

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРІОДИЧНИХ ЗМІН ВИСОТНОГО ПОЛОЖЕННЯ СУПУТНИКОВИХ ПЕРМАНЕНТНИХ СТАНЦІЙ СВІТУ

З метою вивчення характерних періодів гармонічних коливань часових серій координат перманентних ГНСС станцій, що зумовлені різними геофізичними чинниками, виконано комплекс досліджень. Складено базу даних щоденних часових серій 111 перманентних станцій, спостереження на яких виконувалися впродовж не менше ніж трьох років. Перманентні станції розташовані по всьому світу, на різних тектонічних плитах. Розроблено алгоритм та пакет прикладних програм для обробки часових серій і визначення оптимальних кривих, які максимально достовірно їх описують. Для кожної станції записано рівняння для визначення оптимального періоду коливань.

Виявлено аномальний розподіл коливань значень координат перманентних ГНСС станцій з різними періодами, що свідчить про складний характер впливу на просторове розташування цих станцій різних геофізичних факторів. Накопичені результати аналізу часових серій значень координат вказують на необхідність систематичних досліджень впливу різних геофізичних факторів на стійкість та зміщення перманентних станцій.

Ключові слова: часові серії значень координат перманентних ГНСС станцій; гармонічні коливання часових серій; геофізичні фактори; інструментальні фактори.

Вступ

Понад двадцять років ведуться спостереження з визначення координат та швидкостей перманентних ГНСС станцій. За ці роки накопичено значні масиви даних, постійно вдосконалюються методи і способи їх опрацювання, тому що підвищення точності визначення координат і швидкостей станцій ШСЗ є однією з важливих проблем сучасної геодинаміки. Для розв'язання цієї проблеми постійно вдосконалюють апаратуру та методику спостережень а також алгоритми та програмне забезпечення для їх опрацювання. Збільшують густоту покриття перманентними станціями земної поверхні, оскільки відомо, що точність щоденних чи щотижневих розв'язків залежить від таких факторів, як середня відстань між перманентними станціями мережі, максимальна віддаленість окремих станцій від центра ваги мережі.

Завдяки цим заходам сьогодні досягнута точність визначення координат більшості станцій в мережах IGS та EPN у 3–4 мм.

Постановка завдання

З досліджень відомо, що зміна координат перманентних станцій, отримана за результатами щоденних і щотижневих розв'язків часових серій, має загалом лінійний характер, зумовлений рухом тектонічної плити, на якій розташована станція. Крім того, більшості часових серій перманентних станцій притаманні періодичні коливання.

Періодичні коливання є наслідком впливу багатьох факторів: екзогенних, ендегенних та інструментальних.

До екзогенних факторів належать: припливні ефекти (вплив Сонця і Місяця та океанічне навантаження); обертовий рух Землі; атмосферний вплив (зміна тиску, температури, рух повітряних мас); післяльодовикова віддача (постгляціація) та баланс льодовикових і снігових мас; температурне розширення земної поверхні.

До ендогенних факторів впливу належать: тектоніка плит; сейсмічна активність; зміни гравітаційного поля Землі; зміни рівня ґрунтових вод.

Інструментальні фактори – це геометрія сузір'я

спутників (спутникова конфігурація та їх орбіти); тропосферна та іоносферна затримки; вплив багатопронемовості, похибки обладнання; похибки програмних пакетів (репроцесинг опрацювання даних).

Взаємодія цих факторів суттєво впливає на визначення положення перманентних станцій (рис. 1). Тому отримані миттєві координати перманентних станцій можна використовувати для моніторингу та моделювання сучасних рухів Землі та прогнозування небезпечних явищ після відповідної обробки.

Для дослідження геодинаміки Землі дуже важливо з одержаних за результатами ГНСС вимірів часових рядів координат перманентних станцій виділити саме вплив геофізичних факторів, відсіюючи шуми, використовуючи відповідні шумові фільтри. Крім того, важливо розділити різні за природою геофізичні навантаження: рух тектонічних плит; постгляціацію; циклічні землетруси: пресеїсмічні, косеїсмічні та постсеїсмічні деформації та сезонні навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, присвячених вирішенню проблеми

Точний розрахунок впливу геофізичних факторів на просторове положення перманентних станцій є складною фізичною і технічною задачею. Для початку необхідно відфільтрувати періодичні збурення, неперіодичні та вікові шуми, оскільки вони спотворюють часові серії значень координат перманентних станцій. Причини виникнення шумів досить різноманітні. Вони можуть бути пов'язані з непрогнозованими або помилково змодельованими фізичними явищами, такими як моделювання впливу атмосферних мас, іоносфери, припливів, або повністю не прогнозованими тектонічними деформаціями та навантаженнями. Ці шуми можуть бути подібними до впливів геофізичних явищ, але їх вплив у кожному окремому випадку може залежати від умов спостережень (конфігурації супутників, тропосферної та іоносферної затримки), використаної техніки (похибки приймача та антени, похибка годинника супутника і приймача) та програмного забезпечення, або від похибок, пов'язаних з опрацюванням даних.

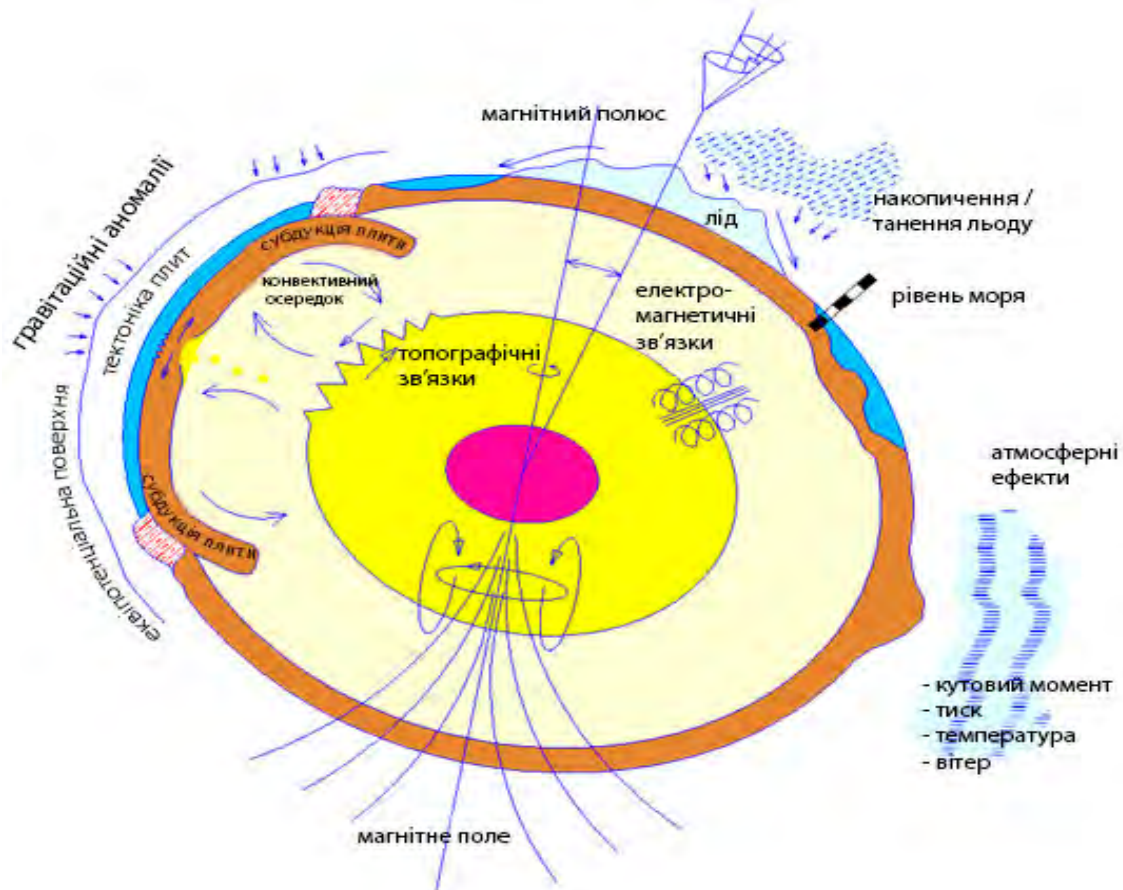


Рис. 1. Вплив геофізичних чинників на періодичні коливання координат перманентних станцій ([Calais, 2001] та ін.)

Вивчення геофізичних впливів на часові серії значень координат перманентних станцій

Для дослідження геодинаміки Землі важливо комплексно вивчати вплив на неї всіх зовнішніх і внутрішніх геофізичних факторів, оскільки усі вони знаходять відображення у часових серіях значень координат перманентних станцій.

Аналіз екзогенних геофізичних факторів

Припливні ефекти – це вплив Сонця і Місяця та океанічне навантаження (зміна рівня води, припливно-відпливні ефекти).

Причиною припливів є обертання Землі у гравітаційному полі Сонця і Місяця. Оскільки створені ними ефекти незалежні, то вплив цих небесних тіл на Землю можна розглядати окремо. У такому випадку для кожної пари тіл можна вважати, що кожне з них обертається навколо спільного центра мас. Для пари Земля – Сонце цей центр розміщений у надрах Сонця на відстані 451 км від його центра. Для пари Земля – Місяць він розташований у надрах Землі на відстані 2/3 радіуса від її центра.

Приливна сила – це результат конкуруючої взаємодії сили тяжіння, спрямованої до центра гравітації (ця сила зменшується обернено пропорційно до квадрата відстані від нього) і відцент-

рової сили інерції, зумовленої обертанням небесного тіла навколо цього центра. Ці сили, протилежні за напрямом, збігаються за величиною тільки в центрі мас кожного з небесних тіл. Завдяки дії внутрішніх сил Земля обертається навколо центра Сонця як ціле з постійною кутовою швидкістю для кожного елемента її маси. Тому в міру віддалення цього елемента маси від центра гравітації відцентрова сила, що діє на нього, зростає пропорційно до квадрата відстані.

У результаті на поверхні Землі виникає припливна хвиля, що займає постійне положення в системах тіл, що взаємно тяжіють, і рухається по поверхні Землі синхронно з її добовим рухом. Збуджувальна дія приливних сил деформує рівневу поверхню планети. Теоретичні розрахунки оцінюють цю деформацію у величину ~36 см.

Під дією приливних сил деформується не тільки водна оболонка, але й тверде тіло Землі. Спостерігаючи приливні хвилі на твердій поверхні Землі, вчені зробили висновок про пружність речовини Землі, що нагадує властивості сталевій кулі.

Щорічно повторюваний припливно-відпливний цикл залишається незмінним внаслідок точної компенсації сил тяжіння між Сонцем і центром мас планетної пари і силами інерції, доданими до цього центра.

Оскільки положення Місяця і Сонця відносно Землі періодично змінюється, змінюється й інтенсивність результуючих припливно-відпливних явищ.

Дослідженням проявів припливних ефектів у часових рядах значень координат перманентних станцій займалися Ван Дам, П. Трегонін та ін. [Van Dam et al., 1994, 2007; Lyard et al., 2006; Tregoning, Van Dam, 2005; Tregoning et al., 2009]. Так, Ван Дам [Van Dam et al., 2001] у 2001 р., спостерігаючи вплив континентального водного припливу на часові серії значень координат перманентних ГНСС станцій, доводить, що вертикальний вплив становить 9–15 мм, горизонтальний до 5 мм.

У 2002 р. Пенг Фанг [Peng Fang, 2002] досліджував впливи, які відображаються у часових серіях значень координат перманентних станцій. З аналізу отриманих результатів він встановив, що розмір впливу деформації через океанічні припливні навантаження на точність визначення положення станцій становить $\approx 0,1$ мм.

Обертальний рух Землі

Відомо, що обертальний рух Землі не є рівномірним. Під час обертання Землі: 1) змінюється швидкість її обертання; 2) коливається вісь обертання у просторі; 3) рухаються географічні полюси. Ця нестабільність спотворює координати небесних і земних об'єктів та проявляється у часових рядах значень координат перманентних станцій.

1. Дія Місяця на Землю сповільнює її обертання завдяки дії закону збереження моменту імпульсу та закону збереження енергії. Момент імпульсу обертання Землі зменшується, а орбітальний момент імпульсу Місяця збільшується. Зі зменшенням моменту імпульсу обертання Землі її обертання сповільнюється, а тривалість доби збільшується. Тобто внаслідок припливного прискорення Місяця сповільнюється обертання Землі. Величина відповідної зміни тривалості доби становить $1,70 \pm 0,05$ мс/століття.

Існує й інший ефект, який прискорює обертання Землі. Земля є не кулею, а еліпсоїдом, сплюснутим від полюсів до екватора. Лазерні вимірювання із супутників показують, що ця еліпсоїдність зменшується, міжполюсна відстань збільшується завдяки постгляціації. Як наслідок, міжполюсний діаметр Землі збільшується, а екваторіальний діаметр зменшується, оскільки середня густина і об'єм Землі залишаються незмінними.

У результаті зменшення екваторіального діаметра зменшується момент інерції Землі, внаслідок чого швидкість обертання Землі за законом збереження моменту імпульсу зростає.

На основі спостережуваної зміни форми Землі та її моменту інерції розраховано відповідне прискорення обертання і зміну тривалості доби. Середнє значення за історичний період має становити приблизно: $-0,6$ мс/століття.

2. В результаті гравітаційного притягання Місяцем і Сонцем екваторіального потовщення Землі виникає момент сил, що прагне сумістити пло-

щини екватора та екліптики. Тому вісь обертання Землі відхиляється від полюса світу, рухаючись вздовж складної кривої. Цей складний рух включає прецесію з періодом близько 26 тисяч років та нутаційні рухи з періодами від декількох днів до 18,6 року [Brown, 1989; Šnajdrová et al., 2006; Кауфман, 1994]. Рух, пов'язаний з довгоперіодними нутаціями (більш ніж 90 днів), описується рівнянням рівнодення. Менші нутаційні періоди враховуються рівнянням для геоцентричної екліптичної довготи Місяця. Рухаються точки осі обертання, у яких вісь перетинає земну поверхню. Миттєві полюси Землі (точки, у яких вісь перетинає земну поверхню) переміщуються по земній поверхні навколо середнього полюса у бік обертання Землі, тобто із заходу на схід. Траєкторія руху полюсів має вигляд спіралі, яка періодично то закручується, то розкручується. Найбільше відхилення миттєвого полюса від середнього становить 15 м.

3. Центр спіралі розміщений у стороні від міжнародного умовного початку координат. Причиною цього є віковий рух географічного полюса [Сидоренков, 2004]. Якщо з часових рядів значень координат полюса виділити річну та чандлерівську складові, то залишаться координати середнього полюса. Він теж зміщується (за даними спостережень за 1890–2000 рр.). Впродовж періоду спостережень середній полюс переміщувався по складній зигзагоподібній кривій з переважанням напрямку в бік Північної Америки (меридіан 290° східної довготи) зі швидкістю близько 10 см за рік.

Полюсний приплив [Антонович, 2005] є реакцією еластичної кори Землі на зміщення полюса обертання. Для компонент полярного руху близько 10 м максимальний зсув сягає 10–20 мм.

За даними досліджень Пенг Фанга [Peng Fang, 2002], величина впливу полюсного припливу на точність визначення положення станцій становить ≈ 4 мм.

Визначаючи часові ряди значень координат перманентних станцій у системі координат ITRF, враховують ефекти нутації та прецесії, крім випадкових шумів субміліметрової величини.

Атмосферний вплив (зміни тиску, температури, рух повітряних мас)

Ефекти від впливу варіацій атмосферного тиску [Scherneck and Bos, 2002; Тимофеев и др., 1998] проявляються у вертикальних і горизонтальних зміщеннях земної поверхні і давно відомі у високоточній гравіметрії. Розрахунки багатьох авторів ґрунтуються на теорії пружності [Rabbel, Zschau, 1985]. Підвищення точності визначень координат вимагає враховувати три ефекти: локальний – циклонів і антициклонів з розмірами в 160–400 км, глобальний – з розмірами близько 2000 км і вплив різких границь (типу суша-море). Так, на території Сибіру в умовах різкоконтинентального клімату варіації атмосферного тиску близькі до максимальних на Землі – понад 60 мбар (до 0,01 МПа),

що може призводити до таких ефектів: вертикальних зміщень земної поверхні у 25 мм; до 2,5 мм – горизонтальних; до 20 мкГал (200 нм/с²) – варіацій сили тяжіння; до 10⁻⁸ – у деформаціях і нахилах. Уточнені оцінки з урахуванням в'язкості мантії можуть змінити ці цифри на 10–20 %.

Дослідженням впливу атмосферного навантаження на позиції перманентних станцій у різних часових поясах займався Еріх Калайс [Calais, 2006]. Він також зробив висновок, що періодичні коливання можуть бути викликані після обробки фази даних (наприклад, фільтрацією часових серій за великі періоди часу). А щоденні похибки мають бути враховані на етапі обробки даних, інакше добова похибка може сягати 2 см.

Дослідивши вплив атмосферного навантаження на координати пунктів для 17 російських станцій за три роки (2005–2007), З.М. Малкін встановив, що саме він безпосередньо призводить до виникнення систематичних помилок у визначенні координат станцій величиною до декількох сантиметрів [Малкін, 2008]. Причому зміни висоти під дією цього впливу досягають 3 см, а горизонтальні зміщення – 5 мм. І навіть більше, регресійний аналіз рядів атмосферного навантаження виявив, що крім сезонного тренду в змінах висот станцій наявний також помітний добовий тренд, величина якого залежить від географічного регіону. Тому введення зміни координат станції за атмосферне навантаження у наявні результати обробки спостережень дає можливість редукувати цей вплив на попередні спостереження [Малкін, 2008]. Також розраховано вплив атмосферного навантаження на швидкості зміщення станцій у вертикальному і горизонтальному напрямках для безперервних спостережень для різного часового інтервалу і зроблено висновок, що тільки безперервні спостереження тривалістю понад 6 років можуть забезпечити сучасні вимоги до визначень швидкостей руху фундаментальних станцій на рівні 1 мм/рік, якщо при обробці спостережень не враховано атмосферний вплив.

На наш погляд, значення атмосферного впливу на висотне положення перманентних станцій у 3 см є дискусійним.

За Пенг Фангом [Peng Fang, 2002] величина впливу перерозподілу атмосферних мас на точність визначення положення станцій близько 4 мм.

Післяльодовикова віддача (гляціація) та баланс льодовикових і снігових мас

Під час останнього льодовикового періоду біля полюсів утворилися великі льодові маси, які притиснули земну поверхню. Із закінченням обмерзання близько 10000 років тому ці полярні шапки почали танути. Земна кора досі не досягла гідростатичної рівноваги, як наслідок міжполюсний діаметр Землі збільшується (відбувається підняття), а екваторіальний зменшується, оскільки густина та об'єм Землі залишаються незмінними.

Танення льоду викликає підвищення рівня моря і підйом землі, який компенсується припливами в

мантії. Зменшення льодовиків також має слабкий гравітаційний ефект, тобто поблизу морської поверхні густина морської води падає, і тому тала вода розподілена нерівномірно у Світовому океані. Збільшення маси моря також навантажує і деформує дно.

За сучасними уявленнями додаткове і дуже помітне навантаження, пов'язане з покривним заледенінням, викликає горизонтальне розтікання підкорових мас від області заледеніння до її периферії. Це відбувається в астеносфері – шарі зниженої в'язкості, який розташовується на глибинах від 50 до 350 км. Зняття льодовикового стресу викликає зворотний рух підкорових мас.

За геофізичними даними земна кора під внутрішніми частинами Антарктичного і Гренландського льодовикових покривів ізостатично прогнута на величину, що дорівнює 1/3–1/4 товщини налягання льоду. Також встановлено, що й дегляціація Британських островів, Скандинавського півострова, Канади, шельфу Баренцового моря та багатьох інших областей супроводжувалася інтенсивними компенсаційними підняттями, які в деяких областях тривають і нині. Голоценові підняття властиві і периферійним областям сучасного покривного зледеніння Антарктиди і Гренландії.

Сучасний стан цих процесів у північній частині Європи контролює мережа GPS під назвою "Біфрост". Перші спостереження станцій "Біфрост" почалися у 1991 р., а мережу (7 станцій) створено у 1993 р. [Virtanen, Mäkinen, 2002; Virtanen, 2004; Nordman et al., 2009; Virtanen et al., 2011].

Результати GPS спостережень показують пікову швидкість підняття близько 11 мм / рік у північній частині Ботнічної затоки, швидкість підняття зменшується з наближенням до меж колишнього зледеніння, і за цими межами стає від'ємною (підняття змінюються опусканнями).

Уздовж східного узбережжя США спостерігаються опускання, тут давні пляжі розміщені нижче від сучасного рівня моря, процес триває, і Флорида, як очікується, зануриться в море.

Марія Нордман [Nordman, 2010] вивчала вплив постгляціаційних процесів, викликаних таненням льодовиків, у Балтійському морі, і виявила його прояв у деформаціях земної кори та у часових серіях значень координат мережі перманентних станцій. Під час опрацювання таких часових серій вона враховувала зовнішні впливи: зміну атмосферного тиску, гідрологічні навантаження і неприпливне навантаження океану. Також вона використовувала різні моделі впливу гідрологічного навантаження та зробила висновок, що використання різних моделей дає різний прояв у часових серіях, який залежить від місця розташування перманентної станції. Крім того, геофізичними впливами пояснюється 30 % часового тренду координат перманентних станцій.

Регіональними дослідженнями Північного моря займалися Ф. Фратіпєтро та ін. ([Fraterpietro et al., 2006], у Бретані (Франція) – С. Вей, Е. Калайс та ін. [Vey et al., 2007]. Вертикальні рухи земної поверхні за даними 15 станцій вздовж північної границі

Тихоокеанської американської плити визначали з урахуванням зміни рівня моря за записами мареографів [Christopher et al., 2003]. Аналіз був оснований на результатах вимірів середньомісячних рівнів моря, з яких вилучено атмосферний вплив та сезонні ефекти. Спостерігаються невеликі вертикальні рухи вздовж південної мережі зсувних плит. Дуже швидкий підйом північної границі можна пояснити в'язкопружним післяльодовиковим відступом, пов'язаним з припливно-льодовиковим відступом у льодовикову затоку.

Вивчаючи вплив сезонних змін на добові розв'язки та зміни у положенні перманентних станцій регіональної мережі Північної Америки та Антарктики, Т. Фремюллер [Freymueller, 2006/2008] зауважив, що тут проявляються річні та піврічні періоди. У Північній Америці сезонні зміни взагалі збігаються з очікуваною фазою від снігового навантаження, а їх амплітуди співвідносяться з даними досліджень снігу та розрахунків його навантаження (танення та випадіння, намерзання та танення льодовиків). Крім того, часові серії показали очевидні зміни в положенні станцій, як горизонтальному (2–3 мм), так і вертикальному – близько 4 мм від усередненого часового ряду. Причому від центра до краю мережі ці зміни збільшуються майже у два рази. За результатами досліджень і моделювання зроблено висновок, що при перетворенні у систему ITRF важливо врахувати не тільки вікові зміни, зумовлені рухом тектонічних плит, а й ввести поправки за геотектонічні впливи у досліджуваних регіонах. Сезонні моделі впливів геотектонічної природи повинні враховувати: гідрологічне навантаження, неперіодичний вплив океану та атмосферне навантаження. Вони повинні забезпечити апріорне оцінювання цих деформацій, а також мають бути апробовані та узгоджені перед тим, як будуть включені в ITRF розв'язки.

Подібні впливи на криву розподілу часових серій відзначали й інші дослідники, такі як М. Норманд [Nordman et al., 2009; Nordman, 2010], З. Малкін [Малкін, 2008]. Останній пропонує вводити поправку за географічний регіон при корекції часових серій, оскільки на Крайній Півночі ефект танення та намерзання льоду має вираженіший вплив.

Дослідженням впливу балансу льодових мас та зміни рівня моря на часові серії значень координат перманентних станцій займалася С. Шуман [Shuman, 2006]. Вона підкреслює, що вплив балансу льодової маси ще недостатньо вивчений (з точністю $\approx 20\%$), вплив намерзання – танення льодової маси становить $\approx \pm 5$ см/рік; зміна висоти рівня моря – близько ± 2 мм/рік, поточне підвищення рівня моря в результаті танення невеликих льодовиків, льодових шапок, частин крижаного покриву поля, теплового розширення океану ≈ 3 мм/рік. Поточні та прогнозовані зміни комплексної функції накопичення та танення подібні до поведінки динаміки льодового покриву.

Пенг Фанг [Peng Fang, 2002] встановив, що вплив на точність визначення положення станцій

перерозподілу океанічних мас становить приблизно 2–3 мм; танення снігу – 3–5 мм.

Вивченням впливу балансу місцевої гідрології займалися М. Босс та ін. [Bock et al., 2000]. Вони встановили, що гідрологічні навантаження виникають у зв'язку з різними гідрологічними масами на континентах. Ці гідрологічні басейни включають ґрунтові води, вологість ґрунту, сніги та води в озерах і річках. Зміни, пов'язані з цими басейнами, спричиняють опади, випаровування і стік. Вплив місцевої гідрології вивчався також у гравіметричних часових рядах, наприклад, за допомогою надпровідного гравіметра, GRACE даних або їх комбінацій [Kroner, 2001; Llubes et al., 2004; Virtanen et al., 2006; Van Dam et al., 2007; Tregoning et al., 2009].

З аналізу дослідження атмосферного навантаження і припливної дії океану [Scherneck and Bos, 2002] зроблено висновок, що як атмосферні, так і гідрологічні моделі впливів потребують подальшого аналізу і вдосконалення.

Температурне розширення земної поверхні

Періодичні зміни температури земної поверхні з глибиною проникнення до 2 м викликають температурні напруження, які поширюються на глибину до 1 км [Тимофеев и др., 1998]. Двовимірні моделі цього явища розраховували деякі автори (наприклад [Попов, 1960]) для різних за розміром температурних неоднорідностей. Спотворювальний ефект залежить від розмірів неоднорідностей і зменшується з глибиною. Температурні напруження у перших метрах поблизу поверхні можуть досягати до 0,1 МПа, деформації – до 10^{-6} , нахили – до 1–5" дуги при змінах температури в 30 °С. Ці оцінки ми перевірили за нахиломірними даними [Гриднев и др., 1989, 1990]. Для виключення цього ефекту під час роботи у гірських районах необхідно вимірювання нахилів і деформацій проводити на глибинах 30 м і більше, тобто у шахтах, штольнях та свердловинах.

Пенг Фанг [Peng Fang, 2002] встановив величину впливу теплового розширення порід на точність визначення положення перманентних станцій у $\approx 0,5$ мм.

Аналіз ендегенних геофізичних факторів

Тектоніка плит

За сучасними даними літосфера Землі розділена на окремі сегменти – тектонічні плити. Ці плити постійно рухаються за рахунок конвекційних потоків у глибинах Землі, утворених при циклічному русі мантиї та астеносфери. Мантия нагрівається у зонах, близьких до ядра, і струменями піднімається догори. Тут вона розтікається, охолоджується і опускається: так завершується один цикл. Цей рух формує так звані конвекційні потоки, які змушують плити рухатися.

Виділяють вісім великих тектонічних плит, кожна з яких має свою кінематику. Швидкості рухів

тектонічних плит можуть сягати до 10 см/рік [Calais, 2001; Антонович, 2005; Гатинский и др., 2008].

Точність визначення вертикальних рухів за допомогою ГНСС становить 1 мм/рік на ряді близько 10 років [Voehm et al., 2006]. Для порівняння, виміри на стандартних мареографах дають стандартну помилку 0,5 мм/рік на ряді 30–40 років [Горячкин, 2008]. Величина впливу тектоніки плит на точність визначення координат і висот перманентних станцій за результатами ГНСС вимірів становить $\approx 2\text{--}3$ мм.

Сейсмічні деформації

Розподіл літосфери Землі на великі плити має розглядатися лише як перше і найзагальніше наближення в ієрархії її структур. На границях літосферних плит розташовуються транзитні зони, в межах яких передаються і релаксуються тектонічні напруження, які виникли під час взаємодії цих плит. Границі плит є областями тектонічної, сейсмічної та магматичної активності, внутрішні області плит слабкосейсмічні та характеризуються низьким рівнем прояву ендегенних процесів [Гатинский и др., 2008].

Сейсмічні деформації у цих часових серіях значень координат перманентних станцій мають локальний прояв у часі та просторі, який за величиною змінюється від ≈ 1 мм до десятків см.

Зміни гравітаційного поля Землі

Зміни гравітаційного поля Землі спричинені тимчасовими змінами океанічних, атмосферних і континентальних мас, змінами навантаження поверхні води, місцевих полів напружень і приводять до зміни положення центра мас твердої Землі. Це впливає на положення перманентних станцій та супутникових орбіт. Зміна гравітаційного поля приводить до зміни ортометричних висот перманентних станцій.

Абсолютна гравіметрія базується на теорії про те, що за законом Ньютона зміна вертикального положення земної поверхні в 1 см еквівалентна зміні вимірної сили тяжіння в 3×10^{-8} м/с², або 3 мкГал. Використання методик вимірювання сили тяжіння з використанням гелій-неонових лазерів нового покоління та атомного рубідієвого годинника дозволило досягти точності визначення вертикальних рухів земної поверхні у 3–4 мкГал [Vilibic, 1997], що за точністю еквівалентно 1 мм/рік на ряді приблизно 10 років [Горячкин, 2008].

Зміни рівня ґрунтових вод

Багаторічні зміни рівня ґрунтових вод в осадових басейнах і заплавах великих річок можуть досягати десятків метрів. За даними досліджень цього ефекту, періоди багаторічних змін у регіонах – від декількох до десятків років [Гриднев, 1989]. Можливо, саме вплив циклічних кліматичних змін пояснює періодичний характер зареєстрованих сучасних рухів у окремих районах. Ефекти зміни рівня ґрунтових вод дуже важливо враховувати під час високоточних гравіметричних робіт (так, наприклад, для району Токіо цей

фактор досягає 10 мкГал на метр зміни рівня). Для виключення ефекту пункти спостережень слід розміщувати на монолітних гірських породах.

Пенг Фанг [Peng Fang, 2002] визначив, що вплив змін вологості ґрунту на точність визначення положення перманентних станцій може досягати 2–7 мм.

З наведеного аналізу останніх досліджень видно, що прояв впливу геофізичних факторів у часових серіях значень координат перманентних станцій інтенсивно вивчається у всьому світі. Але, незважаючи на інтенсивність цих досліджень, на багато питань ще не отримано однозначної відповіді і вони потребують подальшого вивчення.

Аналіз впливу інструментальних похибок на часові серії значень координат перманентних станцій

На наш час ці питання достатньо вивчені.

Похибки обладнання

За останні десятиріччя розроблено приймачі та супутники, в яких мінімізовано похибки, пов'язані з апаратним забезпеченням. Одним з джерел інструментальних похибок визначення висотного та (меншою мірою) горизонтального положення антени є зміщенням центра фази антени приймача. Ефективними методами зменшення впливу цього джерела похибок є калібрування антен та введення поправок за зміну висот фазових центрів антен відносно опорних точок на антенах залежно від середнього кута висоти супутників над горизонтом. У роботах [Mader, 2001, 2002, 2004; Schmitz, 2002] встановлено, що неврахування параметрів калібрування антен може давати похибку у висоті пункту до 10 см [Mader, 2004]; точність визначення елементів приведення для супутникових антен становить 0,5 см [Mader, 2001, 2002]. Отримані значення похибок за калібрування антен у висоті пункту і точність визначення елементів приведення у цих роботах, на наш погляд, дещо завищені. Так, результати калібрування прецизійних антен, представлені у базі даних National Geodetic Survey (США) [National..., 2012], свідчать, що максимальні висотні зміщення фазового центра не перевищують 5–6 мм.

Геометрія сузір'я супутників

(супутникова конфігурація та їх орбіти)

Період обертання сузір'я навігаційних супутників становить приблизно 12 годин, тому кожні півдобі повторюється їх орбіта, що приводить до появи систематичних похибок.

Для зменшення інструментальних похибок під час опрацювання ГНСС вимірів почали використовувати точні ефемериди супутників, які утримують координати кожного супутника у системі відліку ITRF разом з поправками годинників супутників. Вони є продуктом постобробки для кожного супутника на регулярні епохи кожні 15 хвилин. Їх надають з інтервалом у декілька годин після спостережень, із заявленою похибкою менше ніж 5 см у положенні та 0,1 нс у часі [Антонович, 2005].

Похибки вимірювань.

Тропосферна та іоносферна затримки

Відомо, що похибки за тропосферну та іоносферну затримки мають систематичний характер і безпосередньо впливають на точність визначення координат перманентних станцій, а не на їх стійкість. Так, уже на початку сорокових років минулого сторіччя закладено основні принципи формування моделі тропосфери [Berg, 1948]. А дослідження тропосферного заломлення продовжувалося впродовж багатьох років ([Saastamoinen, 1973; Herring, 1992; Niell, 1996; Schmitz, 2002; Boehm, Schuh, 2004; Llubes et al., 2004; Watson et al., 2006; Boehm et al., 2006a, 2006b; Penna et al., 2007; Steigenberger et al., 2007] та ін.). Крім того, вивчалися різні моделі атмосфери та їх вплив на координати [Ghoddousi-Fard et al., 2009; Steigenberger et al., 2009]. За результатами досліджень Ерік Калайс зробив висновок, що вплив загальної зенітної затримки може давати похибку в межах 8–12 мм [Calais, 2001]. Так само на точність визначення висот перманентних станцій впливають погодні умови, наприклад, сніг на антені (локальні умови заломлення) [Blewitt et al., 2001]. Також і інші дослідження показали, що позиції станцій чутливі до факторів навколишнього середовища [Bock et al., 2000].

Багатопроменевість

Одним з найбільших джерел похибок у визначенні координат GPS-антен є багатопроменевість поширення радіохвиль. Коли сигнали супутника досягають земної поверхні, вони не завжди потрапляють безпосередньо на антену приймача. Їх шлях спотворюється внаслідок відбиття від предметів, які оточують приймач. Це явище викликає небажані зміни у спостереженнях фази коду та несучої фази.

Що стосується кількісної оцінки фазових спотворень, то з урахуванням того, що в системах GPS і ГЛОНАСС довжини хвиль несучих коливань близькі до 20 см, максимальна похибка фазових вимірювань може наблизитись до 5 см. У тих рідкісних випадках, коли відбитий сигнал перевищує прямий (наприклад, у разі додаткового загасання на шляху проходження прямого сигналу), ця помилка може наблизитися до 10 см.

Для зменшення впливу багатопроменевості розроблено ряд рекомендацій, виконання яких дає змогу мінімізувати її вплив до рівня, за якого джерело похибок не перешкоджає виконанню високоточних супутникових вимірювань. До них належать: встановлення антени в місцях, де відсутні відбиваючі поверхні; використання антен, на яких встановлені екрани, що відфільтровують відбиті від земної поверхні промені. Крім того, на пунктах, схильних до впливу відбиття, слід передбачати сеанси спостережень збільшеного часового інтервалу, з тим, щоб отримати циклічну криву зміни похибок через відбиття (подальше усереднення дозволяє істотно послабити вплив багатопроменевості) та при обробці результатів спостережень можна використовувати тільки ті результати, які відповідають таким положенням супутників, за яких відбиваючі поверхні найменше впливають [Портал..., 2012].

Використання різних програмних пакетів (репроцесинг обробки даних)

Для оброблення ГНСС даних використовують різні програмні пакети, в яких реалізовано різні математичні алгоритми для визначення координат перманентних станцій. Внаслідок цього виникають похибки у їх визначенні. Для їх зменшення виконують репроцесинг даних з використанням нових програмних пакетів, у які введено моделі іоносферних затримок, атмосферного навантаження, гідрологічні моделі тощо.

Отримані Пенг Фангом [Peng Fang, 2002] похибки за орбіту, стійкість фазового центра та тропосферну модель не мали великого впливу на точність визначення положення перманентних станцій – похибки в мережі $\approx 0,7$ мм; використання різного програмного забезпечення здебільшого $\approx 2-3$ мм, для деяких сайтів перманентних станцій – $\approx 5-7$ мм.

За даними аналізу прояву впливу різноманітних джерел на точність визначення положення перманентних станцій складено табл. 1. З неї видно, що середня квадратична похибка сукупного впливу різних навантажень на часові ряди може становити від 9,2 мм до 30,7 мм і лише в окремих випадках завдяки локальному прояву сейсмічного фактора може досягати десятків сантиметрів.

Таблиця 1

Вплив різних факторів на дані часових серій значень координат перманентних станцій

Фактори		Навантаження часових рядів	Величина
Геофізичні	Екзотенні	деформації через океанічні припливні навантаження	$\approx 0,1$ мм
		нерівномірність обертання Землі	від 4 мм до 10–20 мм
		вплив перерозподілу атмосферних мас	від 4 мм до 20 мм
		вплив перерозподілу океанічних мас	$\approx 2-3$ мм
		тиск снігового покриву (намерзання – танення)	$\approx 3-5$ мм
	Ендотенні	теплове розширення порід	$\approx 0,5$ мм
		тектоніка плит	$\approx 2-3$ мм
		сейсмічні деформації (прояв має локальний характер)	від 1 мм до десятків см
		зміна гравітаційного поля Землі	≈ 1 мм
		зміна вологості ґрунту	$\approx 2-7$ мм
Інструментальні	похибки за орбіту, стійкість фазового центра та тропосферна модель не впливають істотно на результати:		$\approx 0,7$ мм
	похибки в мережі		$\approx 2-3$ мм
	використання різного програмного забезпечення для деяких сайтів перманентних станцій		$\approx 5-7$ мм

За даними табл. 1 складено діаграму, яка наведена на рис. 2. З неї видно, що вплив інструментальних похибок становить менше від восьмої частини від всіх факторів, які є причиною вертикального тренду в результатах щоденних та щотижневих часових серій значень координат перманентних станцій.

Постановка завдання

За результатами ГНСС вимірів встановлено, що кінематику кожної перманентної станції можна подати у вигляді двох компонент. Це систематичний зсув станції, зумовлений рухом тектонічної плити, на якій вона розташована, та періодичні коливання її положення. На рис. 3 наведено ряд визначень висотного положення перманентної станції SULP (яка розміщена на території обсерваторії Національного університету “Львівська політехніка”), за період з 2001 до 2011 року. Нахил часової серії є лінійною складовою вертикальних зміщень, зумовленою кінематикою Євразійської плити.

Модель кінематики перманентної станції можна описати рівнянням [Третяк, 2010]:

$$h = at + b + c \cos[2\pi(t - t_o - nT)/T] + s \sin[2\pi(t - t_o - nT)/T], \quad (1)$$

де a, b – коефіцієнти рівняння регресії лінійного зміщення станції; c, s – гармонійні коефіцієнти; t_o, t – початкова та поточна епоха спостережень;

n – кількість періодів коливань тривалістю T , яка вміщається у проміжок $t-t_o$.

Зрозуміло, що $at+b$ – рівняння прямої, яке фактично описує напрямок, у якому відбувається зміщення перманентної станції. Якщо зняти цю лінійну складову, ми отримуємо періодичну компоненту часової серії значень координат перманентної станції.

На рис. 4 наведено результати вимірів перманентної станції SULP з 2001 до 2011 року, у яких відфільтрована лінійна складова вертикальних тектонічних зміщень. В отримані часові ряди входять виключно гармонійні коливання.

З метою вивчення цих рядів та визначення періодів гармонійних коливань, що зумовлені різними геофізичними чинниками, виконано дослідження.

Для отриманих часових серій необхідно було підібрати криву, яка описуватиме їх з мінімальними відхиленнями (з оптимальним періодом і амплітудою).

У середовищі Mathcad складено програму для підбору оптимальної кривої для опису часових серій перманентних станцій. Для кожної станції записано рівняння для визначення оптимального періоду коливань. Критерієм вибору оптимальної гармонійної функції опису часової серії є

$$\sum_{i=1}^n \{ at_i + b + c \cos[2\pi(t_i - t_o - nT)/T] + s \sin[2\pi(t_i - t_o - nT)/T] - H_i \}^2 = \min. \quad (2)$$

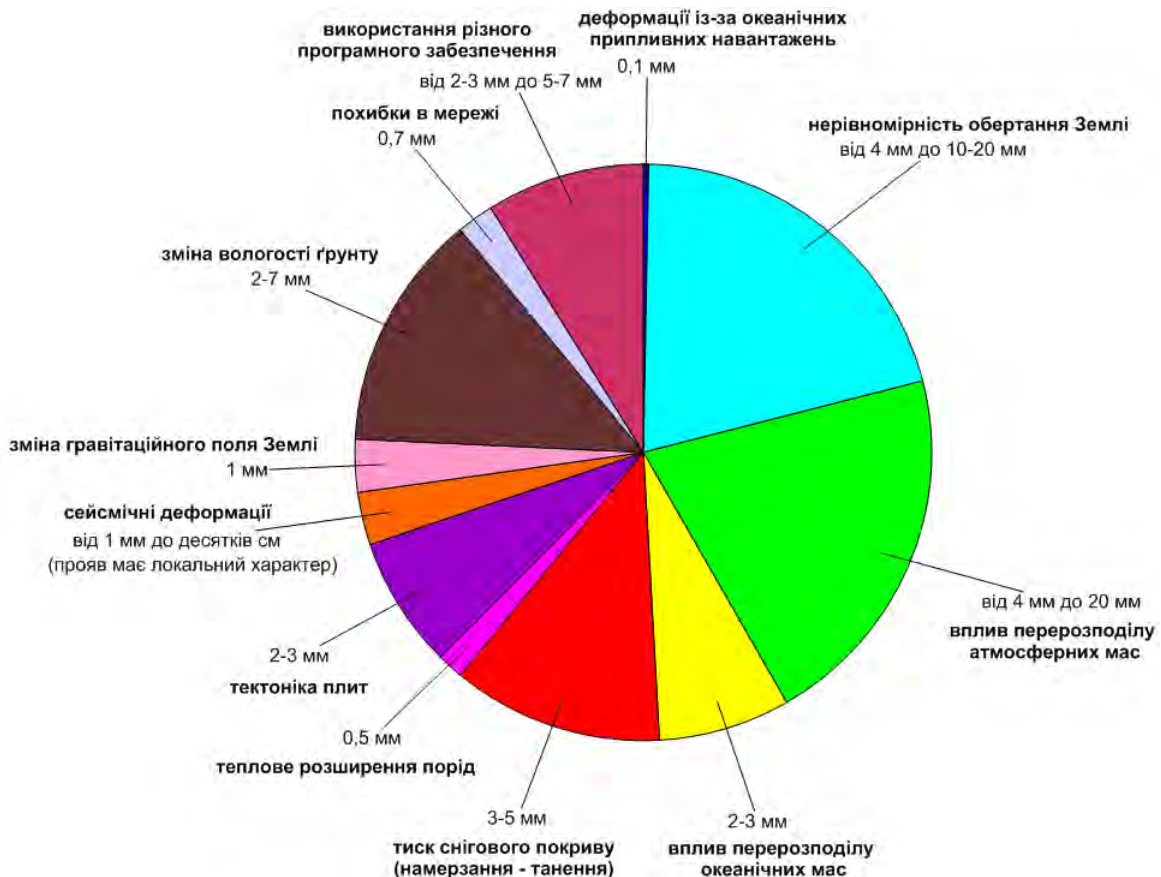


Рис. 2. Діаграма відносного внеску різних інструментальних та геофізичних впливів у похибки значень координат перманентних ГНСС станцій

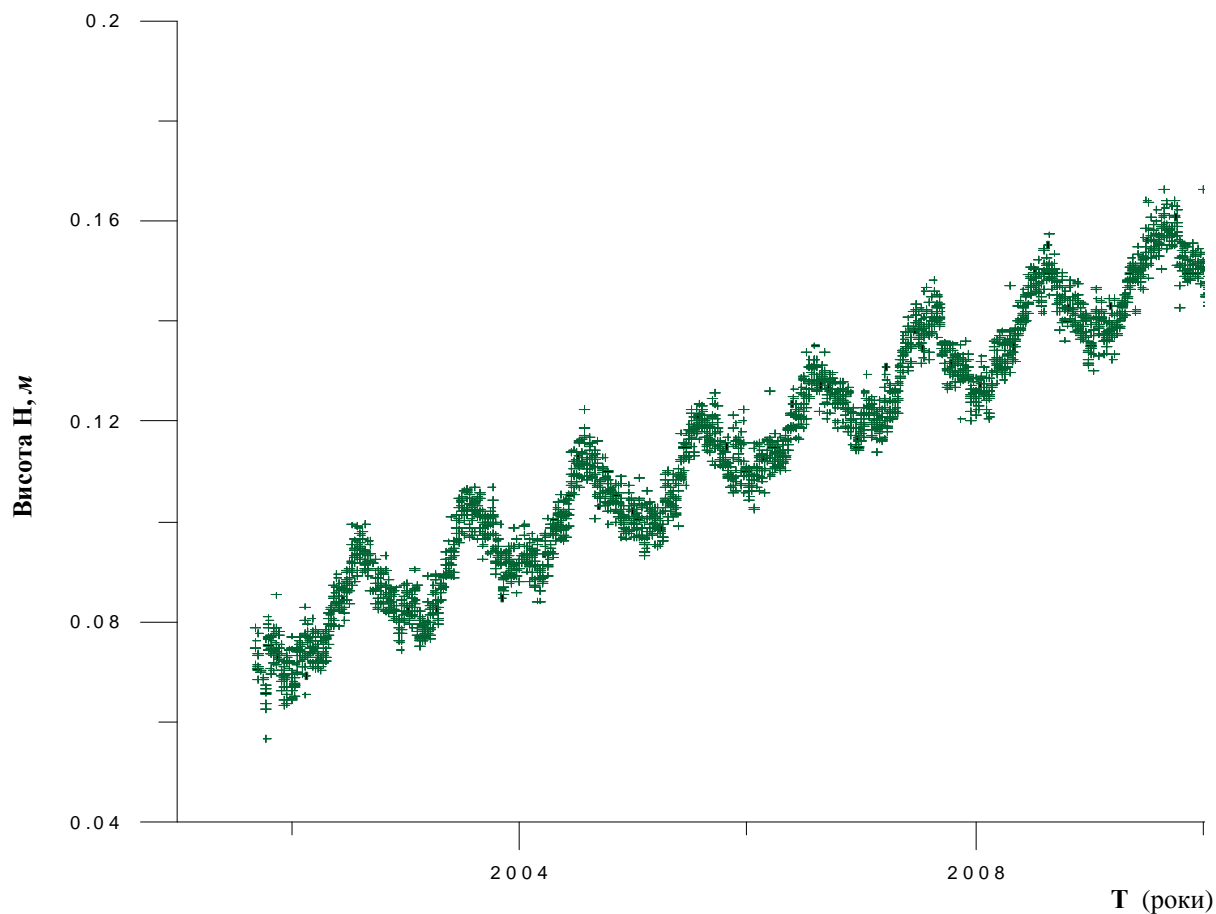


Рис. 3. Часова серія вертикальної складової руху перманентної станції Sulp

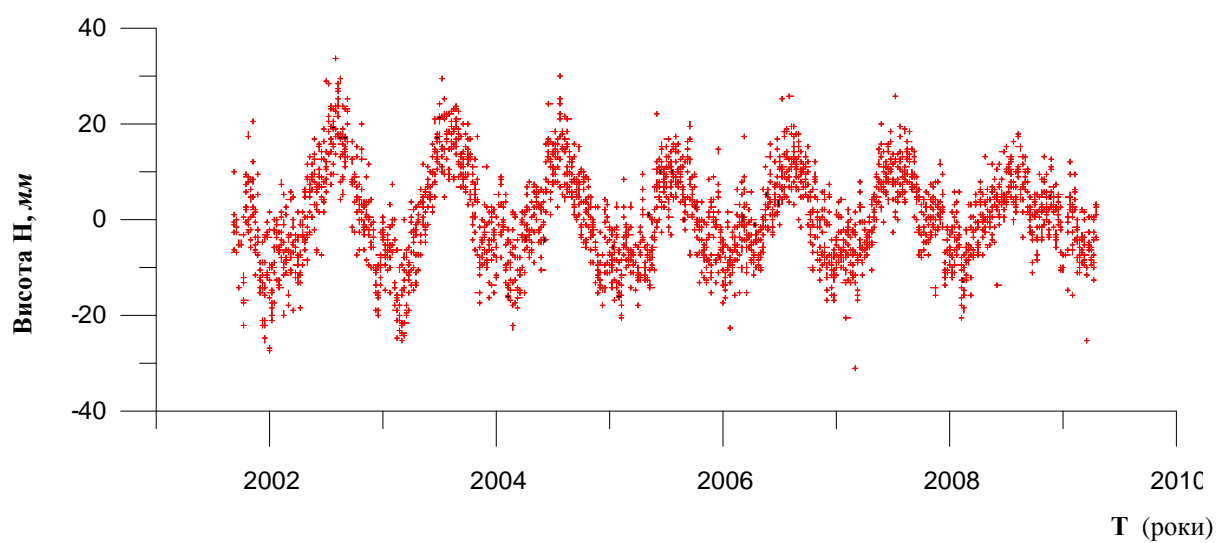
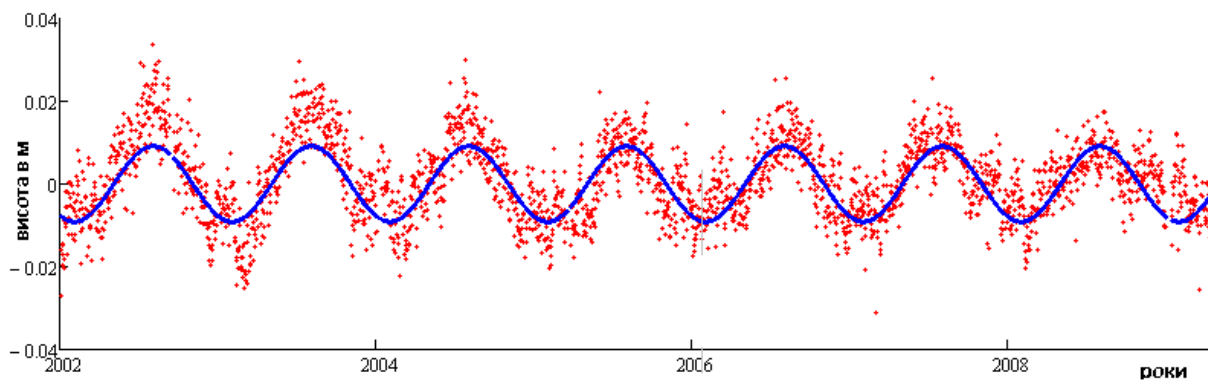
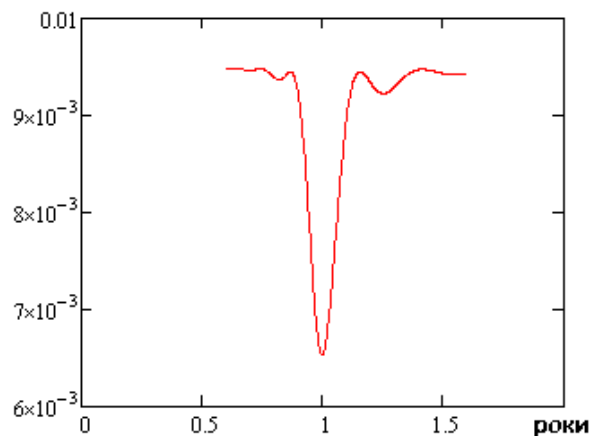


Рис. 4. Періодична складова вертикальної компоненти часової серії руху перманентної станції Sulp



SULP

а



б

Рис. 5. Апроксимаційна гармонічна крива для часової серії перманентної станції SULP (а) і функція (2) середньоквадратичного відхилення апроксимаційної кривої від результатів вимірів залежно від тривалості періоду коливань (б)

На основі результатів спостережень (часових серій) способом найменших квадратів визначено оптимальні коефіцієнти рівняння (1). На рис. 5 представлено результати визначення оптимальних гармонічних коливань часової серії перманентної станції SULP.

Аналогічні розрахунки виконано для інших перманентних станцій. З Web-сторінки центра SOPAC запозичені щоденні часові серії 111 перманентних станцій, розташованих по всьому світу на різних тектонічних плитах, спостереження на яких виконувалось впродовж не менше ніж трьох років (рис. 6). З метою дослідження періодичних коливань координат перманентних станцій розроблено алгоритм та прикладний пакет опрацювання часових серій даних.

З рис. 5, а видно, що гармонічна функція розподілу має чітко виражений період коливального руху. Графік на рис. 5, б показує, що функція відхилення гармонічних коливань від результатів вимірів має мінімум при періоді $T=1$ рік. Цей мінімум показує основний період гармонічних коливань, який найкраще описує коливальний рух перманентної станції SULP. Очевидно, ця періодичність зумовлена впливом припливних сил, викликаних рухом Місяця навколо Землі та Землі навколо Сонця. До них зараховують довгоперіодичні варіації припливних сил з періодами 18,6 року, 1 рік, 0,5 року, 1 місяць і 2 тижні. Вони пе-

ріодично змінюють стиснення Землі, її полярний момент інерції і кутову швидкість обертання. Власне, вплив варіацій припливних сил з річним періодом, очевидно, проявляється в результатах часових серій перманентної станції SULP.

На наступному етапі була створена база даних 111 перманентних станцій (рис. 7), в якій зазначались: назва станції, її місце розташування (з Googlemap), графічні результати апроксимації часової серії вертикальної складової (як на рис. 5), назви мережі, до якої вона належить, географічні координати та фотознімки встановленої антени ГНСС приймача. На основі аналізу даних створеної бази відібрано 60 станцій для вивчення впливів періодичних процесів геофізичної природи.

Критерієм відбору перманентних станцій слугувала наявність однозначно визначеного мінімуму функції (2) середньоквадратичного відхилення апроксимаційної кривої від результатів вимірів залежно від тривалості періоду коливань (див. рис. 7). Забезпечення цієї умови свідчить про збіжність періодичної функції з даними спостережень. На рис. 7 для прикладу наведено фрагмент бази даних з даними п'яти перманентних станцій. З аналізу представленого фрагмента бази даних видно, що перманентні станції GLSV, MATE, METS мають чітко визначений мінімум функції відхилення апроксимованої кривої та результатів часової серії залежно від тривалості періоду коливань.

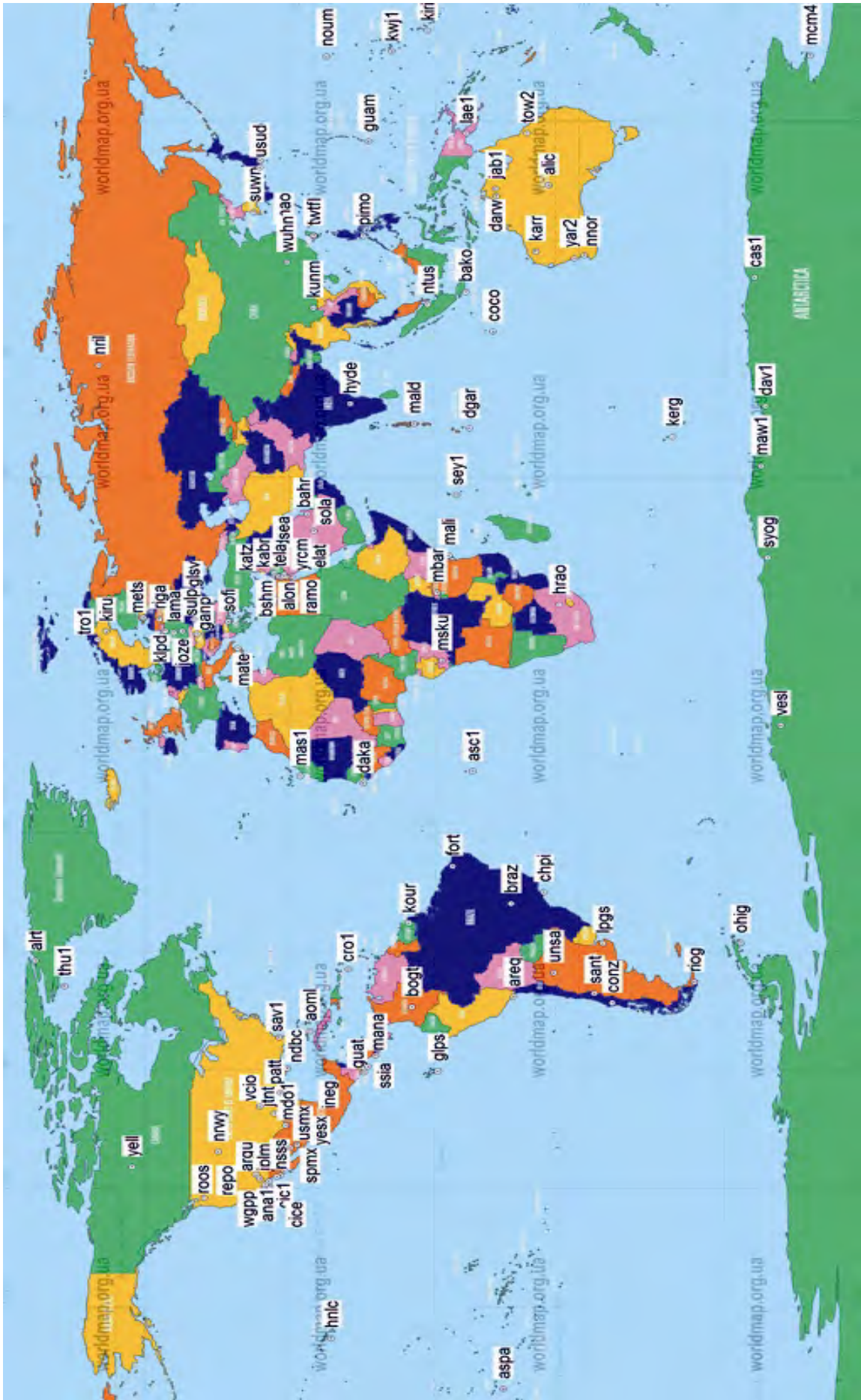


Рис. 6. Розташування перманентних супутникових станцій, дані часових серій яких використано у дослідженнях

Назва станції	Місце розташування станції	Оптимальний період часу який описує коливальний рух	Апроксимована крива з даних спостережень	Назва мережі до якої відноситься станція	Географічні координати	Знімки розташування антени
gsv				EUREF	50.36418351 30.48673482 226.3519	
mate				EUREF	40.64913279 18.70446137 535.6519	
mets				EUREF	60.21747289 24.39532277 94.6437	
dgar				IGS	-7.26948340 72.37024188 -64.9195	
hnlc				PGF	21.30329016 -157.86454990 21.9702	

Рис. 7. Фрагмент створеної бази даних перманентних ГНС

Оптимальний період коливань є близьким до 1 року. Натомість станції DGAR та HNLC не задовольняють критерій відбору станцій. Для станції DGAR наявні декілька локальних мінімумів функції (2), хоча глобальний мінімум відповідає періоду в 1 рік. Однак наявність кількох локальних мінімумів, які відповідають 0,9 та 1,2 року, призводить до нечіткої кореляції апроксимаційної періодичної функції з результатами вимірів (рис. 7, колонка 4). Для станції HNLC наявні кілька локальних мінімумів функції (2) і немає вираженого глобального мінімуму. Відповідно так само відсутня кореляція між апроксимованою кривою та результатами вимірів. Зауважено, що чіткого періоду коливального руху у часових серіях не мають острівні та прибережні станції, для прикладу DGAR та HNLC, що, можливо, пов'язано з припливною дією океану на положення цих перманентних станцій. Крім цього, відсутність періодичних коливань у станції DGAR може бути по-

в'язана з розміщенням супутникової антени. У цьому випадку вона закріплена на даху будівлі. Нагрівання будівлі під дією сонячних променів призводить до зміщення самої антени, що створює гармонічні коливання часової серії. З аналізу створеної бази даних можна зробити висновок, що гармонічні коливання перманентних станцій залежать від їх географічного розташування та розміщення супутникової антени.

За результатами опрацювання часових серій значень координат перманентних станцій складено табл. 2. У ній для відібраних станцій наведено оптимальну амплітуду, період і епоху максимального підйому перманентної станції упродовж першого та останнього років спостережень. Це зумовлено зміщенням епохи максимального підйому перманентної станції з часом внаслідок того, що оптимальна тривалість періоду коливань не відповідає строго одному року, а може мати відхилення до ± 30 днів.

Таблиця 2

Результати опрацювання часових серій перманентних станцій

№	Назва станції	B, °	L, °	H, м	Амплітуда, мм	Період, діб	max поч., частки року	max кін., частки року
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ALIC	-23,7	133,9	603.270	3.6	364.0	2000.053	2009.029
2	ALON	31,7	34,6	55.681	5.5	369.4	2006.557	2008.583
3	ALRT	82,5	-62,3	78.174	6.5	392.7	2003.577	2008.958
4	ANA1	34,0	-119,4	22.442	7.5	365.7	2002.585	2008.597
5	AREQ	-16,5	-71,5	2488.928	3.8	361.4	1994.760	2008.619
6	ARGU	36,1	-117,5	1791.349	6.4	361.4	2000.687	2008.608
7	BAHR	26,2	50,6	-17.082	9.4	362.8	1996.548	2008.477
8	BRAZ	-15,9	-47,9	1106.000	9.4	366.5	1995.782	2007.831
9	BSHM	32,8	35,0	225.080	6.2	365.7	1999.582	2008.602
10	CHPI	-22,7	-45,0	617.447	4.5	352.6	2004.895	2008.758
11	CIC1	31,9	-116,7	64.338	3.3	357.7	1999.744	2008.564
12	CICE	31,9	-116,7	87.666	4.3	348.9	1996.941	1998.853
13	COCO	-12,2	96,8	-35.289	3.0	362.8	1996.466	2008.395
14	CONZ	-36,8	-73,0	180.738	3.9	357.7	2003.190	2009.070
15	DARW	-12,8	131,1	125.111	4.1	363.5	2000.720	2008.687
16	DSEA	31,0	35,4	-360.779	4.2	370.8	2005.492	2008.540
17	ELAT	29,5	34,9	29.526	7.6	365.7	1997.527	2008.551
18	GLSV	50,4	30,5	226.352	8.5	367.2	1998.574	2008.633
19	GUAT	14,6	-90,5	1519.877	3.9	370.8	2001.347	2007.445
20	HRAO	-25,9	27,7	1414.164	3.0	372.3	1998.774	2008.974
21	HYDE	17,4	78,6	441.701	7.7	361.4	2003.390	2008.340
22	JOZE	52,1	21,0	141.443	5.1	365.7	1994.642	2007.667
23	JPLM	34,2	-118,2	423.992	3.5	362.1	1993.777	2008.657
24	KABR	33,0	35,1	103.402	8.8	363.5	1999.566	2008.529
25	KIRI	1,4	172,9	36.171	4.0	354.8	2006.100	2008.045
26	KLPD	55,7	21,1	42.7197	6.4	355.5	2006.557	2007.533
27	KUNM	25,0	102,8	1986.209	7.5	359.2	2000.414	2009.270

1	2	3	4	5	6	7	8	9
28	LAE1	-6,7	147,0	140.280	2.0	381.8	2002.695	2004.788
29	LAMA	53,9	20,7	187.006	6.8	363.5	1996.616	2008.570
30	MALI	-3,0	40,2	-23.341	3.8	368.7	1997.453	2008.561
31	MATE	40,6	16,7	535.652	6.6	364.3	1994.596	2008.567
32	MAW1	-67,6	62,9	59.131	3.5	384.0	1998.875	2008.346
33	MDO1	30,7	-104,0	2004.498	3.0	361.4	1994.771	2008.633
34	METS	60,2	24,4	94.644	6.5	366.5	1993.571	2007.626
35	NDBC	30,4	-89,6	-11.672	4.1	360.6	1997.716	2008.583
36	NNOR	-31,0	116,2	234.825	2.5	371.6	2003.037	2009.144
37	NRIL	69,4	88,4	47.926	10.2	367.9	2001.626	2008.682
38	NRWY	44,7	-110,7	2342.665	5.3	359.2	2007.793	2008.777
39	NSSS	32,6	-117,0	123.602	3.0	363.5	2001.648	2008.619
40	NTUS	1,3	103,7	75.392	5.3	360.6	1999.574	2008.469
41	PATT	31,8	-95,7	94.854	6.1	361.4	1997.736	2008.624
42	PIMO	14,6	121,1	95.524	6.8	358.4	1999.478	2009.297
43	RAMO	30,6	34,8	886.833	8.3	364.3	1999.541	2008.523
44	REPO	36,8	-116,5	1479.450	4.7	364.3	1999.662	2008.643
45	RIGA	56,9	24,1	34.690	8.0	362.8	1999.618	2008.564
46	RIOG	-53,8	-67,8	32.072	7.5	370.1	2000.067	2007.166
47	SAV1	32,1	-81,7	8.420	4.6	365.0	2001.612	2007.612
48	SHAO	31,1	121,2	22.045	5.1	363.5	1996.504	2008.458
49	SOFI	42,6	23,4	1119.543	8.7	365.0	1998.588	2008.586
50	SULP	49,8	24,0	370.484	9.0	362.8	2002.607	2008.570
51	SUWN	37,3	127,1	82.266	6.1	365.0	1999.481	2008.482
52	TELA	32,1	34,8	58.339	7.4	365.0	1998.555	2008.559
53	TNML	24,8	121,0	75.882	3.2	371.6	2003.407	2007.478
54	TOW2	-19,3	147,1	88.136	2.0	366.5	1999.947	2008.982
55	TRO1	69,7	18,9	138.109	3.7	365.7	1999.692	2008.709
56	TSKB	36,1	140,1	67.261	4.8	367.9	1995.116	2009.229
57	VCIO	36,1	-99,2	623.904	3.4	353.3	1995.878	2008.463
58	WGPP	35,0	-119,0	352.013	5.0	362.1	2002.692	2008.643
59	YELL	62,5	-114,5	180.935	4.5	368.7	1992.652	2008.813
60	YRCM	31,0	34,9	516.084	5.0	366.5	2006.533	2008.542

За даними таблиці складено світові карти просторового розподілу амплітуд періодичних вертикальних коливань перманентних станцій (рис. 8), тривалості їх періодів (рис. 9) і епох максимального підйому цих станцій в останній рік спостережень (рис. 10).

За результатами опрацювання часових серій вертикальних складових координат перманентних станцій встановлено (див. табл. 2), що амплітуда періодичних коливань змінюється в межах від 2,0 мм (станція TOW2, географічні координати: +82°29'39"; -62°20'26") до 10,2 мм (станція NRIL, географічні координати: +31°52'12"; -116°40'12"); період – від 348,9 (для станції CICE, географічні координати: +69°21'43"; +88°21'35") діб до 392,7 діб (для станції ALRT, географічні координати: +46°12'24"; -123°46'06").

Найбільші амплітуди функції гармонійних коливань мають перманентні станції, розміщені в глибині материків, а найменші – станції, які розміщуються вздовж берегової лінії та на островах, що, можливо, пов'язано з потужністю земної кори. На рис. 11 наведено ізолінії розподілу потужності земної кори. З цього рисунка видно, що максимуми потужності земної кори приблизно збігаються з максимумами амплітуд коливань перманентних станцій.

З рис. 8 видно, що тривалість періоду коливань вертикального положення перманентних станцій – у межах від 349 до 393 діб. Значення ізоліній періоду коливань зростає від екватора до полюсів. Тобто тривалість періоду вертикальних коливань перманентної станції є функцією її широти, що, очевидно, зумовлено гравітацією Сонця. При цьому в екваторіальному поясі тривалість коливань – практично один рік.



Рис. 8. Просторовий розподіл амплітуд періодичних коливань перманентних станцій, мм

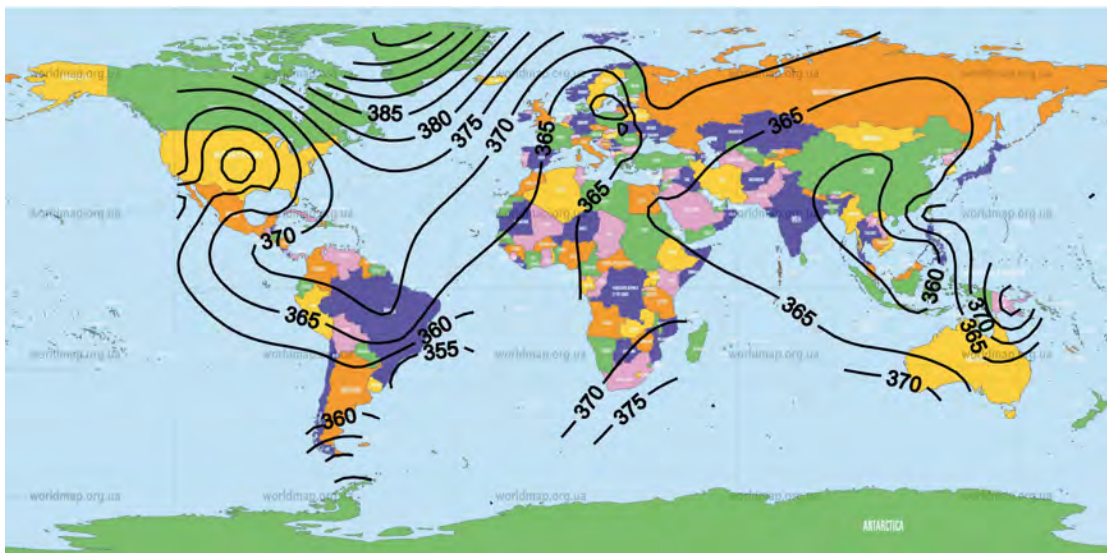


Рис. 9. Просторовий розподіл періодів коливань перманентних станцій, дб

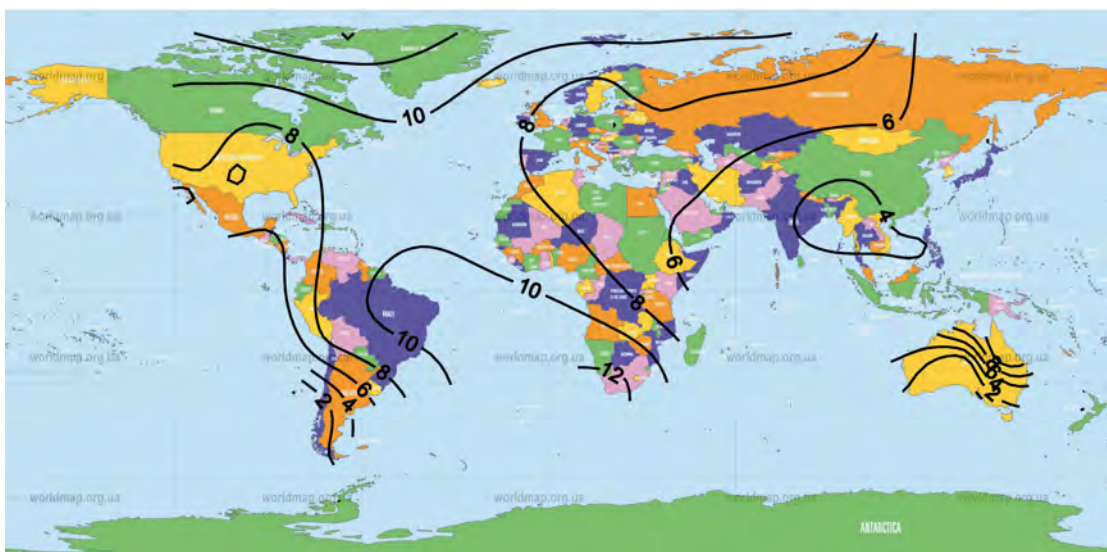


Рис. 10. Просторовий розподіл ізолій епох максимального підйому перманентних станцій в останній рік спостережень, за місяцями

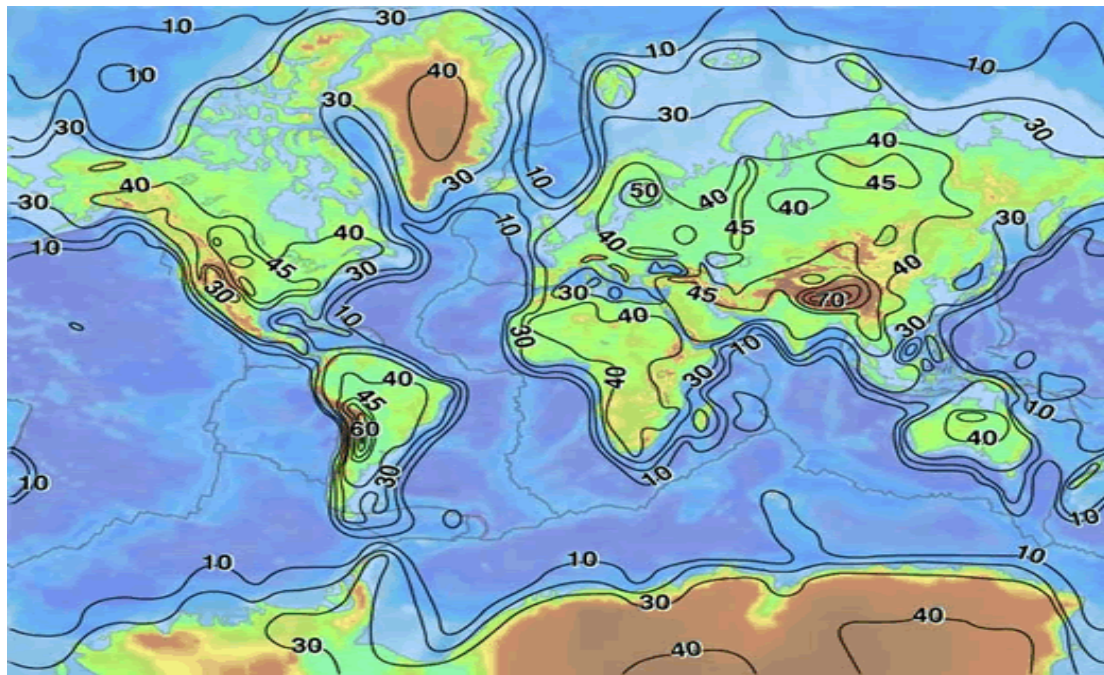


Рис. 11. Ізолінії потужності земної кори, км

Аналізуючи рис. 10, зауважимо, що на широтах -45° та $+45^\circ$ епоха максимального підйому перманентних станцій відповідає жовтню, а мінімум – квітню.

На екваторі максимум відповідає квітню, а мінімум – жовтню. Необхідно зауважити, що отримані у полярних широтах результати ненадійні у зв'язку з низькою концентрацією там перманентних станцій.

Висновки

1. З досліджень часових серій щоденних та щотижневих розв'язків значень координат перманентних станцій відомо, що зміна цих координат, крім лінійного зміщення, часто має ще й періодичну складову. Середнє квадратичне значення сукупного впливу інструментальних та геофізичних факторів на просторове положення перманентних станцій 9,2–30,7 мм, і лише в окремих випадках завдяки локальному прояву сейсмотектонічних процесів може досягати десятків сантиметрів. За результатами аналізу даних попередніх досліджень зроблено висновок, що вплив інструментальних похибок є меншим за $1/8$ від впливу всіх факторів, що є причинами вертикальних зміщень. Оскільки геофізичні фактори помітно впливають на просторове положення перманентних станцій, важливо, зокрема і для вивчення геодинаміки Землі, виділяти цей вплив на результати часових серій.

2. Для дослідження цих питань створено базу даних для 111 перманентних станцій світу. На основі статистичного аналізу з цієї бази відібрано 60 станцій, для яких помітно проявляються періодичні коливання їх координат. На основі аналізу даних відібраних станцій вибрано математичні функції, які оптимально описують їх коливання.

Під час фільтрації бази даних перманентних станцій зауважено, що чіткого періоду коливального руху в часових серіях не мають острівні та прибережні станції, що, можливо, пов'язано з припливною дією океану на положення цих станцій. Крім цього, відсутність періодичних коливань у деяких перманентних станцій може бути пов'язана з розміщенням супутникових антен на спорудах, які зазнають деформацій внаслідок температурних розширень. Тобто можна стверджувати, що гармонічні коливання перманентних станцій залежать від географічного розташування станції та розміщення супутникових антен.

3. За результатами опрацювання часових серій висотних складових координат перманентних станцій встановлено, що амплітуда періодичних вертикальних коливань станцій змінюється у межах від 2,0 мм (станція TOW2) до 10,2 мм (станція NRIL); період – від 348,9 дб (для станції CICE) до 392,7 доби (для станції ALRT). Максимальні амплітуди гармонічних коливань (≈ 10 мм) характерні для перманентних станцій, розташованих у центральній частині Сибіру, ця зона охоплює значну частину Євразії. Другий максимум амплітуд (≈ 8 мм) розташований у Південній Америці. Найбільші амплітуди функції гармонічних коливань мають перманентні станції, розташовані в глибині материків, а найменші – станції, що розміщуються вздовж берегової лінії та на островах, що, очевидно, пов'язано з потужністю земної кори.

4. Тривалість періоду коливань вертикального положення перманентних станцій – у межах від 349 до 393 дб. Тривалість періоду коливань зростає від екватора до полюсів. Тобто тривалість періоду вертикальних коливань перманентної станції є функцією її широти, що, очевидно, зу-

мовлено гравітаційним впливом Сонця. При цьому в екваторіальному поясі період коливань практично дорівнює року.

5. Епоха максимального підйому перманентної станції впродовж першого та останнього років спостережень має зміщення з часом внаслідок того, що тривалість періоду коливань не відповідає строго одному року, а може мати відхилення до ± 30 днів. На широтах -45° та $+45^\circ$ епоха максимального підйому перманентних станцій відповідає жовтню, а мінімум – квітню, а на екваторі – навпаки, максимум відповідає квітню, мінімум – жовтню. У полярних широтах отримані результати ненадійні, тому що на цих територіях розміщені лише вісім перманентних станцій (шість з яких в Антарктиді).

Узагальнюючи виконані дослідження, зроблено висновок, що по земній кулі проходить хвиля деформацій з піврічним періодом, довжина якої 90° по широті, а амплітуда залежить від потужності земної кори.

Література

- Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. – М.: ФГУП “Картгеодезцентр”. – 2005. – 334 с.
- Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В., Романюк Т.В. Блоковая структура и геодинамика континентальной литосферы на границах плит // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2008. – № 1. Вып. № 11. – С. 32–47.
- Горячкин Ю.Н. Современные вертикальные движения на побережье Чёрного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2008. – 6 с.
- Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю. Квазисуточные непривлинные наклоны земной поверхности в районах Новосибирска и Иркутска // Геология и геофизика. – 1989. – № 7. Деп. в ВИНТИ 31.08.88. № Б781-В88. – 10 с.
- Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю. Наклоны земной поверхности в районе водохранилища Иркутской ГЭС // Геология и геофизика. – 1989. – № 3. – С. 116–122.
- Гриднев Д.Г., Тимофеев В.Ю., Сарычева Ю.К. и др. Наклоны земной поверхности на юге Байкала // Геология и геофизика. – 1990. – № 5. – С. 95–104.
- Интернет-ресурс / Вікіпедія: <http://uk.wikipedia.org/wiki/...>
- Интернет-ресурс / База даних National Geodetic Survey: <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL>.
- Интернет-ресурс / портал о GPS-навигации Челябинска: <http://www.gps-chel.ru>.
- Кауфман М.Б. Характеристики работы Государственной службы ПВЗ России по результатам анализа данных за 1993 г. // Тр. Рос. симпози. “Метрология времени и пространства”, 11–13 окт. 1994 г. – Менделеево (Моск. обл., Россия): ИМВП ГП “ВНИИФТРИ”. – 1994. – С. 64–69.
- Малкин З.М. Влияние атмосферной нагрузки на координаты и скорости ГНСС-станций // Геодезия и картография. – 2008. – № 4. – С. 31–34.
- Попов В.В. О температурных деформациях земной поверхности // Изв. АН СССР. Серия геофиз. – 1960. – № 7. – С. 913–921.
- Сидоренков Н.С. Природа нестабильностей вращения Земли / Вестник Российской академии наук. – 2004. – Т. 74. – № 8. – С. 701–715.
- Тимофеев В.Ю., Арнаут Г.П., Сарычева Ю.К. Особенности современных движений земной коры юга Сибири (по наклономерным, гравиметрическим и деформационным измерениям в южных районах Западной Сибири и Байкальской рифтовой зоны) // Геофизические методы изучения земной коры: сб. науч. докл. Всероссийской геофиз. конф. – Новосибирск, 1998. – С. 68–73.
- Третяк К.Р. Аналіз періодичних вертикальних зміщень земної кори за даними перманентних супутникових станцій / Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS I GIS – технології: зб. наук. доп. XIV Міжн. ювіл. наук-техн. симпоз. (Алушта, вересень 2010). – Львів. – 2010. – С. 75–80.
- Mader G.L., Czopek F. Calibration Antena Phase Centers // GPS World. – 2002. – Vol. 13, № 5. – P. 272–277.
- Berg H. Allgemeine Meteorologie. Dümmlers Verlag – Bonn, 1948.
- Blewitt G., Lavallée D., Clarke P., K. Nurutdinov. A new global mode of earth deformation: Seasonal cycle detected // Science. – 2001. – 294. – P. 2342–2345
- Bock Y., Nikolaidis R., De Jonge P.J., and Bevis M. Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning Systems // J. Geophys. Res. – 2000. – 105. – 28, 223–28, 253.
- Boehm J., Niell A., Tregoning P., Schuh H. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data // Geophysical Research Letters. 33, L07304. DOI: 10.1029/2005GL025546. – 2006.
- Boehm J., Schuh H. Vienna mapping functions in VLBI analyses // Geophysical Research Letters. 31, L01603. DOI: 10.1029/2003GL018984. – 2004.
- Boehm, J., Werl B., Schuh H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data // Journal of Geophysical Research. 111, B02406. DOI: 10.1029/2005JB003629. – 2006.
- Brown A. Extended differential GPS // Navigation. – 1989. – Vol. 36, № 3. – P. 265–285.
- Calais E. Geophysical interpretation of geodetic time series // TMR Training Course. – Larkollen, Norway, 2001.
- Calais E. GPS noise, noise model and sources. – 2006.
- Larsen C.F., Echelmeyer K.A., Freymueller J.T. and Motyka R.J. Tide gauge records of uplift along the

- northern Pacific-North American plate boundary, 1937 to 2001.
- Fratepietro F., Baker T., Williams S. and M. Van Camp. Ocean loading deformations caused by storm surges on the northwest European shelf // *Geophysical Research Letters*. 33, L06317. DOI: 10.1029/2005GL025475. – 2006.
- Freymueller J. Seasonal Position Variations and Regional Reference Frame Realization // Submitted to GRF2006 Symposium Proceedings, Springer Verlag IAG Series, 12/2006, Revised 1/2008.
- Ghoddousi-Fard R., Dare P., Langley R. Tropospheric delay gradients from numerical weather prediction models: effects on GPS estimated parameters // *GPS Solutions* 13:281-291. DOI: 10.1007/s10291-009-0121-8. – 2009.
- Herring, T. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data // In Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy. – Netherlands Geodetic Commission, Delft, Netherlands. – 1992. – P. 157–164.
- Johansson, J., Carlsson T., Davis J., Elgered G., Jarlemark P., Mitrovica J., Pysklywec R., Ronnang B., Scherneck H-G., Shapiro I. First result from a continuously operating GPS network in Fennoscandia // *European Geophysical Society Symposium, The Hague, 1996. – Ann. Geophys.* 1996. – 14 (1). – P. 271.
- Kroner, C. Hydrological effects on gravity at the geodynamic observatory Moxa // *Journal of the Geodetic Society of Japan*. – 2001. – 47 (1). – P. 353–358.
- Llubes M., Florsch N., Hinderer J., Longuevergne L., Amalvict M. Local hydrology, the Global Geodynamics Project and CHAMP/GRACE perspective: some case studies // *Journal of Geodynamics*. – 2004. – 38 (3–5). – P. 355–374.
- Lyard F., Lefevre F., Letellier T., Francis O. Modeling the global ocean tides: modern insights from FES2004. – Springer-Verlag, 2006.
- MacMillan D., and C. Ma. Using of meteorological data assimilation models in computing of tropospheric delays at microwave frequencies // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 1998. – 23. – P. 97–102.
- Mader G. A Comparison of Absolute and Relative GPS Antenna Calibrations // *GPS Solutions*. – 2001. – Vol. 4, № 4. – P. 37–40.
- Mader G. 2004. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic survey [Electronic resource] – <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>.
- Niell A. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // *Journal of Geophysical Research*. – 1996. – 101(B2). – P. 3227–3246.
- Nordman M. Improving GPS time series for geodynamic studies // *Suomen Geodeettisen laitoksen julkaisu*. – 2010. – № 143. – 116 p.
- Nordman M., Mäkinena J., Virtanena H., Johansson J., Bilker-Koivulaa M., Virtanena J. Crustal loading in vertical GPS time series in Fennoscandia // *Journal of Geodynamics*. 48: 144–150. DOI:10.1016/j.jog.2009.09.003. – 2009.
- Peng Fang. Analysis of Seasonal Signals in GPS Position Time Series // *Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, La Jolla, USA*. – 2002.
- Penna N., King M., Stewart M. GPS height time series: short period origins of spurious long period signals // *J. Geophys. Res.* 112, B02402, doi: 10.1029/2005JB004047. – 2007.
- Rabbel W., Zschau J. Static deformations and gravity changes at the earth's surface due to atmospheric loading // *J. Geophys. – Z. Geophys.* – 1985. – V. 56. – P. 81–99.
- Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction // *Bulletin Géodésique*. – 1973. – 107. – P. 13–345.
- Scherneck H.-G., and Bos M. Ocean Tide and Atmospheric Loading // In *IVS 2002 General Meeting Proceedings*, 205–214. (available at: <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2002/scherneck>) – 2002.
- Schmitz M., Wübbena G., Boettcher G. Tests of phase center variations of various GPS antennas and some results // *GPS Solutions*. – 2002. – Vol. 6, № 1–2. – P. 18–27.
- Shuman C. Antarctic Megadunes and Other Low Accumulation Features on the East Antarctic Plateau from ICE Sat. – 2007.
- Smith, E., Weintraub S. The constants in the equation of atmospheric refractive index at radio frequencies // *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*. – 1953. – 41 (8). – P. 1035–1037.
- Šnajdrová K., Englich S., Weber R., Boehm J., Schuh H. Estimation of nutation time series from GPS and VLBI for the CONT05 campaign // *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 01474, 2006.
- Steigenberger P., Boehm J., Tesmer V. Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and implications for atmospheric loading. // *Journal of Geodesy*. 83: 943-951, DOI 10.1007/s00190-009-0311-8. – 2009.
- Steigenberger P., Tesmer V., Krügel M., Thaller D., Schmid R., Vey S., Rothacher M. Comparisons of homogeneously reprocessed GPS and VLBI long time-series of troposphere zenith delays and gradients // *Journal of Geodesy*. 81 (6-8): 503–514. DOI: 10.1007/s00190-006-0124-y. – 2007.
- Tregoning P., Van Dam, 2005. Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level // *Geophysical Research Letters*. – 2005.
- Tregoning P., Watson C., Ramillien G., McQueen H., Zhang J. Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS // *Geophysical Research Letters*. 36, L15401. DOI: 10.1029/2009GL038718. – 2009.
- Van Dam T., Blewitt G., Heflin P. Atmospheric pressure loading effects on GPS coordinate determinations // *J. Geophys. Res.* 99, 23939–23950. – 1994.
- Van Dam T., Wahr J., Lavallée D. A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment // *J. Geophys. Res.* 112, B03404, 11 p. DOI: 10.1029/2006 JB 004335. – 2007.

- Van Dam T., Wahr J., Milly C., Shmakin A., Blewitt G., Lavallée D., Larson K. Crustal displacements due to continental water loading // *Geophys. Res. Lett.* 28, 651–654. – 2001.
- Vey S., Calais E., Llubes M., Florsch N., Woppelmann G., Hinderer J., Amalvict M., Lalancette M., Simon B., Duquenne F., Haase J. GPS measurements of ocean loading and its impact on zenith tropospheric delay estimates: a case study in Brittany, France // *Journal of Geodesy.* 76: 419–427. DOI: 10.1007/s00190-002-0272-7. – 2002.
- Vilibic I. Global sea level rise? New techniques for the absolute sea level measurement // *Geofizika.* – 1997. – Vol. 14. – P. 23–28.
- Virtanen H. Loading effects in Metsähovi from the atmosphere and the Baltic Sea // *Journal of Geodynamics.* 38/35: 407–422. – 2004.
- Virtanen H., Mäkinen J. The effect of the Baltic Sea level on gravity at the Metsähovi station // *Journal of Geodynamics.* 35/45: 553–565. – 2002.
- Virtanen H., Mäkinen J., Näränen J., Raja-Halli A. ja Ruotsalainen H.: I lknpainovoimaverkon (FOGN) uudelleenmittaus 2009–2011. // XXV Geofysiikan Päivät Oulussa. 11. – 12.05.2011.
- Virtanen H., Tervo M., Bilker-Koivula M. Comparison of superconducting gravimeter observations with hydrological models of various spatial extents // *Bulletin d'Information des Marées Terrestres.* 142: 11407–11416.2. – 2006.
- Watson, C., Tregoning P., Coleman R. The impact of solid Earth tide models on GPS coordinate and tropospheric time series // *Geophysical Research Letters.* 33, L08306, DOI: 10.1029/2005GL025538. – 2006.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ ПЕРМАНЕНТНЫХ СТАНЦИЙ МИРА

К.Р. Третяк, О.М. Смирнова, Т.М. Бределева

С целью исследования характерных периодов гармонических колебаний временных серий координат перманентных ГНСС станций, которые обусловлены различными геофизическими факторами, выполнен комплекс исследований. Создана база данных ежедневных временных серий 111 перманентных станций, наблюдения на которых выполнялось на протяжении не менее трех лет. Перманентные станции расположены по всему миру, на разных тектонических плитах. Разработан алгоритм и пакет прикладных программ для обработки временных серий и определения оптимальных кривых, максимально достоверно их описывающих. Для каждой станции записано уравнение для определения оптимального периода колебаний.

Выявлено аномальное распределение колебаний значений координат перманентных ГНСС станций с разными периодами, что свидетельствует о сложном характере влияния на пространственное размещение этих станций разных геофизических факторов. Накопленные результаты анализа временных серий значений координат указывают на необходимость систематических исследований влияния различных геофизических факторов на устойчивость и смещения перманентных станций.

Ключевые слова: временные серии значений координат перманентных ГНСС станций; гармонические колебания временных серий; геофизические факторы; инструментальные факторы.

STUDY OF PERIODIC CHANGES OF THE WORLD SATELLITE PERMANENT STATIONS ALTITUDES

K.R. Tretyak, O.M. Smirnova, T.M. Bredeleva

In order to study and determine the period of harmonic oscillations of time series of permanent stations, which are caused by various geophysical, the following factors in the investigation. A database of daily time series of 111 permanent stations, the observations that are running for at least 3 years. Permanent stations located around the world on different tectonic plates. Developed an algorithm and application packet processing time series and determine the optimal curves, describing them as reliable. For each station, write an equation to determine the optimal period of oscillation.

Studies show an anomalous distribution of the vibrations of different periods and demonstrate the complex nature of the phenomena caused by geophysical factors. The accumulated result of time series requires systematic studies of the influence of various factors and their geophysical interpretation of the stability and the displacement of the permanent stations.

Key words: time series of permanent stations; harmonic oscillations of time series; geophysical factors; instrumental factors.