

УДК 528.36

к.т.н. Кучер О.В.,
Науково-дослідницький інститут "Геодезії і картографії", м. Київ,
к.т.н., професор Староверов В.С., Данилюк О.Ю.,
Київський національний університет будівництва та архітектури

СУЧАСНІ НАПРЯМКИ ГЕОДЕЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ КОСМІЧНИМИ МЕТОДАМИ

Визначено перелік геодезичних задач, для однозначного розв'язання яких необхідно проводити систематичні дослідження рухів земної поверхні та враховувати їх характеристики при опрацюванні результатів геодезичних спостережень.

Розглянуті сучасні основні методи космічної геодезії, які використовують при вивченні всіх можливих впливів (припливних, обертання Землі, зміна гравітаційного поля, рухи полюсів і т. і.) при вивченні вертикальних і горизонтальних рухів земної поверхні.

Ключові слова: рухи земної поверхні, геодезичні задачі, космічні методи визначення рухів земної кори.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку геодезії характеризується використанням нових технологій визначення координат пунктів і вимог до підвищення точності їх визначення. Така задача може бути вирішена, по-перше, шляхом використання: досконалої методики вимірів, методів математичної обробки результатів вимірів, високотехнологічних геодезичних приладів та обладнання. По-друге: стабільністю пунктів планової і висотної геодезичної основи.

Як відомо, земна кора складається з чотирнадцяти літосферних плит, що мають спільну тенденцію до зміни свого просторового положення. Іншими словами вони мають тенденцію до переміщення в надрах Землі, що в свою чергу призводить до зміни положення пунктів планової та висотної основи, розміщених на її фізичній поверхні. В результаті таких вимірювань координати пунктів, визначених раніше, не будуть відповідати істинному положенню пункту по проходженню деякого періоду часу, після їхнього визначення, загалом на момент їх використання в якості вихідних. Узгодження істинного положення пункту і його координат можливо в випадку неперервного (перманентного) відслідковування переміщень земної кори і уточнення координат.

Постановка завдання. Метою статті є розгляд геодезичних методів вивчення горизонтальних і вертикальних рухів земної поверхні які базуються на методах космічної геодезії.

Виклад основного матеріалу.

Геодезичні задачі для однозначного вирішення яких потрібні дослідження рухів земної поверхні.

Для всіх видів досліджень зв'язаних з фізикою Землі, геодинамікою, передбачень землетрусів, побудовою геодезичних мереж для спостережень за великими спорудами та ін., виключне значення має вибір системи координат, в якій проводяться дослідження і даються множинні та якісні оцінки процесів і явищ. На сьогоднішній день використовується, за рекомендацією міжнародної служби обертання Землі, міжнародна земна відлікова основа ITRF, (Реалізація міжнародної земної референцної системи), яка являє собою прямокутну геоцентричну систему координат. В цій системі для опорних пунктів визначені значення координат, швидкостей та їх коваріаційна матриця. Визначення координат і швидкостей пунктів, на яких виконані геодезичні виміри для конкретних досліджень, в ITRF виконується вирівнюванням отриманих даних сумісно з опорними пунктами системи.

Система координат ITRS (Міжнародна земна референцна система), а її реалізація ITRF прийнята за стандартну або еталонну систему координат і використовується для встановлення референцних систем координат, як і було зроблено при встановленні Української системи координат УСК 2000.

Система ITRF/ITRS збудована і розвивається з використанням вимірів виконаних декількома космічними техніками: VLBI (Інтерферометрія з наддовгими базами), SLR (Лазерна локація штучних супутників Землі), DORIS (Визначення орбіт за допомогою Doppler - вимірів), GPS (Глобальна система визначення місця знаходження). Координати і швидкості пунктів на яких виконуються виміри переліченими техніками визначаються в деяких умовних системах координат (TRS), в яких положення початку, орієнтування та масштаб, як правило не співпадають. В результаті координати та швидкості пунктів супутникових систем SLR, DORIS, GPS віднесені до центру мас Землі, для кожної системи вони свої. Координати і швидкості пунктів VLBI віднесені до геометричних параметрів Землі, початок координат визначається довільно. Задача створення загальноземної системи координат полягає в розробленні методу об'єднання отриманих в умовному початку координат і швидкостей VLBI SLR, DORIS, GPS пунктів для визначення її параметрів. В отриманій системі початок, масштаб та орієнтація зв'язані між собою коваріаційною матрицею координат і швидкостей опорних пунктів, використовуючи які можна досліджувати геодинамічні процеси.

Найбільший вплив на отримання оцінки швидкостей, при використанні ITRF/ ITRS в конкретних дослідженнях, надає спосіб визначення орієнтації поля швидкостей цієї системи. Визначення орієнтації поля швидкостей системи ITRF/ITRS проводиться за геолого-геофізичною моделлю NNR-NUVEL-1A. Для цієї моделі на основі геологічних та геофізичних методів визначені швидкості руху літосферних плит на їх границях. Поле швидкостей в загальноземному масштабі отримують при умові рівності нулю сумарних рухів літосферних плит - умова no-net-rotation. В результаті модель NNR-NUVEL-1A визначає поле швидкостей літосферних плит в загальноземному масштабі - кінематичну систему координат, КСК. Після фіксації земна кора і система координат не мають обертання відносно одна одної. Фіксація ITRF/ITRS по моделі NNR-NUVEL-1A проводиться по узгодженню, сама модель не є еталонною і до того ж не єдина, існують наприклад моделі NNR-NUVEL-1B, APKIM 2000, GSRM-NNR-2. Неоднозначність уявлення про динаміку літосферних плит призводить до того, що отримана система координат спотворена параметрами для фіксації моделі.

В результаті в ITRF/ITRS неможливо проводити дослідження, вільні від впливу геологічної інформації, проводити зрівняння геологічних і геодезичних даних при проведенні геодинамічних досліджень. Отже для забезпечення необхідної точності визначення координат пунктів на момент вимірів в системі ITRF/ITRS необхідно враховувати дані про горизонтальні і вертикальні рухи земної поверхні та швидкості пунктів геодезичної мережі на яких виконані вимірювання.

На сучасному етапі для вивчення швидкостей сучасних вертикальних рухів земної кори (ШСВРЗК) великий інтерес представляє ГНСС-технології. Застосування ГНСС стало загальноприйнятою практикою при визначенні довготривалих (від року і більше) рухів і деформацій земної кори в глобальному і регіональному масштабах. На відміну від класичних методів геодезії ГНСС мають низку очевидних переваг: безперервний моніторинг, висока оперативність вимірів, простота та високий ступень автоматизації виконання вимірювань.

Одним із сегментів ГНСС - технологій є проведення високоточних вимірів в різних сейсмічних зонах. У зв'язку з цим з'явився новий напрям ГНСС-сейсмологія. Він вивчає зв'язок просторових рухів земної кори з сейсмічною активністю. Основними напрямками ГНСС - технології є прогнозування часу і місця виникнення сейсмічної події.

Взаємозв'язок між полем ШСВРЗК та сейсмічною активністю в цілому і навпаки між сейсмічною активністю і полем ШСВРЗК може слугувати передвісником узагальненої сейсмічної активності, що дозволяє прогнозувати з

певною імовірністю сейсмічні події. В зв'язку з цим виникає задача по проведенню систематичних спостережень за вертикальними рухами земної кори.

Перед геодезичною службою України поставлена задача по встановленню зв'язку між Українською та Європейською системами висот. Для вирішення такої задачі необхідно виконати підготовку даних для вирівнювання нівелірної мережі I та II класів з наступним вирівнюванням її та складання каталогів висот пунктів з метою введення і розповсюдження на території України системи висот UELN/EVS 2000 (Об'єднаної європейської нівелірної мережі / Європейської вертикальної системи 2000 року).

Вирівнювання нівелірної мережі I та II класів передбачається виконати у два етапи:

Етап 1. Вирівнювання вузлових пунктів нівелірної мережі I і II класів у центрі впровадження системи UELN/EVS 2000 BKG (Федеральне агентство картографії і геодезії Німеччини).

Етап 2. Вирівнювання окремих нівелірних ділянок (ходів), між вузловими пунктами нівелірної мережі та складання каталогу висот пунктів нівелювання I, II класів.

Висотна геодезична нівелірна мережа України складається з 29 ліній нівелювання I класу загальною протяжністю 11975,00 км. та 62 лініями нівелювання II класу загальною протяжністю 11179,50 км.

Зрозуміло що нівелювання виконувалось на протязі десятків років. При об'єднанні нівелірних мереж, побудованих у різні періоди виникають певні труднощі, насамперед методичного характеру. Внаслідок геодинамічних процесів у різних регіонах України висоти пунктів змінюються до 5 мм. на рік що призводить до необхідності приведення результатів нівелювання на одну епоху. Вирішення такої задачі стає можливим, якщо результати нівелювання будуть виправленні поправками за вертикальні рухи земної кори.

Загальний огляд методів геодезичних досліджень зміщень земної поверхні

Перший етап у дослідженні сучасних рухів земної кори (кінець XVIII - початок XIX століть) характеризувався визначенням абсолютних рухів земної поверхні за результатами спостережень рівнів води. Визначення рухів виконувалось виключно вздовж берегів морських акваторій і не давало інтенсивності картини рухів земної поверхні територій, віддалених від берегових ліній. З появою високоточних нівелірів, вдосконаленням методики високоточного нівелювання та розвитком нівелірних мереж починається новий етап вивчення вертикальних рухів земної кори, який характеризує визначення рухів на значних площах у межах окремих країн. Але виникають проблеми

сумісного вирівнювання висотних систем, віднесених до різних систем висот та вихідних футштоків.

З 1970 рр. XX століття починається етап у вивченні рухів земної поверхні цілих континентів. Це стає можливим завдяки міжнародної співпраці та достатньому розвитку методики, приладів, мереж нівелювання.

З розвитком наприкінці XX століття методів космічної геодезії, лазерної локації супутників (SLR), радіоінтерферометрії з наддовгими базами (VLBI), починається сучасний стан вивчення рухів земної кори. Однак внаслідок відносно низької щільності покриття території станціями спостережень, згадані супутникові методи використовувалися сумісно з високоточним геометричним нівелюванням. На сьогоднішній день в країнах Європи і по всьому світі намагаються створювати і розвивати саме комбіновані мережі (супутникові геодезичні спостереження, нівелювання і гравіметричні визначення) для врахування всіх можливих впливів (припливних, обертання Землі, зміна гравітаційного поля Землі, рух полюсів і т. і.) при вивченні вертикальних і горизонтальних рухів Землі. Крім геодезичного методу, сучасні геодинамічні рухи вивчають за допомогою таких методів: геологічний, геоморфологічний, геофізичний, геохімічний, астрономічний, та багато інших наук про Землю, наслідок чого вивчення набуває комплексного характеру.

В подальшому, будуть розглянуті тільки геодезичні методи горизонтальних і вертикальних рухів земної поверхні, а саме такі основні методи космічної геодезії:

- інтерферометрія з наддовгими базами;
- лазерна локація супутників;
- глобальні навігаційні супутникові системи (GPS, GALILEO, ГЛОНАСС)
- доплерівська супутникова система.

В кожній з цих систем присутні як мінімум три компоненти - космічний сегмент (супутники), наземний сегмент (станції спостереження за супутниками) та сегмент управління (центри обробки та аналізу).

Радіоінтерферометрія з наддовгими базами

Міжнародна служба VLBI створена з метою координації та виконання VLBI спостережень в рамках глобальної VLBI - мережі для виконання астрометричних, геодезичних та геофізичних досліджень. Міжнародна служба VLBI виконує роботи по встановленню та підтримки астрономічних та геодезичних систем відліку, виконує дослідження пов'язані з визначенням фігури Землі, дослідження та моніторинг фундаментальних характеристик Землі, а також дозволяє отримати інформацію про рухи літосферних плит.

Основними завданнями служби VLBI є:

- обслуговування користувачів під час виконання геодезичних, геофізичних і астрономічних досліджень;

- сприяння розвитку дослідницької діяльності в усіх геодезичних та астрономічних аспектах VLBI технології;

- сприяння та взаємодія з товариством користувачів VLBI продукції;

- **аналіз геодинамічних спостережень;**

- **створення локальних архівів геодинамічних спостережень;**

- інтеграція VLBI спостережень в світову систему спостережень;

Результатами функціонування міжнародної служби VLBI є:

- загальноземні референцні системи;

- міжнародна астрономічна (небесна) референцна система;

- параметри орієнтації Землі;

- **визначення параметрів обертання Землі з аналізу геодинамічних спостережень.**

Міжнародна VLBI - мережа об'єднує близько 50 станцій.

На території України функціонує лише одна VLBI - станція "Сімеїз", яка розташована на південному узбережжі Кримського півострова, на території науково - дослідницького інституту "Кримська астрофізична обсерваторія". Ця станція була побудована в 1965 році на базі 22- метрового телескопа (РТ 22). VLBI - станція "Сімеїз" є інтегрованою в міжнародну VLBI - службу та приймає участь у виконанні міжнародних програм.

Лазерна локація штучних супутників Землі

Основною задачею міжнародної служби SLR є забезпечення користувачів даними спостережень та результатами їх обробки і супроводження геодезичних і геофізичних досліджень, пов'язаних з вивченням фігури Землі та рухами її поверхні.

Служба SLR виконує збір,аналіз та накопичення даних, які необхідні Міжнародній службі обертання Землі для підтримання на відповідному рівні точності Міжнародної земної референцної системи координат (ITRS).

Точність даних отриманих на основі технології реалізованої службою SLR, достатня для задоволення великого поля наукових і виробничих задач, деякими з них є:

- уточнення Міжнародної земної референцної системи координат (ITRS);

- **моніторинг просторових деформацій твердої Землі;**

- моніторинг за обертанням Землі та рухом полюсу;

- гравітаційні та загальні релятивіські дослідження та визначення швидкості змін гравітаційної сталої з часом;

Міжнародна служба лазерної локації (ILRS) об'єднує понад 40 станцій лазерної локації, розташованих у більш ніж 30 країнах світу.

Українська мережа лазерної локації ШСЗ об'єднує чотири станції лазерної локації (ЛЛС - станції): "Голосіїв - Київ, " "Львів", "Сімеїз", "Кацавеллі". Ці станції української ЛЛС- мережі є інтегрованими в Міжнародну службу лазерної локації та беруть участь у виконанні міжнародних програм.

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS - ГНСС)

Глобальні навігаційні супутникові системи - це комплексні електронно-технічні системи, які складаються із сукупності наземного та космічного обладнання, призначеного для визначення місцезнаходження об'єктів на поверхні Землі та навколоземному просторі.

З метою стандартизації GNSS - даних, створення для цивільних користувачів якісних даних, була створена Міжнародна служба глобальних навігаційних супутникових систем (IGS)

За допомогою глобальних супутникових навігаційних систем можна вирішувати велике коло задач, деякими з яких є:

- *моніторинг просторових деформацій твердої Землі;*
- *моніторинг періоду обертання Землі;*
- *моніторинг змін гідросфери Землі;*
- *кліматичні дослідження, моделі прогнозування погоди.*

На території України функціонує 12 постійно діючих перманентних станцій. Ці станції об'єднані в Українську перманентну мережу спостережень глобальних навігаційних супутникових систем (УПМ ГНСС), яка була створена в 1995 році. Більшість Українських станцій входять до мережі Міжнародної GNSS - служби (IGS) та Європейської перманентної GPS - мережі (EPN).

Деякими основними функціями мережі є:

- *завдання та оперативне відтворення Міжнародної земної референційної системи ITRS;*
- *завдання та оперативне відтворення Європейської земної референційної системи ETRS89;*
- *усунення можливих спотворень Державної геодезичної мережі України;*
- *експериментальне виявлення та облік деформуючого впливу геодинамічних процесів на стабільність координатної основи (так зване приведення до єдиної епохи);*
- *визначення орбіт супутників, які використовуються в наукових цілях.*

Геодинамічна референцна GPS – мережа Центральної Європи (CEGRN) була створена в рамках проекту SERGOP в 1994 року. Проект SERGOP (Центрально - Європейський геодинамічний проект) був реалізований в 1994 – 1997 роках, а його наступник – проект SERGOP – 2 було розпочато в 2003 році. Ці проекти були створені з метою геодинамічних досліджень Центральної Європи. В рамках цього проекту було проведено 7 GPS кампаній, які покривали

період в 9 років. В результаті обробки циклів супутникових геодезичних спостережень було сформовано каталог координат та швидкостей зміщень станцій (пунктів), які в свою чергу були використані для подальшої інтерпретації геокінематики та аналізу напруженості тектонічних плит Центральної Європи. Для забезпечення довготривалої роботи мережі в 2001 році був заснований консорціум CEGRN. Його засновниками стали організації, які брали участь в проєкті CERGOP. Задачами консорціуму є забезпечення дієздатності мережі CEGRN, її підтримка і розвиток, управління даними, опрацювання даних та співпраця з іншими міжнародними організаціями в різноманітних наукових сферах.

Україна в цьому проєкті з 1994 року представлена кількома періодично діючими та постійно діючими станціями. Періодично діючі пункти УПМ ГНСС були побудовані в 1994 році. Всього було побудовано 16 пунктів. Періодично діючі пункти в переважній більшості являють собою тури різної висоти з маркою для примусового центрування GPS – приймачів.

Допплерівська супутникова система (DORIS)

Міжнародна служба IDS (Міжнародна служба DORIS) створена для забезпечення користувачів даними спостережень та результатами їх обробки, отриманих за допомогою доплерівських спостережень, в сфері геодезичних, геофізичних та інших досліджень, а також у вирішенні прикладних задач.

DORIS – це доплерівська система локацій супутників, розроблена для високоточного визначення орбіт і місцеположення. Вона реалізована за рахунок встановлення відповідної апаратури на метричних супутниках та супутниках для дистанційного зондування Землі.

Точність технології DORIS достатня для вирішення наукових і виробничих задач, деякими з них є:

- *реалізація і уточнення Міжнародної земної референційної системи (ITRS);*
- *моніторинг просторових деформацій твердої Землі;*
- *моніторинг деформацій Земної кори на мареографах;*
- *визначення орбіт супутників, які використовують в наукових цілях.*

На території України відсутні постійно діючі станції системи DORIS.

ВИСНОВКИ

З вищесказаного випливає необхідність проведення систематичних спостережень за рухами Земної поверхні. Головною перевагою використання методів космічної геодезії є можливість отримання характеристик рухів земної кори на великих територіях, що дозволяє використовувати характеристики таких рухів при розв'язанні геодезичних задач у глобальному масштабі. При цьому враховується та утверджується цілий набір даних про планетарну еволюцію Землі (наприклад, рух полюсу, нерівномірність обертання Землі,

рухи геодинамічних плит, варіації гравітаційного поля Землі і т. п.). Така особливість дозволяє отримувати користувачу однозначний результат з максимально можливою точністю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коломиец А. Г. Разработка методов фиксации кинематической системы координат по данным геодезических измерений /А.Г. Коломиец// Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук, Институт прикладной математики ДВОРАН г. Владивосток, 2010. – 18с.
2. Краснорылов И.И., Плахов Ю.В. Основы космической геодезии /И.И. Краснорылов, Ю.В. Плахов// Учебное пособие. Изд – во “Недра”. – М.: 1976. – 216с.
3. Романюк В.В. Геодинамічна інтерпретація вертикальних рухів земної кори Європи, визначених за даними ГНСС – вимірів. /В.В. Романюк// Автореферат на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. Національний університет “Львівська політехніка”. – Львів, 2015. – 18с.
4. Яцків Я.С. Українська мережа станцій космічної геодезії та геодинаміки /Я.С. Яцків, О.В. Болотіна, С.А. Болотін, М.М. Медведський, О.О. Хода, О.Є. Вольвач// Національна академія наук України, Головна астрономічна обсерваторія. – К. 2005. – 60 с.

АННОТАЦІЯ

Определен перечень геодезических задач, для однозначного решения которых необходимо проводить систематические исследования движений земной поверхности и учитывать их характеристики при проработке результатов геодезических наблюдений.

Рассмотрены современные основные методы космической геодезии, которые используют при изучении всех возможных влияний (приливных, вращение Земли, изменение гравитационного поля, движения полюсов и т. д.) при изучении вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности.

ABSTRACT

It was indentified the list of geodetic tasks, for solving them it is necessary to conduct systematic research the movements of the earth's surface and consider their characteristics when working over the results of geodetic observations.

Considered modern basic methods of space geodesy which are used while studying of all possible impacts (tidal, rotation of the Earth, changing the gravitational field, moves the poles and so on. I.) during studying of vertical and horizontal movements of the earth's surface.