

**О.В. Кучер**, канд. техн. наук  
Науково-дослідний інститут «Геодезії та картографії»,  
**В.С. Староверов**, канд. техн. наук, професор,  
**М.В. Ковальов**, старший викладач кафедри інженерної геодезії  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НА СТАБІЛЬНІСТЬ КООРДИНАТНИХ СИСТЕМ

*Розглянуто причини, що призводять до нестабільності заданої в країні системи координат. Визначено перелік геодезичних задач, для однозначного розв'язання яких потрібно виконувати систематичні дослідження рухів земної поверхні, зважаючи на їх характеристики під час опрацювання результатів геодезичних спостережень.*

*Розглянуто основні сучасні методи космічної геодезії, які використовують для вивчення всіх можливих впливів (припливних, обертання Землі, зміни гравітаційного поля, рухів полюсів та ін.) на вертикальні та горизонтальні рухи земної поверхні.*

**Ключові слова:** рухи земної поверхні, геодезичні задачі, космічні методи, перманентні станції, кінематична система координат

**Постановка проблеми.** Як відомо, земна кора складається з семи континентальних літосферних плит і виділених на їх основі дрібніших регіональних літосферних плит. Деякі великі та значна кількість малих плит літосфери товщиною порядку 100 – 200 км через дію конвекційних (теплових) потоків мають спільну тенденцію до зміни свого просторового положення. Інакше кажучи, вони мають тенденцію до переміщення в надрах Землі. Ці переміщення становлять декілька сантиметрів на рік. На межі плит розташовані сейсмічні зони та вулкани.

Рухи плит призводять до зміни положення пунктів планової та висотної основи, розміщених на фізичній поверхні Землі. Таким чином, координати та висоти пунктів, які реалізують задані системи координат і висот, визначених раніше, не будуть відповідними істинному положенню пунктів після деякого періоду від часу їх визначення, загалом на момент їх використання як вихідних. Узгодження істинного положення пункту з його координатами є можливим у разі безперервного (перманентного) відстеження переміщень земної кори й уточнення координат. Територія України розташована на Східноєвропейській літосферній плиті, яка є частиною Євразійської континентальної літосферної плити.

**Постановка завдання.** Метою статті є розгляд сучасних методів визначення впливу зміщень земної поверхні на стабільність координатних систем.

**Виклад основного матеріалу.** Для всіх видів геодезичних завдань, пов'язаних з визначенням координат пунктів, потрібно мати стабільну систему, координати пунктів якої дають змогу з належною точністю визначати координати

інших пунктів. Актуальність цієї задачі пояснюється ще й тим, що для виконання землевпорядних і кадастрових робіт обов'язковою є наявність великомасштабних планів як топографічної основи для розв'язання професійних завдань з землеустрою та кадастру. Точність визначення координат регламентується точністю масштабу плану (для масштабу 1:100 – 1 см; для масштабу 1:200 – 2 см і т.д.). Отже, точність визначення координат вихідних пунктів повинна бути не нижчою за точність масштабу топографічного плану.

Переміщення земної поверхні призводить до зміни положення пунктів вихідної системи, внаслідок чого координати пунктів не збігатимуться з істинним положенням цих пунктів.

Задача відповідності координат і положення пунктів може бути розв'язана на основі використання еталонної або стандартної системи координат ITRS/ITRF. Система ITRS і її реалізація ITRF являє собою прямокутну геоцентричну систему координат. У цій системі для опорних пунктів визначено координати, швидкості та їх коваріаційну матрицю. Визначення координат і швидкостей пунктів, на яких виконано геодезичні вимірювання для конкретних геодезичних задач, в ITRF здійснюється вирівнюванням одержаних даних сумісно з опорними пунктами системи.

Система ITRF побудована та розвивається з використанням вимірювань, виконаних за декількома космічними геодезичними технологіями: VLBI (Very Long Baseline Interferometry – Радіоінтерферометрія з наддовгою базою); LLR/SLR (Satellite Laser Ranging – Лазерна локація штучних супутників Землі та Місяця); DORIS (Doppler Orbitography and Radio positioning Integrated by Satellite – Доплерівська супутникова система); GPS (Global Positioning System – Глобальна навігаційна супутникова система).

Міжнародну службу VLBI створено з метою координації та виконання VLBI-спостережень в межах глобальної VLBI-мережі для виконання астрономічних, геодезичних і геофізичних досліджень. Міжнародна служба VLBI виконує роботи зі встановлення та підтримання астрономічних і геодезичних систем відліку, дослідження, пов'язані з визначенням фігури Землі, а також дослідження та моніторинг фундаментальних характеристик Землі, крім того, дає змогу отримати інформацію *про рухи літосферних плит*.

Основним завданням міжнародної служби SLR є надання користувачам даних спостережень і результатів їх опрацювання та супроводження геодезичних і геофізичних досліджень, пов'язаних з вивченням фігури Землі та *рухами її поверхні*. Служба SLR виконує збір, аналіз та накопичення даних, потрібних Міжнародній службі обертання Землі для підтримання на відповідному рівні точності Міжнародної земної референцної системи координат (ITRS).

Міжнародна служба IDS (Міжнародна служба DORIS) була створена для забезпечення користувачів даними спостережень і результатами їх опрацювання, отриманими за допомогою доплерівських спостережень у сфері геодезичних, геофізичних та інших досліджень.

Точність технології DORIS є достатньою для розв'язання наукових і виробничих задач, зокрема таких, як *моніторинг просторових деформацій твердої Землі, моніторинг деформацій земної кори на мареографах*.

Глобальні навігаційні супутникові системи – це комплексні електронно-технічні системи, які складаються з наземного та космічного обладнання, призначеного для визначення місцезнаходження об'єктів на поверхні Землі та в навколоремному просторі. За допомогою глобальних супутникових навігаційних систем можна розв'язати велике коло завдань, одним з яких є *моніторинг просторових деформацій твердої Землі*.

Зрозуміло, що підтримування Міжнародної земної референцної системи координат (ITRS) є неможливим без виконання систематичних безперервних (перманентних) спостережень супутників розгорнутого космічного сегмента (NAVSTAR, ГЛОНАСС) та одержання на підставі таких спостережень координат пунктів у системі ITRS. Станції, на яких виконують такі спостереження, називаються перманентними. Нині майже 500 таких станцій розміщено на поверхні Землі по можливості рівномірно; з них близько 260 станцій знаходяться на території Європи, зокрема 12 станцій розміщено в Україні. Ці станції об'єднані в Українську перманентну мережу спостережень глобальних навігаційних супутникових систем (УПМ ГНСС), яка була створена в 1995 році. Більшість українських станцій належать до мережі Міжнародної GNSS-служби (TGS) та Європейської перманентної GPS-мережі (EPN).

Основними функціями мережі є, зокрема такі: задавання й оперативне відтворення Міжнародної земної референцної системи координат ITRS; задавання й оперативне відтворення Європейської земної референцної системи ETRS; усунення можливих спотворень Державної геодезичної мережі (ДГМ) України, експериментальне виявлення та облік деформаційного впливу геодинамічних процесів на стабільність координатної основи (так зване зведення до єдиної епохи).

Принцип роботи перманентної станції полягає в тому, що, одержуючи інформацію від супутників того чи іншого космічного сегменту кожні 30 секунд, за допомогою спеціального програмного забезпечення обчислюють координати станції в системі координат ITRF. Таким чином, можна вважати, що одержувані координати будуть відповідними істинному положенню станції. Використовуючи координати перманентних станцій як вихідні, в результаті повторного вирівнювання ДГМ можна одержати нові координати пунктів мережі, відповідні істинному положенню всіх пунктів ДГМ.

У Головній астрономічній обсерваторії (ГАО) НАН України створено Операційний центр української перманентної GPS-мережі, функціями якого є:

- супровід роботи перманентних станцій;
- керування даними з перманентних станцій української GPS-мережі.

Отже, облік зміщень земної поверхні, які впливають на стабільність координатної системи, можна виконувати за допомогою перманентних станцій, тим самим сприяти усуненню можливих спотворень державної геодезичної мережі України.

Автор наукового дослідження [1] зазначає, що найбільший вплив на одержувані оцінки швидкостей завдяки використанню ITRF як стандартної або еталонної системи координат має спосіб визначення орієнтації поля швидкостей цієї системи. Визначають орієнтування поля швидкостей системи ITRF за

геолого-геофізичною моделлю NNR – NUVEL – 1A. Для цієї моделі на основі геологічних і геофізичних методів визначено швидкості руху літосферних плит на їх межах. Поле швидкостей у загальноземному масштабі одержують за умови рівності нулю сумарного обертання літосферних плит. У результаті модель NNR – NUVEL – 1A визначає поле швидкостей літосферних плит у загальноземному масштабі – кінематичну систему координат (КСК). Після фіксування земна кора та система координат не мають обертання відносно одна одної.

Множинність уявлень про динаміку літосферних плит призводить до того, що одержана система координат виявляється спотвореною параметрами обраної для фіксування моделі, через що ITRF не можна використовувати як стандартну або еталонну систему, вільну від впливу геологічної інформації, а також порівнювати геологічні і геодезичні дані у геодинамічних дослідженнях. Задача може бути коректно розв'язана за допомогою методу фіксування КСК лише за геодезичними даними, без залучення додаткової інформації про параметри й еволюцію Землі. Автором дослідження [1] було поставлене завдання із створення методу та побудови алгоритмів фіксування КСК за даними космічних геодезичних мереж.

Оскільки координати та швидкості пунктів, на яких були виконані вимірювання за космічними геодезичними технологіями, одержано в умовних системах координат, дані кожної системи самі по собі містять обмеження на якість і кількість визначуваних параметрів. У термінології методу найменших квадратів це має вплив на дефект коваріаційної матриці визначуваних параметрів (координат і швидкостей пунктів). Цей факт дає змогу застосувати для фіксування системи координат параметричний спосіб опрацювання вимірювань з накладанням обмежень різного виду. Вибір обмежень дає можливість зафіксувати КСК відносно геометричного центру Землі у випадку VLBI-вимірювань; зафіксувати КСК відносно земної кори у випадку супутникових систем; об'єднати VLBI та супутникові мережі, що дасть змогу зафіксувати КСК відносно центра мас й обертання Землі; визначити для кожного випадку можливу зміну радіуса Землі, порівняти його з відомими визначеннями за іншими методами.

Розроблений у дослідженні [1] метод фіксування КСК дає можливість систематично коригувати задану систему ITRF і, як наслідок, вважати її стандартною або еталонною системою координат. Розроблений метод фіксування КСК дозволяє вважати систему координат ITRF стабільною.

**Висновок.** Система перманентних станцій, розміщених у межах території України, а також розроблений метод фіксування кінематичної системи координат дають можливість досягти стабільності заданої в Україні системи координат УСК-2000.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коломиец А.Г. Разработка методов фиксации кинематической системы координат по данным геодезических измерений: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.13.18 / А.Г. Коломиец: [Ин-т прикладной математики ДВО РАН]. – Владивосток, 2010. – 18 с.

2. *Краснорылов И.И.* Основы космической геодезии: учеб. пособие / И.И. Краснорылов, Ю.В. Плахов. – М.: Недра, 1976. – 216 с.
3. *Кучер О.В.* Сучасні напрямки геодезичних досліджень зміщень земної поверхні космічними методами / О.В. Кучер, В.С. Староверов, О.Ю. Данилюк // Містобудування та територіальне планування. – 2016. – Вип. 59. – С. 261 – 269.
4. *Романюк В.В.* Геодинамічна інтерпретація вертикальних рухів земної кори Європи, визначених за даними ГНСС-вимірів: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.24.01 / В.В. Романюк: [Національний університет «Львівська політехніка»]. – Львів, 2015. – 18 с.
5. *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, 2005. – 60 с.

## REFERENCES

1. Kolomiets, A.G. (2010). Razrabotka metodov fiksatsii kinematicheskoi sistemy koordinat po dannym geodezicheskikh izmerenii [Development of methods for fixing the kinematic coordinate system according to geodetic measurements]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Vladivostok: Institut prikladnoi matematiki DVO RAN [in Russian].
2. Krasnorylov, I.I., & Plakhov, Yu. V. (1976). *Osnovy kosmicheskoi geodezii* [Basics of space geodesy]. Moskva: Nedra [in Russian].
3. Kucher, O.V., Starovierov, V.S., & Danyliuk, O.Yu. (2016). Suchasni napriamky geodezychnykh doslidzhen zmishchen zemnoi poverkhni kosmichnymy metodamy [Modern directions of geodetic studies of displacements of the Earth's surface by space methods]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban and territorial planning*, 59, 261 – 269 [in Ukrainian].
4. Romaniuk, V.V. (2015). Geodynamichna interpretatsiia vertykalnykh rukhiv zemnoi kory Yevropy, vyznachenikh za danymy GNSS-vymiriv [Geodynamic interpretation of vertical movements of the Earth's crust of Europe, determined according to GNSS measurements]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Lviv: Natsionalnyi universytet "Lvivska politekhnika" [in Ukrainian].
5. Yatskiv, Ya.S., Bolotina, O.V., Bolotin, S.A., Medvedskii, M.M., Khoda, O.O., & Volvach, O.Ye. (2005). *Ukrainska merezha stantsii kosmichnoi geodezii ta geodynamiky* [Ukrainian network of stations of space geodesy and geodynamics]. Natsionalna akademiia nauk Ukrainu, Golovna astronomichna observatoriia [in Ukrainian].

**О.В. Кучер, В.С. Староверов, Н.В. Ковалев**

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА СТАБИЛЬНОСТЬ КООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ

*Рассмотрены причины, которые приводят к нестабильности заданной в стране системы координат.*

*Определен перечень геодезических задач, для однозначного решения которых необходимо проводить систематические исследования движения*

*земной поверхности и учитывать их характеристики при обработке результатов геодезических наблюдений.*

*Рассмотрены основные современные методы космической геодезии, которые используют для изучения всех возможных влияний (приливных, вращение Земли, изменение гравитационного поля, движения полюсов и т. д.) на вертикальные и горизонтальные движения земной поверхности.*

**Ключевые слова:** *движения земной поверхности, геодезические задачи, космические методы, перманентные станции, кинематическая система координат*

**O. Kucher, V. Starovierov, M. Kovalov**

### **ANALYSIS OF INFLUENCE OF EARTH SURFACE DISPLACEMENTS ON STABILITY OF COORDINATE SYSTEMS**

*The reasons that lead to instability of a given coordinate system in the country are considered.*

*A list of geodesic tasks has been defined, for an unambiguous solution of which it is necessary to conduct systematic studies of the movement of the Earth's surface and take their characteristics into account when processing the results of geodetic observations.*

*The modern basic methods of space geodesy are considered, which are used when studying all possible influences (tidal, Earth rotation, changes of gravitational field, the movement of poles, etc.) when studying vertical and horizontal movements of the Earth's surface.*

*It is noted that the ITRS coordinate system and its implementation on the Earth's surface in the form of more than five hundred points are used as a standard or reference coordinate system. Stations that implement the ITRF coordinate system, operate continuously in automatic mode, are called permanent stations.*

*The basic principle of operation of permanent stations is considered, which makes it possible every thirty seconds to update the coordinates of stations in the ITRF coordinate system and thereby eliminate possible distortions of the State Geodetic Network of Ukraine.*

*The possibility of using the method of fixing the kinematic coordinate system is shown, that makes possible to consider the ITRF coordinate system as a stable system and the possibility of using it as a standard or reference system.*

**Keywords:** *earth motions, geodesic tasks, space methods, permanent stations, kinematic coordinate system*

Надійшла до редакції

21.02.2019