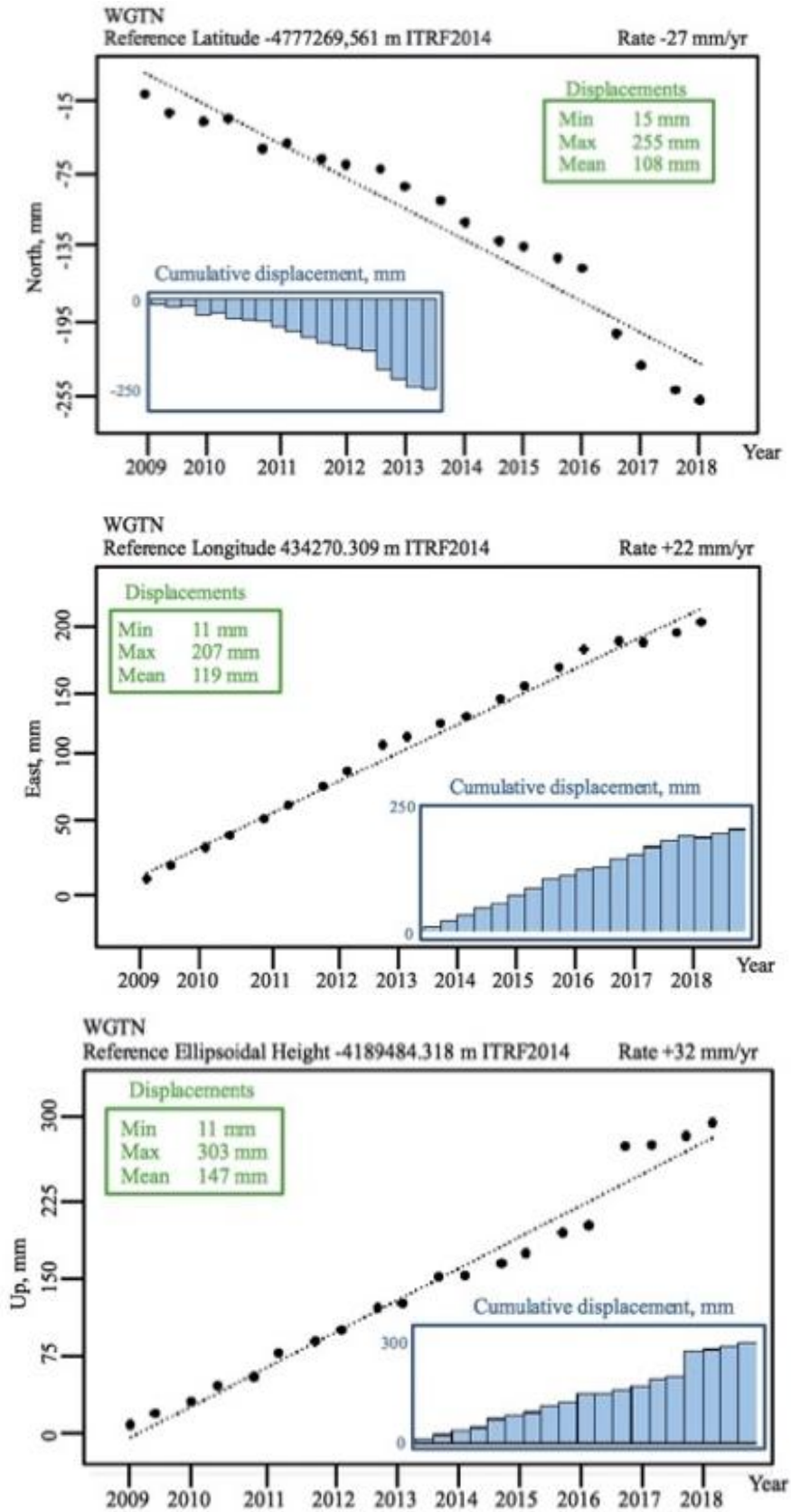


Рис. 6. Графіки часових рядів позицій станцій WGTN

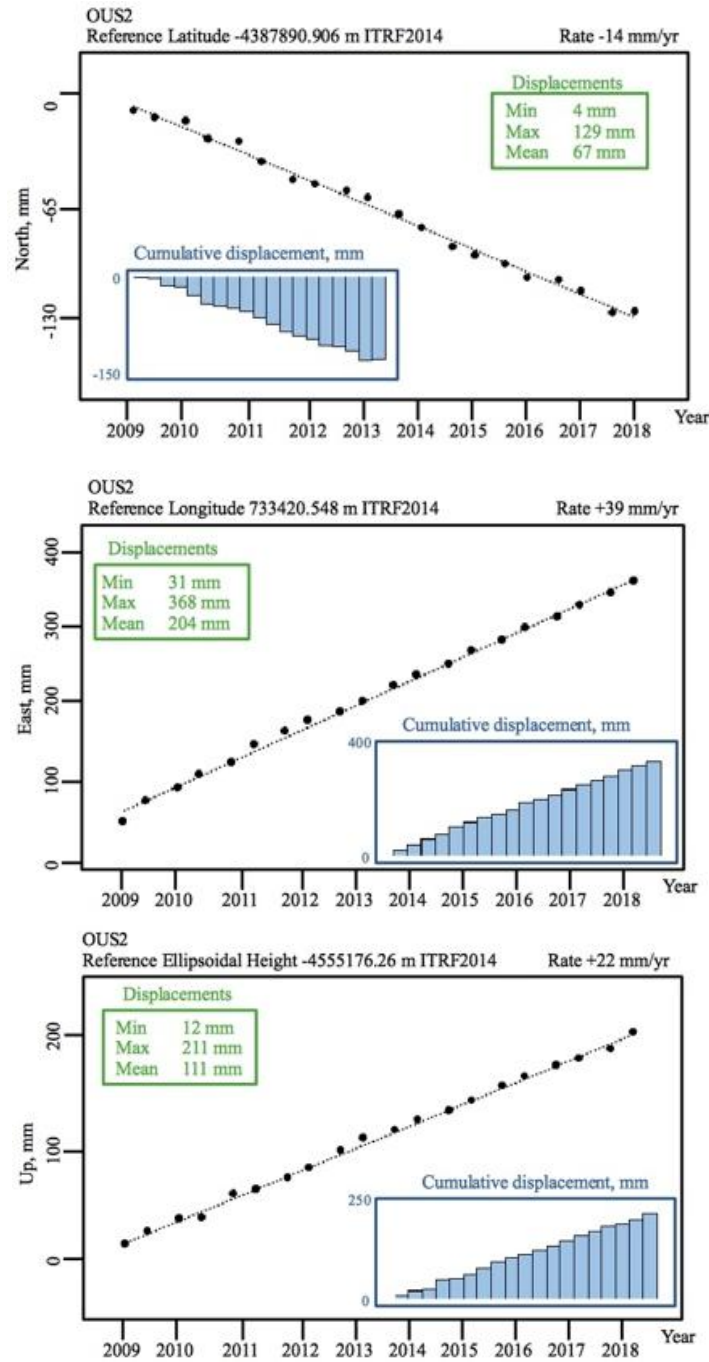


Рис. 7. Графіки часових рядів позицій станцій OUS2

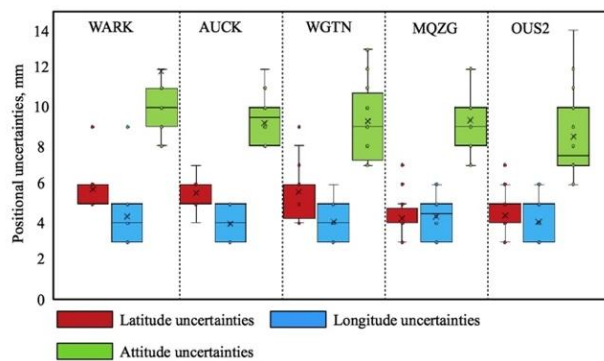


Рис. 8. Коробкові діаграми невизначеності координат з поглядом 95 % рівня довіри

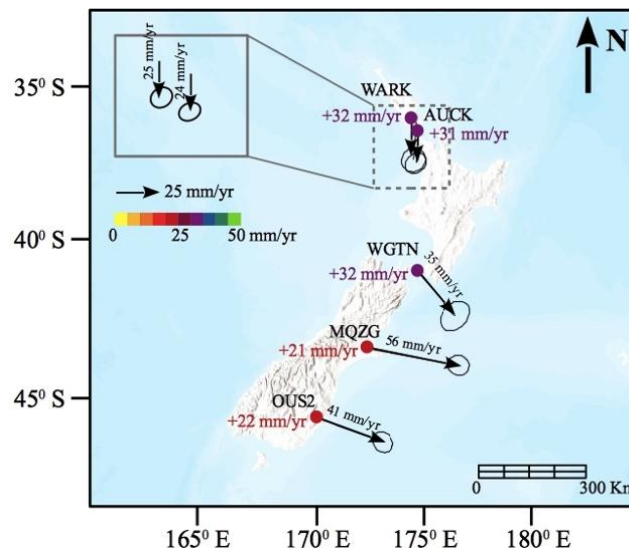


Рис. 9. Швидкості горизонтального та вертикального зміщення станцій IGS в ITRF2014 (2009–2018):

На рис. 9 візуально показано швидкості горизонтального та вертикального зміщення за період дослідження. На підставі горизонтальної швидкості можна вважати, що Австралійська плита штовхає Тихий океан уздовж нижньої частини Південного острова в південно-західному напрямку зі швидкістю понад 50 мм/рік і сповільнюється у верхній частині того ж острова на 35 мм/рік у різкішому південному напрямку. Ці моделі зміщень відображають складну тектонічну обстановку у верхній частині острова, де правий альпійський зсув розділяється на кілька гілок і плавно переходить у зону субдукції Хікуруангі. Переміщення станцій на вершині Північного острова мають південно-західний напрям із дуже плавним західним нахилом зі швидкістю 24 мм/рік. Це свідчить про субдукцію Тихоокеанської плити під Австралійську; чорні стрілки – вектори горизонтальних переміщень, у кінці кожного вектора – еліпси помилок з достовірністю 95 %; кольорові кола на кожній станції означають швидкість вертикального переміщення

Оригінальність

Встановлено горизонтальні та вертикальні зміщення плит земної кори для Нової Зеландії за 2009–2018 рр. Крім того, розраховано швидкості зміщення, що забезпечує повне розуміння рухів земної кори в межах досліджуваної області та протягом певного періоду.

Практичне значення та перспективи роботи

Деформації земної кори належать до змін земної поверхні внаслідок енергії та деформації, яка

накопичується в корі, а потім вивільняється у формі землетрусу. Досліджено динамічні процеси руху Тихоокеанської та Австралійської плит, які підтверджують активні зони геологічних утворень масиву островів Нової Зеландії. Розуміння цих змін поверхні та деталей деформацій масиву, а також їх впливу на наявні геологічні розломи має вирішальне значення для з'ясування того, які частини розломів, швидше за все, спричинять наступний землетрус. Крім того, параметри зміщень внаслідок землетрусу або під час косейсмичного періоду дають змогу краще зрозуміти геодинаміку земної кори і, завдяки цьому, зробити вагомий внесок у вивчення руху тектонічних плит. Це ілюструє деякі із багатьох можливих значень цього дослідження, результати якого містять важливі основні висновки для подальших досліджень рухів земної кори Нової Зеландії.

Виконане дослідження обмежене декількома GPS-станціями, але в перспективі може бути розширене на всю територію Нової Зеландії. Також вважаємо корисним вивчити окремі геологічні зони, щоб дослідити потенційні динамічні процеси, що спричиняють певні деформації.

Висновки

Сформовано лінійні моделі часових рядів горизонтальних та вертикальних зміщень плит земної кори для п'яти моніторингових станцій IGS, які розташовані в сейсмічній зоні Північного і Південного островів Нової Зеландії. Аналіз отриманих результатів щодо параметрів зміщень станцій IGS дав змогу визначити напрямок руху тектонічних плит, витриманість динамічних процесів,

значення горизонтальних та вертикальних зміщень плит та швидкість цих процесів.

На Північному острові (станції WARK і AUCK) виявлено зміщення в південно-західному напрямку, а на Південному (станції MQZG і OUS2) зміщення в південно-східному напрямку. Різні напрямки пояснюють належність станцій Австралійській та Тихоокеанській плитам відповідно. Максимальне горизонтальне зміщення по осі X (напрямок північ – південь) виявлено на станції WGTN – 255 мм, найбільше значення по осі Y (напрямок схід – захід) на OUS2, тобто 31 мм.

Встановлено підняття станцій WARK і AUCK на 310 мм і 303 мм, а станцій WGTN, MQZG і OUS2 – 303 мм, 203 мм і 211 мм відповідно. Максимальне вертикальне зміщення по осі Z, тобто найбільше підняття, виявлено на станції WARK – 310 мм. Цей фактор “дружнього підняття” пояснюється за допомогою карти із активними геологічними зонами тектонічних порушень (див. рис. 1, а), де видно, що всі станції розміщені на ділянках, які піднімаються (зона I карти – Тихоокеанська плита просувається під Австралійську плиту та навпаки на карті III).

Створено карту швидкості горизонтальних і вертикальних переміщень із зазначенням напрямку руху станцій. Результати свідчать про чітке зміщення на південний схід на Південному острові та невелике зміщення на південний захід на Північному острові протягом періоду дослідження. Розраховані горизонтальні швидкості 24, 25, 35, 57 і 41 мм/рік для станцій WARK, AUCK, WGTN, MQZG і OUS2 відповідно, а вертикальні швидкості – 32, 31, 32, 21 і 22 мм/рік для тих самих станцій.

Список літератури

- Зуска А. В. Кинематическая модель оползневых склонов: монография. *Донецк: Нац. горн. ун-т*, 2014. 140 с.
- Четверик М., Бубнова О., Бабий К., Батур М. Техногенные землетрясения и безопасность горных работ. *Геотехническая механика*, 2017. Вып. 136. С. 127–146.
- Alif, S. M., Fattah, E. I., Kholil, M. (2020). Geodetic slip rate and locking depth of east Semangko Fault derived from GPS measurement. *Geodesy and Geodynamics*, 11(3), 222–228.
- Altiner, Y., Vačić, Ž., Bašić, T., Coticchia, A., Medved, M., Mulić, M., Pavlides, S. (2006). Present-day tectonics in and around the Adria plate inferred from GPS measurements. *Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia*, 409, 43–55.
- Árnadóttir, T., Haines, J., Geirsson, H., Hreinsdóttir, S. (2018). A preseismic strain anomaly detected before M 6 earthquakes in the South Iceland Seismic Zone from GPS station velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(12), 11–091.
- Bartlow, N. M., Wallace, L. M., Beavan, R. J., Bannister, S., Segall, P. (2014). Time dependent modeling of slow slip events and associated seismicity and tremor at the Hikurangi subduction zone, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(1), 734–753.
- Beavan, J., Motagh, M., Fielding, E. J., Donnelly, N., Collett, D. (2012). Fault slip models of the 2010–2011 Canterbury, New Zealand, earthquakes from geodetic data and observations of postseismic ground deformation. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 55(3), 207–221.
- Beavan, J., Wallace, L. M., Palmer, N., Denys, P., Ellis, S., Fournier, N., Denham, M. (2016). New Zealand GPS velocity field: 1995–2013. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 59(1), 5–14.
- Cremen, G., Galasso, C. (2020). Earthquake early warning: Recent advances and perspectives. *Earth-science reviews*, 205, 103184.
- Dumka, R. K., Kotlia, B. S., Kothyari, G. C., Paikrey, J., Dimri, S. (2018). Detection of high and moderate crustal strain zones in Uttarakhand Himalaya, India. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 53(3), 503–521.
- Hamling, I. J. and Hreinsdóttir, S. (2016). Reactivated afterslip induced by a large regional earthquake, Fiordland, New Zealand. *Geophysical Research Letters*, 43(6), 2526–2533.
- Ishchenko, M. V. (2017). Determination of crustal strain in the northern region of Ukraine based on the analysis of GNSS observations. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 33(6), 302–308.
- Johnson, K. M. (2013). Slip rates and off fault deformation in Southern California inferred from GPS data and models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(10), 5643–5664.
- Johnston, D., Standring, S., Ronan, K., Lindell, M., Wilson, T., Cousins, J., Bissell, R. (2014). The 2010/2011 Canterbury earthquakes: context and cause of injury. *Natural Hazards*, 73(2), 627–637.
- Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., Syafi'i, M. A. (2016). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda Banda Arc. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 1943–1949.
- Larson, K. M., Lowry, A. R., Kostoglodov, V., Hutton, W., Sánchez, O., Hudnut, K., Suárez, G. (2004). Crustal deformation measurements in Guerrero, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B4).

- Lee, E. S., Lee, Y. W., Park, J. H. (2008). Displacement analysis of the GPS station of Sampali, Indonesia. *Earth, planets and space*, 60(5), 519–528.
- Leite, J., Lourenco, P. B., Ingham, J. M. (2013). Statistical assessment of damage to churches affected by the 2010–2011 Canterbury (New Zealand) earthquake sequence. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(1), 73–97.
- Luginbuhl, M., Rundle, J. B., Turcotte, D. L. (2019). Natural time and nowcasting earthquakes: are large global earthquakes temporally clustered?. In *Earthquakes and Multi-hazards Around the Pacific Rim*, Vol. II, 137–146. Birkhäuser, Cham.
- Metzger, S., Jónsson, S., Geirsson, H. (2011). Locking depth and slip-rate of the Húsavík Flatey fault, North Iceland, derived from continuous GPS data 2006–2010. *Geophysical Journal International*, 187(2), 564–576.
- Richter, A., Ivins, E., Lange, H., Mendoza, L., Schröder, L., Hormaechea, J. L., Dietrich, R. (2016). Crustal deformation across the Southern Patagonian Icefield observed by GNSS. *Earth and Planetary Science Letters*, 452, 206–215.
- Shen, F., Royden, L. H., Burchfiel, B. C. (2001). Large-scale crustal deformation of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B4), 6793–6816.
- Su, X., Meng, G., Su, L., Wu, W., Liu, T. (2020). Coseismic and early postseismic deformation of the 2016 Mw 7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand, from continuous GPS observations. *Pure and Applied Geophysics*, 177(1), 285–303.
- Tenzer, R., Stevenson, M., Denys, P. (2012). A compilation of a preliminary map of vertical deformations in New Zealand from continuous GPS data. In *Geodesy for Planet Earth*, 697–703. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Tretyak, K., Brusak, I. (2022). Modern deformations of Earth crust of territory of Western Ukraine based on “GEOTERRACE” GNSS network data. In *Geodynamics*, 1(32), 16–25.
- Yildirim, O., Yaprak, S., Inal, C. (2014). Determination of 2011 Van/Turkey earthquake (M=7.2) effects from measurements of CORS-TR network. *Geomatics, natural hazards and risk*, 5(2), 132–144.
- Zheng, G., Wang, H., Wright, T. J., Lou, Y., Zhang, R., Zhang, W., Wei, N. (2017). Crustal deformation in the India Eurasia collision zone from 25 years of GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(11), 9290–9312.

Maryna BATUR¹, Kateryna BABII²

¹ Istanbul Technical University, Department of Geomatics Engineering, Graduate School, Ayazaga Campus, Maslak, Istanbul, 34469, Turkey, e-mail: baturm20@itu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-9284-8858>

² M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Simferopolska, Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: babiyev@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0733-2732>

TRENDS IN HORIZONTAL AND VERTICAL CRUSTAL DISPLACEMENTS BASED ON INTERNATIONAL GNSS SERVICE DATA: A CASE STUDY OF NEW ZEALAND

The coordinate time series of five International GNSS Service (IGS) permanent stations located in New Zealand were analyzed for their annual movement from 2009 to 2018 years. The raw data in the form of Receiver Independence Exchange (RINEX) files were taken from IGS database and processed using online processing service AUSPOS. Using coordinate time series, horizontal and vertical displacement rates were calculated covering the ten-years study period. According to the results, stations located at the North Island of New Zealand revealed the uplift of 31–32 mm/yr., while stations placed on the South Island showed the 21–22 mm/yr. of positive vertical displacement. Regarding the horizontal displacements, their rates increase in North-South direction over the study region. In particular, two stations of North Island, located at the North-Western part, appeared in 24–25 mm/yr. displacement, and one station at the Southern part of North Island showed the 35 mm/yr. displacement rate. Stations that established at South Island showed the horizontal displacement rates of 41–56 mm/yr. This research documents the main contribution made to the field of crustal deformation studies, that is the updated values of displacements along with their directions over the recent years. The results of this study can be used for further geodynamics investigations as well as for finding the most likely earthquake locations of the current study area.

Key words: crustal deformations; displacement; IGS data; time series; New Zealand; earthquake; seismic region.

Надійшла 02.09.2022 р.