

## АНОТАЦІЯ

*Кінь Д. О.* Удосконалення методів геодезичних і картометричних обчислень у геоінформаційному середовищі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 193 – «Геодезія та землеустрій» (19 – «Архітектура і будівництво»). – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ. – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладного завдання підвищення точності аналітичних та числових методів геодезичних та картометричних обчислень у геоінформаційному середовищі на основі застосування строгих математичних методів на поверхні референц-еліпсоїда без обмеження кількості членів ряду.

З розвитком комп'ютерних та геоінформаційних технологій користувачі все частіше використовують цифрові моделі місцевості для проектування, виконання досліджень, моніторингу, геопросторового аналізу та прогнозування. До цього моменту всі картометричні та морфометричні характеристики об'єктів визначались на друкованих картах за допомогою графічних та інструментальних методів. Максимальна їх точність не вище 0,1 мм і більше. Щоб визначити довжину або площу територій, які займали більше двох аркушів топографічних карт, треба було передбачати підготовчі роботи, а це зумовлювало додаткові ресурси та витрати. Також слід зазначити, що всі обчислення виконувались наближеними числовими методами, а для їх спрощення використовувались готові таблиці та довідники, що забезпечувало максимальну точність не менше 1 мм. Для вирішення головних геодезичних задач в залежності від довжини лінії між точками використовували різні поверхні математичної моделі Землі (Декартова система координат, проєкції, сфера, еліпсоїд тощо), що впливало на подання цієї лінії (пряма, хорда, геодезична лінія тощо) і на способи рішення геодезичних задач.

Універсальний розв'язок головних геодезичних задач існував, проте він вимагав достатню кількість ітерацій та розкладання біноміального ряду Тейлора на члени 6-ого і вище порядку. Без застосування комп'ютерних технологій це можливий, але дуже трудомісткий процес, що є не ефективним на виробництві.

Сучасний рівень геоінформаційних технологій дозволяє з достатньою швидкістю визначати довжини та площі об'єктів не залежно від їх розміру, перетворювати та трансформувати координати у різні дати та системи координат. Відкритим залишається питання точності цих операцій та застосування математичних моделей Землі, що є проблемним питанням цієї дисертаційної роботи.

Підвищення ефективності управління територіями, ведення державних кадастрів, зокрема Державного земельного кадастру, Державного водного кадастру та Державного лісового кадастру, потребує від геоінформаційних систем точних та достовірних геопросторових даних, визначення картометричних та морфометричних характеристик геопросторових об'єктів з необхідною та достатньою точністю.

Для вивчення та дослідження питання щодо точності геодезичних та картометричних операцій були проаналізовані та систематизовані етапи розвитку методів, за допомогою яких визначались метричні характеристики об'єктів на картах. Визначенні індекси точності та трудомісткості методів обчислення характеризують етапи цього розвитку і відображають процеси зменшення трудомісткості та підвищення точності обчислень, оскільки ці параметри є одними із головних в останніх дослідженнях науковців за цим напрямом. З метою уніфікації та систематизації операцій було створено реєстр геодезичних, картометричних та морфометричних обчислень відповідно до вимог стандарту ISO 19127:2019 Географічна інформація – Геодезичні коди і параметри, а також відповідні паспорти на операції та їх методи. Це дозволяє не залежно від мови програмування реалізувати функції цих обчислень у будь-якій геоінформаційній системі та системі керування базами даних.

Через недостатнє документування стандартних засобів у геоінформаційних системах або взагалі відсутність таких специфікацій було розроблено методику визначення можливостей стандартних засобів ГІС, що дозволило встановити яким чином та за допомогою яких моделей виконуються геодезичні та картометричні операції у комерційних ГІС та з відкритою ліцензією. Одними із основних результатів цього дослідження є створені еталонні моделі, які порівнювались з емпіричними, що дозволило зробити висновок: геоінформаційні системи практично не містять функціоналу для обчислень на референц-еліпсоїді, окрім деяких функцій QGIS.

На основі проаналізованих останніх досліджень було детально розглянуто метод Karney, у якому обґрунтовано та реалізовано використання розширеного ряду Крюгера для вирішення головних геодезичних задач на референц-еліпсоїді. Цей метод ліг в основу картометричних та геодезичних операцій, які були реалізовані у цій дисертаційній роботі. Також слід зазначити, що метод Karney був адаптований для території України, а саме змінено системи відліку, параметри еліпсоїда та додано цикли для визначення довжин за масивами геодезичних координат.

Також були окремо реалізовані функції перетворення плоских координат Гаусса-Крюгера із однієї зони в іншу; перетворення координат Гаусса-Крюгера із однієї зони в іншу зону проєкції UTM; визначення довжин дуг паралелі і меридіана; визначення площі знімальних трапецій аркушів масштабу 1:50000; визначення геодезичної площі з урахуванням редукування на референц-еліпсоїд Красовського за допомогою інтегрування по заданому контуру об'єкта методом Сімпсона.

Запропонована функція визначення довжини водотоку обчислює з точністю 0,0005 мм, що у 1000 разів більше у порівнянні з максимальною точністю інструментальних засобів. У 10000 разів збільшується точність обчислення геодезичної площі за методами Сімпсона і Karney від картографічної похибки  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  на  $1 \text{ м}^2$  до середньоквадратичної похибки обчислення геоінформаційним методом  $5,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  на  $1 \text{ м}^2$ .

*Ключові слова:* геоінформаційні системи, бази геопросторових даних, точність, числові та аналітичні методи, цифрові моделі поверхні, картометрія, моніторинг, строгі математичні методи, референц-еліпсоїд, площа, геодезичний моніторинг, GNSS, координати, геопросторовий аналіз, система координат.

## ABSTRACT

*Kin D. O.* Improvement of methods of geodetic and cartometric calculations in the geoinformation environment – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) on speciality 193 – «Geodesy and Land Management» (19 «Architecture and Construction»). – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv. – Kyiv National University of Construction and Architecture, MES, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to solving the scientific and applied problem of improving the accuracy of analytical and numerical methods of cartometric and geodetic computations in geographic information systems.

As computer and geoinformation technologies develop, users are increasingly using digital models of geospatial objects for design, research, geospatial analysis and forecasting. Until now, all cartometric and morphometric characteristics of objects were determined on an analogue map using graphical and instrumental methods. Their maximum accuracy was 0.1 mm or more.

To determine the length or area of territories that occupied more than two topographic map sheets, preparatory work had to be provided, which meant additional resources and costs. It should also be noted that all calculations were performed using approximate numerical methods, and ready-made tables and reference books were used to simplify them, which ensured a maximum accuracy of at least 1 mm. To solve the main geodetic problems, depending on the length of the line between the points, different surfaces of the mathematical model of the Earth (Cartesian coordinate system, projections, sphere, ellipsoid, etc.) were used, which affected the representation of this line (line, chord, geodetic line, etc.) and the methods of solving geodetic problems.

A universal solution to the main geodetic problems existed, but it required a sufficient number of iterations and the decomposition of the binomial series into terms of the 6th order and higher. Without the use of computer technology, this is

possible, but a very labour-intensive process that is not effective in real-world production.

The current level of geoinformation technologies allows to determine the lengths and areas of objects with sufficient speed, regardless of their size, to convert and transform coordinates into different dates and coordinate systems. The question of the accuracy of these operations and the use of mathematical models of the Earth remains open, which is the problematic issue of this dissertation.

Improving the efficiency of territory management, and maintaining state cadastres, in particular the State Land Cadastre, the State Water Cadastre and the State Forest Cadastre, requires geographic information systems to provide accurate and reliable geospatial data, determine cartometric and morphometric characteristics of geospatial objects with the necessary and sufficient accuracy.

To study and investigate the accuracy of geodetic and cartometric operations, the development of methods for determining metric characteristics on maps was analysed and systematised. The determined indices of rigour of calculation methods characterise the stages of this development and reflect the processes of reducing labour intensity and increasing the accuracy of calculations since these parameters are among the main ones in the latest research in this area.

To unify and systematise operations, a register of geodetic, cartometric and morphometric calculations was created following the requirements of ISO 19127:2019 Geographic information - Geodetic codes and parameters, as well as the relevant passports for operations and their methods. This makes it possible to implement the functions of these calculations in any geographic information system and any geographic information system and database management system.

Due to insufficient documentation of standard tools in geographic information systems or the absence of such specifications, a methodology was developed to determine the capabilities of standard GIS tools, which allowed us to establish how and with what models geodetic and cartographic operations are performed in commercial and open-licensed GIS. One of the main results of this study is the creation of reference models that were compared with the empirical one, which

led to the conclusion that geographic information systems practically do not contain functionality for calculations on the reference ellipsoid, except for some functions of QGIS.

Based on the analysed recent studies, the Karney method was considered in detail, which substantiated and implemented the use of the extended Kruger series for solving the main geodetic problems on the reference ellipsoid. His method formed the basis of the cartometric and geodetic operations implemented in this thesis. It should also be noted that Karney's method was adapted to the territory of Ukraine, namely, the reference systems, ellipsoid parameters, and cycles for determining lengths from arrays of geodetic coordinates were changed.

The following functions were also implemented separately: conversion of flat Gauss-Kruger coordinates from one zone to another; conversion of Gauss-Kruger coordinates from one zone to another UTM projection zone; determination of parallel and meridian arc lengths; determination of the area of map sheets at a scale of 1:50,000; determination of the geodetic area, taking into account the reduction to the Krasovsky reference ellipsoid using integration along the given object contour using the Simpson method.

The proposed function for determining the length of the watercourse calculates with an accuracy of 0.0005 mm, which is 1000 times higher compared to the maximum accuracy of the tools. The accuracy of calculating the geodetic area by the Simpson and Karney methods increases 10,000 times from the cartographic error of  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  per  $1 \text{ m}^2$  to the root mean square error of the geoinformation method of  $5,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$  per  $1 \text{ m}^2$ .

Keywords: geographic information systems, geospatial databases, accuracy, numerical and analytical methods, digital surface models, cartometry, monitoring, rigorous mathematical methods, reference ellipsoid, area, geodetic monitoring, GNSS, coordinates, geospatial analysis, coordinate system.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

*Статті у наукових періодичних виданнях іншої держави, які включено до міжнародних наукометричних баз*

1. Lazorenko-Hevel N., Karpinskyi Yu. & Kin D. (2021). Some peculiarities of creation (updating) of digital topographic maps for the seamless topographic database of the Main State Topographic Map in Ukraine. *Geoingegneria Ambientale e Mineraria*, Anno LVIII, n. 1, p 19-24. DOI: <http://dx.doi.org/10.19199/2021.162.1121-9041.019>.

*Здобувач створив геопросторові дані рамок номенклатурних аркушів топографічних карт масштабу 1:50000 для Системи керування проекту за допомогою GRID-моделі.*

2. Karpinskyi Yu., Lazorenko N., Maksymova Yu., Kin D., Nesterenko O., Zhao H. & Borowczyk J. (2024). Geoinformation Support of the Decision-Making Support System for the Reconstruction of Cultural Heritage Objects. *International Journal of Conservation Science*. 15(1, 2024). 119-128. DOI: [10.36868/IJCS.2024.SI.10](https://doi.org/10.36868/IJCS.2024.SI.10).

*Здобувач обґрунтував необхідність визначення метричних характеристик геопросторових об'єктів культурної спадщини за допомогою строгих математичних методів на референц-еліпсоїді.*

### *Статті у наукових фахових виданнях України*

3. Карпінський Ю. О. Дослідження картометричних операцій в середовищі ГІС / Ю. О. Карпінський, Д. О. Кінь // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. ; головн. ред. М. М. Осетрін. - Київ : КНУБА, 2018. – Вип. 68. – С. 706-711. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/7068> (дата звернення 09.03.2024).



*Здобувачем розроблено еталонні моделі аналітичними методами, проведено оцінку репрезентативності їх масиву, створено функції в середовищі MATLAB, задокументовано сценарій виконання обчислення площ територій на еліпсоїді Красовського. Проведено експеримент у середовищі ArcGIS щодо визначення площ територій за формулами Гаусса на площині без врахування картографічних проєкцій та кривизни Землі.*

4. Лазоренко-Гевель, Н., Карпінський, Ю., Кінь, Д. (2021). Особливості створення (оновлення) цифрових топографічних карт для формування основної державної топографічної карти. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. І (41), с. 113-122. URL: <http://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2021/05/16.pdf> (дата звернення 09.03.2024).

*Здобувач описав особливості створення рамок номенклатурних аркушів топографічних карт масштабу 1:50000 для Системи керування проєкту.*

5. Kin D. & Karpinskyi Yu. (2022). The phenomenon of topological inconsistencies of frames of map sheets during the creation of the Main state topographic map. *ISTCGCAP*. Volume 95. p. 103 – 112. DOI: <http://dx.doi.org/10.23939/istcgcap2022.95.103>.

*Здобувачем проаналізовано феномен виникнення топологічних неузгодженостей рамок суміжних аркушів цифрових топографічних карт масштабу 1:50000 на межах зон проєкцій Гаусса-Крюгера та обґрунтовано доцільність переходу на строгі аналітичні геодезичні методи у геоінформаційному середовищі під час створення бази топографічних даних «Основна державна топографічна карта» шляхом визначення розбіжностей між вершинами рамок номенклатурних аркушів цифрових топографічних карт масштабу 1:50000 на межах зон проєкції (від 1 до 8 мм).*

6. Кінь, Д. (2023). Дослідження реалізації чисельних строгих математичних методів із заданням параметра кількості членів у ряду Тейлора. *Містобудування та територіальне планування* (84), 153–160. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.153-160>.

7. Кінь, Д. (2024). Щодо підвищення точності аналітичних та чисельних методів геодезичних та картометричних операцій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Вип. I (47), 2024. С. 149-160. DOI: [www.doi.org/10.33841/1819-1339-1-47-149-160](http://www.doi.org/10.33841/1819-1339-1-47-149-160)

### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

1. Кінь Д. О. (2024). До питання підвищення точності аналітичних та числових методів геодезичних та картометричних обчислень. Матеріали XXVII Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2024», 10–12 квітня 2024 року – Львів: НУ “Львівська політехніка” – 69-71 с. URL: [http://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2024/04/ТЕЗИ\\_ГЕОФОРУМ\\_2024.pdf](http://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2024/04/ТЕЗИ_ГЕОФОРУМ_2024.pdf)

2. Кінь Д. О. (2023). До питання реалізації строгих математичних методів із заданням параметра кількості членів у ряду Тейлора. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2023», 19–21 квітня 2023 року – Львів: НУ “Львівська політехніка” – 58–60 с. URL: [http://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2023/04/ТЕЗИ\\_ГЕОФОРУМ\\_2023-Відновлено\\_111\\_nove.pdf](http://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2023/04/ТЕЗИ_ГЕОФОРУМ_2023-Відновлено_111_nove.pdf)

3. Кінь Д. О. (2022). Дослідження топологічних неузгодженостей рамок карт при створенні основної державної топографічної карти. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології та досягнення земельного адміністрування та територіального планування»*, Харків, 6 жовтня 2022 р. Харків: ХНУМГ – с. 55.

4. Kin D. & Karpinskyi Yu. Ontology of geodetic, cartometric and morphometric methods in the geoinformation environment // Conference Proceedings, Geoinformatics, May 2021, Volume 2021, p.1 – 6. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.20215521101> DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521101> (дата звернення 18.01.2024).

*Здобувачем створені UML-діаграма концептуальної моделі геодезичних, картометричних і морфометричних обчислень у середовищі геоінформаційної системи, а також їх онтологічна модель.*

5. Kin D. & Karpinskyi Yu. Peculiarities of the method of calculation feature's geodetic area on the reference ellipsoid in GIS. // Conference Proceedings International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020», Dec 2020, Volume 2020, p.1 – 5. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.20205757> DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205757> (дата звернення 18.01.2024).

*Здобувач описав і реалізував алгоритм визначення геодезичної площі методом Сімпсона мовою SQL.*

6. Карпінський Ю. Дослідження переходу від картометричних до аналітичних операцій / Ю. Карпінський, Д. Кінь // Матеріали XXV Міжнародної науково-технічної конференції “Геофорум-2020”, 1-3 квітня 2020 – Львів: НУ “Львівська політехніка” – 134–137 с. DOI: 10.13140/RG.2.2.34353.40806.

*Здобувачем створені UML-діаграми загальної архітектури даних у дослідженні, класів геодезичних та картометричних за функціями, індексів використаних програм. Виконано експерименти у трьох ГІС-продуктах та розроблено алгоритм обчислення площі за методом Сімпсона.*

7. Карпінський Ю.О. Дослідження картометричних операцій в середовищі ГІС/ Карпінський Ю.О., Кінь Д.// Тези доповідей “GEOFORUM’2019”. 24-та Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена професійному святу працівників геології, геодезії і картографії України, 10–12 квітня 2019 р., Львів–Брюховичі–Яворів. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. – С. 14–16. DOI: 10.13140/RG.2.2.14220.74880.

*Здобувач описав гіпотези щодо можливостей стандартних засобів геоінформаційних систем та провів відповідні експерименти. Отримані результати підтвердили необхідність розроблення функцій для визначення метричних характеристик на референс-еліпсоїді.*

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати  
дисертації**

1. Боровий В. О. Технологія координатного перетворення та трансформування при геодезичних та землепорядних роботах / В. О. Боровий, О. В. Зарицький, Д. О. Кінь // Новітні технології. – 2017. – Вип. 2. – С. 15-20. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/novteh\\_2017\\_2\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/novteh_2017_2_4). (дата звернення 18.01.2024).

*Здобувач проаналізував та систематизував параметри Гельмерта для перетворення координат.*

2. Лазоренко Н. Ю., Кінь Д. О. (2019). Методика зведення цифрових топографічних карт масштабу 1: 50 000 для створення Основної державної топографічної карти. *Інженерна геодезія*, (67), 56-66. DOI: <https://doi.org/10.32347/0130-6014.2019.67.56-66> (дата звернення 18.01.2024).

*Здобувач обґрунтував необхідність застосування GRID-моделі рамок номенклатурних аркушів топографічних карт масштабу 1:50000 на референц-еліпсоїді.*