

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (G18)

УДК 528.2

МЕТОДИ ТРАНСФОРМАЦІЇ КООРДИНАТ У ГЕОДЕЗІЇ: ОГЛЯД, АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ТА ФАКТОРИ ПОХИБОК

Канд. екон. наук О. О. Воронков

CONVERSION OF COORDINATE POINTS FROM ONE COORDINATE SYSTEM TO ANOTHER: METHODS, ACCURACY AND PRACTICAL ASPECTS

PhD (in Economics) O. Voronkov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362441>



Анотація. У статті розглянуто завдання з перетворення координат пунктів з однієї системи координат на іншу як одну з основних проблем сучасної геодезії та геоінформаційних технологій. Обґрунтовано актуальність цього завдання в умовах широкого застосування GNSS-вимірювань і необхідності інтеграції даних, отриманих у різних координатних основах. Наведено характеристику основних методів і підходів щодо перетворення координат, зокрема просторових перетворень, афінних і поліноміальних моделей, проєкційного перетворення, і проаналізовано джерела похибок.

Ключові слова: система координат, перетворення, точність, датуми, параметри перетворення, аналітичні методи, числові методи.

Abstract. The solution of modern geodetic tasks is based on the use of different coordinate systems, which determines the relevance of the problem of transforming coordinates of points from one coordinate system to another.

The purpose of this article is to review the main methods and approaches to the practical solution of the tasks of coordinate transformation and the problem of accuracy reduction during such transformations.

The paper considers the main methods of coordinate transformation, the most widely used of which are the well-known methods of Helmert and Molodensky. Their advantage is due to the relative simplicity of implementation and interpretation of the calculated parameters. Affine transformation methods provide the ability to model unequal scaling and deformations of the coordinate grid during coordinate transformation. These methods are effective for reconciling data obtained by different surveying methods. In the case of complex variable dependencies between two systems that cannot be adequately described by other models, polynomial and empirical methods are used. These methods involve the formation of an analytical or numerical-empirical dependence and the subsequent minimization of inconsistencies between the coordinates of the two systems. Polynomial methods ensure high consistency of coordinates within the domain of transformation parameters and provide high accuracy.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Воронков О. О., 2026.

The choice of coordinate transformation method should take into account the specifics of the task, such as the size of the territory, the required accuracy, the unevenness of deformations between coordinate systems, and the availability of reference points. Often, a combination of several transformation methods is used to improve accuracy. The further development of coordinate transformation methods is linked to the improvement of national coordinate systems, the increase in the density and stability of geodetic networks, and the widespread introduction of automated transformation services.

Keywords: *coordinate system, transformation, accuracy, datum, transformation parameters, analytical methods, numerical methods.*

Вступ. Сучасні геодезичні, картографічні та геоінформаційні технології ґрунтовані на використанні різних систем координат, що застосовують на глобальному, регіональному та локальному рівнях. У практиці інженерно-геодезичних робіт, землеустрою, кадастру, навігації часто виникає потреба поєднати дані, отримані в різних системах координат. Це зумовлює актуальність завдання перетворення координат пунктів з однієї системи координат на іншу. Перехід від класичних локальних державних систем координат до сучасних геоцентричних і глобальних систем, таких як WGS 84, ITRF і їхні національні реалізації, супроводжений необхідністю коректного узгодження координатної основи. При цьому особливого значення набувають питання точності, визначеності параметрів перетворення та їхньої просторової і часової однорідності. Неврахування цих факторів може призводити до систематичних похибок, що можуть стати критичними для високоточних геодезичних і навігаційних застосувань.

Актуальність завдання перетворення координат зумовлена кількома основними факторами, одним із яких є активне впровадження GNSS-технологій, що призводить до масового отримання координат у глобальних системах WGS 84, ПЗ-90.11 і ITRF2020, які необхідно трансформувати до національних або локальних систем координат із метою забезпечення сумісності з наявними картографічними матеріалами. Практично перетворення координат потрібне під час

інтеграції результатів GNSS-вимірювань у державні системи координат під час виконання топографо-геодезичних робіт, оновлення та модернізації кадастрових баз даних, що створені в різних координатних основах, об'єднання геопросторових даних із різних джерел у геоінформаційних системах для забезпечення сумісності картографічних та інженерних даних під час проєктування об'єктів інфраструктури. У кожному випадку якість кінцевого результату безпосередньо залежить від правильного вибору методу перетворення координат і коректного оцінювання похибок, що виникають у процесі трансформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У низці наукових робіт автори розглядають методи та особливості вирішення завдання перетворення координат пунктів із локальних у загальні земні системи. Зокрема, у статті [1] досліджено точність перетворення координат систем СК-42 і СК-63 на систему координат WGS-84, розглянуто вплив на результати перетворення координат параметрів Гельмерта, що можуть відрізнитися в різних програмних засобах, і запропоновано технологію координатного трансформування. У статті [2] для перетворення просторових GNSS-даних у локальні проєкції застосовано моделі Бурса-Вольфа і Молоденського-Бадекаса, виявлено істотний вплив параметрів перетворення на спотворення даних і визнано ефективність застосування моделі Молоденського-Бадекаса для перетворення глобальних і локальних систем координат.

У роботі [3] запропоновано методику перетворення координат із системи ITRF-2014 на систему координат Дністровської ГАЕС, у статті [4] автор пропонує методику обчислення координат у системі УСК-2000 за даними GNSS-спостережень, використання якої забезпечує високу точність. У статті [5] авторами на підставі порівняльного аналізу низки методів перетворення координат з огляду на їхню точність рекомендовано метод Гельмерта для геодезичних опорних точок і обґрунтовано висновок, що метод NTV2 забезпечує підвищення точності перетворень. Повноцінне використання GNSS-технологій для вирішення важливих завдань, а також можливості використання великого обсягу геодезичних та інших даних, які були створені в різних системах координат за класичними методами, потребує ефективного перетворення координат під час переходу від однієї системи до іншої [6]. У роботі [7] подано модифікований програмний алгоритм трансформування координат із системи WGS-84 у проєкцію Меркатора. Через усунення критичних похибок алгоритм забезпечує високу точність плоских прямокутних координат у геодезичних мережах. Автори статті [8] повідомляють про новий метод перетворення просторових прямокутних координат у геодезичні координати, який передбачає використання проміжних змінних, що дає змогу отримати підвищення точності відносно традиційних методів. Зокрема, новий метод забезпечує точність на два порядки вище за широту і довготу.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є огляд основних методів і підходів щодо практичного вирішення завдання перетворення координат, аналіз проблеми зменшення точності під час виконання таких перетворень, а також детальна характеристика найпоширеніших методів трансформації координат.

Основна частина дослідження.

Проблема зміни точності вихідних даних є однією з основних під час перетворення координат. Навіть за умови високої точності первинних вимірювань похибки можуть істотно збільшуватися внаслідок неточності параметрів перетворення, нерівномірного просторового розподілу спільних пунктів, неврахування деформацій координатної мережі та застосування невдало вибраної математичної моделі. Зокрема, неточність параметрів перетворення, до яких належать параметри зсуву, обертання, масштабу в жорстких і афінних моделях, а також коефіцієнти поліномів або емпіричних функцій, спричинені похибками координат спільних пунктів, недостатнім обсягом вихідних даних і кореляцією параметрів моделі, можуть викликати істотні похибки [9, 11]. Крім того, похибки може спричинити використання для локального рівня таких параметрів зв'язку, що усереднені для великої території. Також істотні похибки виникають у разі неврахування деформацій координатної мережі, причинами яких можуть бути історичні особливості створення державних геодезичних мереж, використання різних приладів і методів вимірювань, накопичення похибок унаслідок багатоступеневого згущення, а також вплив геодинамічних процесів. Деформації координатної мережі проявляються як локальні зсуви пунктів, просторово змінний масштаб, перекося координатних осей і порушення взаємної геометричної узгодженості мережі. Невдалий вибір математичної моделі так само є поширеною причиною зростання похибок. Це відбувається у випадках, коли для локально деформованої державної системи координат використовують глобальну жорстку або афінну модель, яка не здатна відобразити реальні просторові спотворення. Державна система координат може виявитися локально деформованою внаслідок тривалого історичного розвитку, фрагментарного оновлення мережі,

переходів між різними епохами та системами без повної реконструкції координатної основи [7].

Розглянемо детальніше основні методи перетворення координат. Найбільш застосовуваними є методи Гельмерта та Молоденського, що можна віднести до методів геометричних перетворень, які передбачають збереження форми і розмірів фігур у просторі. Просторове перетворення Гельмерта включає три параметри зсуву, три параметри обертання та один параметр масштабу [1, 3, 5]. Цей метод полягає в безпосередньому обчисленні тривимірних геодезичних координат, його часто використовують для трансформації координат у міжнародних і національних системах, зокрема WGS-84 і ITRF, метод забезпечує точність до 0,5-1 м. На відміну від методу Гельмерта, перетворення Молоденського включає, окрім трьох параметрів зсуву між центрами систем координат, різниці параметрів референц-еліпсоїдів між їхніми великими півсями і стисненнями та забезпечує перехід між геодезичними координатами, що ґрунтований на різних датах, виключаючи необхідність переходу до прямокутних координат. Як наслідок, цей метод дає поправки як функції параметрів зв'язку координатних систем, що залежать від розмірів і форми референц-еліпсоїдів [2]. Метод Молоденського простіше в реалізації за метод Гельмерта і так само забезпечує високу точність. Такі перетворення широко застосовують для переходу між геоцентричними системами координат або між близькими за побудовою системами, де деформації мінімальні. Їхню перевагу зумовлює відносна простота реалізації та інтерпретації параметрів, водночас потрібно відзначити обмеження – неможливість урахування локальних неоднорідностей і деформацій координатної основи [1, 10].

Афінні перетворення використовують для трансформації між місцевими та національними координатними системами. Сутність афінних перетворень полягає в

можливості моделювання неоднакового масштабування та деформацій координатної сітки, що робить цей метод придатним для переходу між системами координат, які містять систематичні лінійні спотворення, зокрема враховує різні масштабні коефіцієнти за різними напрямками та зсуви, що не зберігають ортогональність осей. Афінні перетворення широко застосовують у завданнях великомасштабного картографування, для трансформації планових координат у межах окремих регіонів, а також узгодження матеріалів, отриманих різними методами зйомки. Метод афінних перетворень дає змогу врахувати нерівномірні деформації та забезпечує точність до 10-15 см на відстанях до 100 км [6, 11].

Методи проєкційного перетворення координат використовують для безпосереднього переходу від певної картографічної проєкції та відповідного датуму до координат для іншої картографічної проєкції та відповідного їй датуму. Зокрема, ґрид-орієнтований метод перетворення геодезичних координат NTv2 (National Transformation Version 2) придатний як для переходу до глобальних датумів, таких як WGS 84, ПЗ-90.11 і ITRF2020, так і між місцевими датами. Забезпечення високої точності перетворення координат за методом NTv2 ґрунтовано на тому, що для врахування локальних спотворень використана сітка зсувів і для точки, координати якої не збігаються з вузлом сітки, точні поправки обчислені методом білінійної інтерполяції, що забезпечує точність перетворення [5, 12].

Поліноміальні та емпіричні методи перетворення координат застосовують у випадках, коли між двома системами координат існують складні просторово змінні залежності, що не можуть бути адекватно описані іншими моделями. Їхня сутність полягає в побудові аналітичної або чисельно-емпіричної залежності між координатами через апроксимацію за спільними пунктами. Висока точність

поліноміальних та емпіричних методів забезпечена насамперед можливістю врахування локальних деформацій координатної основи. На відміну від глобальних перетворень із фіксованим набором параметрів, поліноміальні моделі допомагають описувати зміну масштабів, перекося та нелінійні спотворення, що змінюються у просторі. Цього досягають через використання поліномів першого, другого або вищих порядків, коефіцієнти яких визначені методом найменших квадратів за результатами спостережень на спільних пунктах. Емпіричний характер цих методів полягає в тому, що їхні параметри не мають безпосередньої геометричної або фізичної інтерпретації, а визначені виключно з метою мінімізації залишкових нев'язок між координатами у двох системах. Завдяки цьому можна досягти високої узгодженості координат у межах області, де визначали параметри перетворення [12]. Поліноміальні перетворення широко застосовують для трансформації координат у застарілих державних системах, що мають значні історично зумовлені деформації, а також для узгодження великомасштабних карт і планів, створених у різний час і за різними методиками.

Разом із тим застосування поліноміальних і емпіричних методів має низку обмежень. Високої точності досягають лише в межах області, охопленої спільними пунктами, тоді як екстраполяція за її межі може призводити до різкого зростання похибок. Також використання поліномів високого порядку може спричинити охоплення моделлю, окрім випадкових відхилень, грубі похибки вихідних даних. Тому вибір порядку полінома та щільності опорних пунктів є критично важливим етапом реалізації цих методів [12].

До емпіричних методів належить перетворення датумів із використанням апарата множинної регресії, що забезпечує прийнятну точність перетворення для місцевих датумів і пряме перетворення геодезичних координат, уникаючи

проміжного переведення їх у геоцентричні координати.

Перетворення координат можна здійснювати як аналітичними, так і чисельними методами. Аналітичні методи точніші за чисельні, але й складніші та потребують відомих параметрів еліпсоїдів. На відміну від аналітичних, чисельні методи не потребують параметрів еліпсоїдів, у цих методах для перетворення координат застосовано поліноміальні рівняння, до яких для обчислення коефіцієнтів поліному вводять координати кількох контрольних точок. Вибираючи метод трансформації координат, потрібно враховувати характер завдання, зокрема розмір території, потрібну точність, нерівномірність деформацій між системами координат і доступність опорних точок, для яких в обох системах відомі координати. Часто з метою підвищення точності застосовують комбінацію декількох методів трансформації.

Існує багато комп'ютерних програм для перерахунку координат з однієї системи і іншу, [1] наприклад такі програмні продукти, як «Trimble Geomatics Office», «ArcGIS Pro», «Leica Geo Office» та інші, також пропонують спеціалізовані програми та онлайн-сервіси, наприклад геодезичний калькулятор

<https://dgm.gki.com.ua/geodezichni-kalkuljator> для перетворення координат між системами СК-42, СК-63, УСК-2000 та інших місцевих систем на території України. Вибір програми визначено характером завдання, наприклад для точних геодезичних обчислень найбільш прийнятним є ArcGIS Pro, для швидкої трансформації – Digital. Перетворення координат можна виконувати також у геоінформаційних системах, але за наявності в них множини стандартних картографічних проєкцій місцевих систем координат України в їхніх бібліотеках немає. Крім того, перехід між проєкціями в ГІС, навіть у разі задавання правильних параметрів системи координат і проєкції, не завжди коректний. Можливо, це пов'язано із

застосовуваними в програмах алгоритмами перерахунку координат, а отже, краще користуватися спеціалізованими програмами, призначеними для опрацювання геодезичних даних.

Висновки. Завдання перетворення координат пунктів з однієї системи координат в іншу є однією з базових і водночас складних у сучасній геодезичній практиці. Її актуальність зумовлена необхідністю інтеграції різномірних геопросторових даних і переходу до глобальних координатних основ.

Аналіз показує, що вибір методу перетворення має ґрунтуватися на характері

вихідних систем координат, вимогах щодо точності, просторовому охопленні завдання. Класичні жорсткі перетворення є ефективними для систем, що мають малі розбіжності, тоді як для деформованих координатних основ доцільно застосовувати спеціальні математичні методи, наприклад такі, як поліноміальні або сіткові моделі.

Подальший розвиток методів перетворення координат пов'язаний з удосконаленням національних координатних систем, підвищенням щільності та стабільності геодезичних мереж, а також широким впровадженням автоматизованих сервісів трансформації.

Список використаних джерел

1. Боровий В., Зарицький О., Кінь Д. (2017). Технологія координатного перетворення та трансформування при геодезичних та землевпорядних роботах. *Землевпорядний вісник*. 24. 15-19.
2. Kalu I., Ndehedehe C. E., Okwuashi O. & Eyoh A. E. (2022). A comparison of existing transformation models to improve coordinate conversion between geodetic reference frames in Nigeria. *Modeling Earth Systems and Environment*. 8 (1). 611-624. doi: 10.1007/S40808-021-01090-Y
3. Віват А. Й. (2023). *Удосконалення геодезичних методів підвищення точності вимірювань в інженерно-геодезичних роботах* (1-) [Diss. ... Cand. of Technical Science]. Національний університет «Львівська політехніка».
4. Савчук С., Проданець І., Федорчук А. (2022). Застосування методики визначення координат за даними GNSS-спостережень із прив'язкою до мережі активних референціальних станцій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 1 (43). 48-54. <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-43-48-54>
5. Yun S., Lee H., Song J. (2020). Studies on derivation of appropriate geodetic system transformation schemes for spatial data. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*. 38 (6). 561-571. doi: 10.7848/ksgpc.2020.38.6.561
6. Карпінський Ю., Кінь Д., Куриляк І., Ротачов Н. (2024). Методика трансформування координат з архівної системи (Вараш-42) у діючу (МСК-56) за допомогою QGIS. *Містобудування та територіальне планування*. 86. 397-410. doi: 10.32347/2076-815x.2024.86.397-410
7. Younes J. & Mustafin M. (2018). The characteristics of transforming coordinates from the geocentric system WGS-84 for the Mercator projection under low latitudes conditions. *Geodesy and Cartography*. 940 (10). 2-6. doi: 10.22389/0016-7126-2018-940-10-2-6
8. Ya-jing Y. U. & Qing I. (2013). Study on the Conversion Method of Spacial Rectangular Coordinate to Geodetic Coordinate Based on Intermediate Variables. *Measurement and Control Technology*. 7. 11-14. doi: 10.3969/j.issn.1000-8829.2013.07.004
9. Al-Kasem S., Al-Razzak A. & Jibrini H. (2024). A Methodology for Transformation Between Geodetic Datums Used in Syria. *Journal of King Saud University. Engineering Sciences*. 36 (2). 105-111. doi 10.1016/j.jksues.2023.02.001

10. Задемленюк А. В. (2008). Про сучасний стан координатного забезпечення та перспективи його вдосконалення для задач кадастру. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Геодезія, картографія, аерофотознімання»*. 70. 14-20.

11. Зуска А., Трегуб Ю., Янкін О. (2023). Аналіз впливу перетворення координат поворотних точок земельних ділянок із системи СК-63 в УСК-2000 на їх лінійні параметри та площу. *Просторовий розвиток*. 3. 108-121. doi: 10.32347/2786-7269.2023.3.108-121

12. Kuangxu W., Sijing Ye., Peichao G., Xiaochuang Y. & Zuliang Z. (2022). Optimization of Numerical Methods for Transforming UTM Plane Coordinates to Lambert Plane Coordinates. *Journals Remote Sensing*. 14 (9). doi: 10.3390/rs14092056

References

1. Borovyi V., Zarytskyi O. & Kin D. (2017). Tekhnolohiia koordynatnoho peretvorennia ta transformuvannia pry heodezychnykh ta zemlevporiadnykh robotakh [Technology of coordinate transformation and transformation in geodetic and land surveying works]. *Land Survey Bulletin*. 24. 15-19. [in Ukrainian].

2. Kalu I., Ndehedehe C. E., Okwuashi O. & Eyoh A. E. (2022). A comparison of existing transformation models to improve coordinate conversion between geodetic reference frames in Nigeria. *Modeling Earth Systems and Environment*. 8 (1). 611-624. doi: 10.1007/S40808-021-01090-Y

3. Vivat A. Y. (2023). *Udoskonalennia heodezychnykh metodiv pidvyshchennia tochnosti vymiriuvan v inzhenerno-heodezychnykh robotakh [Improvement of geodetic methods for increasing the accuracy of measurements in engineering and geodetic works]* (1–) [Diss. ... Cand. of Technical Science]. Lviv Polytechnic National University.

4. Savchuk S., Prodanets I. & Fedorchuk A. (2022). Zastosuvannia metodyky vyznachennia koordynat za danymy GNSS-sposterezhen iz pryviazkoiu do merezhi aktyvnykh referentsnykh stantsii [Application of the method of determining coordinates based on GNSS observations with reference to a network of active reference stations]. *Modern Achievements of Geodesic Science and Industry*. 1 (43). 48–54. <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-43-48-54> [in Ukrainian].

5. Yun S., Lee H. & Song J. (2020). Studies on derivation of appropriate geodetic system transformation schemes for spatial data. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*. 38(6). 561-571. doi: 10.7848/ksgpc.2020.38.6.561

6. Karpinskyi Yu., Kin D., Kuryliak I. & Rotachov N. (2024). Metodyka transformuvannia koordynat z arkhivnoi systemy (Varash-42) u diiuchu (MSK-56) za dopomohoiu QGIS [Methodology for transforming coordinates from the archival system (Varash-42) to the current one (MSK-56) using QGIS]. *Urban development and spatial planning*. 86. 397-410. doi: 10.32347/2076-815x.2024.86.397-410. [in Ukrainian].

7. Younes J. & Mustafin M. (2018). The characteristics of transforming coordinates from the geocentric system WGS-84 for the Mercator projection under low latitudes conditions. *Geodesy and Cartography*. 940 (10). 2-6. doi: 10.22389/0016-7126-2018-940-10-2-6

8. Ya-jing Y. U. & Qing I. (2013). Study on the Conversion Method of Spacial Rectangular Coordinate to Geodetic Coordinate Based on Intermediate Variables. *Measurement and Control Technology*. 7. 11-14. doi: 10.3969/j.issn.1000-8829.2013.07.004

9. Al-Kasem S., Al-Razzak A. & Jibrini H. (2024). A Methodology for Transformation Between Geodetic Datums Used in Syria. *Journal of King Saud University. Engineering Sciences*. 36 (2). 105-111. doi 10.1016/j.jksues.2023.02.001

10. Zademleniuk A. V. (2008). Pro suchasnyi stan koordynatnoho zabezpechennia ta perspektyvy yoho vdoskonalennia dlia zadach kadastru [On the current state of coordinate support

and prospects for its improvement for cadastral tasks]. *Interdepartmental scientific and technical collection «Geodesy, cartography, aerial photography»*. 70. 14-20. [in Ukrainian].

11. Zuska A., Trehub Yu. & Yankin O. (2023). Analiz vplyvu peretvorennia koordynat povorotnykh tochok zemelnykh dilianok iz systemy SK-63 v USK-2000 na yikh liniini parametry ta ploshchuiu [Analysis of the impact of converting the coordinates of the turning points of land plots from the SK-63 system to the USK-2000 system on their linear parameters and area]. *Spatial development*. 3. 108-121. doi: 10.32347/2786-7269.2023.3.108-121 [in Ukrainian].

12. Kuangxu W., Sijing Ye., Peichao G., Xiaochuang Y. & Zuliang Z. (2022). Optimization of Numerical Methods for Transforming UTM Plane Coordinates to Lambert Plane Coordinates. *Journals Remote Sensing*. 14 (9). doi: 10.3390/rs14092056

Воронков Олексій Олександрович, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6905-0098>. Тел.: +38(067)276-85-06. E-mail: voronkov.oleksii@kname.edu.ua.

Voronkov Oleksii, PhD (in Economics), Associate Professor, Associate Professor of the department of land administration and geoinformation systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6905-0098>. Тел.: +38(067)276-85-06. E-mail: voronkov.oleksii@kname.edu.ua.

Дата надходження статті 05.03.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY