

УДК 004.9:528.9:681.3.06

DOI: <https://doi.org/10.53920/ITS-2025-1;2-3>

Ігор Миколайович БУТКО,

доктор технічних наук, професор,
Заклад вищої освіти «Міжнародний науково-технічний університет
імені академіка Юрія Бугая»
ORCID ID: [0000-0002-2859-0351](https://orcid.org/0000-0002-2859-0351)

Олександр Іванович ГОЛУБЕНКО,

кандидат технічних наук, доцент,
Заклад вищої освіти «Міжнародний науково-технічний університет
імені академіка Юрія Бугая»
ORCID ID: [0000-0002-1776-5160](https://orcid.org/0000-0002-1776-5160)

Олександр Миколайович МАКОВЕЙЧУК,

доктор технічних наук, доцент,
Заклад вищої освіти «Міжнародний науково-технічний університет
імені академіка Юрія Бугая»
ORCID ID: [0000-0003-4425-016X](https://orcid.org/0000-0003-4425-016X)

ІНФОРМАЦІЙНІ СТРУКТУРИ ОБРОБКИ ГЕОПРОСТОРОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

У роботі розглянуто теоретичні та прикладні аспекти обробки геопросторової інформації з використанням сучасних інформаційних структур і математичного апарату теорії категорій. Запропоновано підхід до формалізації моделей, що лежать в основі геоінформаційних систем (ГІС), шляхом виділення типових об'єктів (поверхня, зображення, карта, ознаки, рішення) та визначення морфізмів – допустимих перетворень між ними. Побудовано категорійну модель CAT_GeoIS, яка дозволяє описувати структуру обробки даних від етапу дистанційного зондування до прийняття управлінських рішень. Наведено узагальнену схему функціонування системи, в якій враховано фактори ризику, невизначеності та оновлення моделей прогнозування. Робота закладає теоретичні підвалини для подальшої розробки ефективних програмних рішень у галузі ГІС, екологічного моніторингу, картографії та управління природними ресурсами. Описаний підхід сприяє уніфікації представлення різномірних процесів обробки геоданих і підвищенню гнучкості інтеграції інформаційних технологій.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, геоінформаційні системи, геопросторова інформація, інформаційні структури, теорія категорій.

Ihor BUTKO,

Doctor of technical sciences, professor,
Higher Education Institution «Academician Yuriy Bugay International
Scientific and Technical University»

Oleksandr GOLUBENKO,

Candidate of technical sciences, associate professor,
Higher Education Institution «Academician Yuriy Bugay International
Scientific and Technical University»

Oleksandr MAKOVEICHUK,

Doctor of technical sciences, associate professor,
Higher Education Institution «Academician Yuriy Bugay International
Scientific and Technical University»

INFORMATION STRUCTURES FOR GEOSPATIAL DATA PROCESSING

This paper presents a comprehensive theoretical and practical study of geospatial information processing systems through the lens of modern information structures and the mathematical framework of category theory. The research addresses the increasing need for formalized, reliable models of geo-information structures (GeoIS) capable of supporting effective decision-making under conditions of uncertainty, risk, and large volumes of heterogeneous data.

The study introduces a formal approach that defines five fundamental types of GeoIS objects: surface (TGeoSurface), image (TImage), map (TMap), features (TFeature), and decisions (TDecision). It further describes morphisms — allowable transformations between these objects — that model key stages of Earth observation data processing, such as remote sensing, thematic interpretation, rendering, and decision-making. These morphisms form a category, denoted as CAT_GeoIS, where objects and arrows (morphisms) adhere to the standard axioms of associativity and identity, ensuring mathematical consistency and modularity.

An abstract-to-concrete implementation pathway is discussed, highlighting how declarative structures are translated into executable systems using data structures and algorithms. The paper includes a generalized architecture of a GeoIS-based processing system and emphasizes its potential for integration into national spatial data infrastructures, environmental monitoring, agricultural analysis, and public governance tools.

The proposed approach lays a theoretical foundation for designing advanced software systems for the acquisition, transformation, and semantic interpretation of remote sensing and geospatial data, contributing to the evolution of geoinformatics in both academic and applied domains.

Keywords: *remote sensing, geographic information systems, geospatial information, information structures, category theory.*

Постановка проблеми.

Теоретичним основам використання інформаційних структур обробки геопросторової інформації приділяється значна увага з огляду на їх подальше втілення в практичному напрямку та реальних секторах економіки. Зокрема в роботі [1] розглянуті як фізичні основи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) так і напрямки їх практичної реалізації. В роботах [2], [3] поглиблено розглянуто теоретичні засади як формування зображень дистанційного зондування так і сучасним та перспективним напрямкам практичного застосування результатів обробки геопросторової інформації.

Сьогодні в Україні існує та активно використовується велика кількість геоінформаційних систем різного призначення, які обробляють великі обсяги накопиченої інформації [4], [5]. І цей обсяг постійно збільшується, доповнюється та використовується в нових напрямках реалізації. Багатофакторність та різноманітність використання даних дистанційного зондування розглянута в [6] на прикладі їх застосування в системі державного управління.

Значні обсяги геопросторової інформації, достатньо складні структурно-геометричні форми, різноманітність просторового розташування об'єктів на зображеннях, обов'язковий облік в обчисленні кількісних атрибутів, складності координатної прив'язки та наступного аналізу вимагають глибокого теоретичного дослідження в даному напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Відомо [7], [8], що категорією називається пара, що складається з класу об'єктів $A, B, C, \dots$ і класу морфізмів (стрілок) $f: A \rightarrow B$, $g: B \rightarrow C, \dots$, що зв'язують деякі пари об'єктів, які мають властивість, що для будь-якої пари морфізмів виду $f: A \rightarrow B$, $g: B \rightarrow C$ визначено добуток (композицію морфізмів) $g \circ f$, що є морфізмом $g \circ f: A \rightarrow C$ (див. рис. 1). При цьому:

- добуток є асоціативною операцією – для будь яких морфізмів $f: A \rightarrow B$, $g: B \rightarrow C$, $h: C \rightarrow D$ справедливо, що $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$;
- для кожного об'єкту A існує одиниця – тривіальний морфізм id_A , такий, що $f \circ id_A = id_B \circ f = f$ для $f: A \rightarrow B$ (у літературі для тривіальних морфізмів також використовуються позначення типу 1_A , тобто можемо записувати $f \circ 1_A = 1_B \circ f = f$ для $f: A \rightarrow B$).

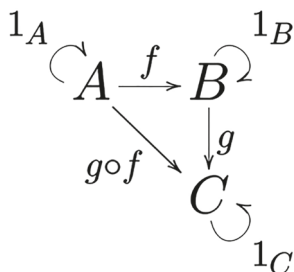


Рис. 1. Схематичне позначення категорії з об'єктами A, B, C , морфізмами $f: A \rightarrow B$, $g: B \rightarrow C$ та тривіальними морфізмами $1_A, 1_B, 1_C$ [9]

Наприклад, клас множин, що розглядаються в якості об'єктів, і клас відображень (іншими словами — функцій) як морфізмів утворюють категорію множин **Set**, якщо під добутком розуміти операцію суперпозиції функцій [10].

У системах обробки геопросторової інформації різного призначення на різних етапах проводиться обробка даних різного типу, які тим не менш, є структурно ізоморфними, будемо далі називати їх — геопросторові інформаційні структури (Geo-Information Structures, GEOIS, GeoIC) [11].

Таким чином, для подальшого розгляду буде зручно ввести категорію **CAT_GeoIS**, об'єкти і морфізми якої було введено вище. При переході від абстрактної GeoIC (яка по суті є декларативною) до конкретної GeoIC (наприклад, «карти»), необхідно імплементувати її структури даних та методи (алгоритми) роботи з ними.

Мета статті полягає в тому, щоб удосконалити теорію обробки геопросторової інформації шляхом формалізації опису технологій на основі методів теорії категорій та розробити надійні моделі геоінформаційних структур для ефективної роботи систем в умовах ризику та для підтримки управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Теоретичні основи використання GeoIC будемо розглядати у вигляді сукупності моделей, методів та інформаційних технологій використання GeoIC з урахуванням вимог до GeoIC та критеріїв оцінки якості GeoIC, які певним чином пов'язані між собою і реалізують прийоми, способи і методи, що забезпечують використання GeoIC (рис. 2).

У процесі дистанційного зондування Землі зображення зі сканера поступає до системи обробки, проводиться сегментація та аналіз зображень для визначення заданих показників. Далі за допомогою прогностичної моделі проводиться прогнозування показників і на основі їх порівняння з цільовими показниками генеруються необхідні управлінські рішення. При цьому оновлюються параметри прогностичної моделі.

Мета	Розробка моделей та методів використання геопросторових інформаційних структур									
Вимоги	Вимога інформативності	Вимога універсальності	Вимога оперативності	Вимога точності	Вимога об'єктивності	Вимога прогнозованої спроможності	Вимога криптостійкості			
Моделі	Модель формування видових зображень	Модель тематичної інтерпретації видових зображень	Модель прогнозування геопросторових даних	Модель прийняття управлінських рішень			Модель прийняття управлінських рішень			
Методи	Метод семантичної сегментації видових зображень за допомогою згортокних мереж глибокого навчання			Метод прийняття управлінських рішень в умовах ризику та невизначеності						
Критерії оцінки якості	Якість прогнозування даних			Якість семантичної сегментації			Якість геоприв'язки			Якість прийняття рішення
	Середньоквадратичне відхилення прогнозованих і реальних даних	Різниця між прогнозом і реальними даними на наступний рік	Global Accuracy	Mean Accuracy	Mean IoU	Weighted IoU	Mean BScore	Об'єктивність критерію вибору оптимального рішення	Селективність критерію вибору оптимального рішення	
Інформаційна технологія	Інформаційна технологія використання геопросторових інформаційних структур									
	Перетворення геопросторових інформаційних структур			Імітаційне моделювання перетворення інформації у системах обробки геопросторової інформації				Використання геопросторових інформаційних структур		

Рис. 2. Теоретичні основи використання геопросторових інформаційних структур

Аналізуючи узагальнену схему системи обробки геопросторової інформації (рис. 3), можна виділити основні геопросторові інформаційні структури, що використовуються:

1) «поверхня» – тип TGeoSurface, представляє собою множину точок поверхні Землі, що задані своїми гео-координатами (географічна довгота і широта, висота над рівнем моря);

2) «зображення» – тип TImage, множина точок, кожна з яких є вектором інтенсивності в різних спектральних діапазонах, точки задаються у прямокутній системі координат зображення (задача геоприв'язки);

3) «карта» (результат тематичної інтерпретації) – тип TMap, множина точок, кожна з яких є вектором геоознак (тип поверхні, зонування тощо), точки задаються геокоординатами;

4) «ознаки» – тип TFeature, множина ознак (площа, індекс вегетації тощо);

5) «рішення» – тип TDecision, множина управлінських рішень.

Надалі, ці GeoIC будемо називати об'єктами, а можливі дії, при яких проводяться перетворення об'єктів – морфізмами. Суть цієї термінології буде зрозумілою з подальшого викладу.

Для введених вище об'єктів можливі такі морфізми, що дозволяють отримувати з одного об'єкту інший (перетворення типів):

1) тотожні перетворення:

Id_{TGeoSurface}: TGeoSurface -> TGeoSurface;

Id_{TImage}: TImage -> TImage;

Id_{TMap}: TMap -> TMap;

Id_{TFeature}: TFeature -> TFeature;

Id_{TDecision}: TDecision -> TDecision.

2) дистанційне зондування поверхні:

MRemoteSensing: TGeoSurface -> TImage;

3) тематична інтерпретація:

MInterpreting: TImage -> TMap;

4) рендеринг:

MRendering: TMap -> TImage;

5) обробка:

MProcessing: TImage -> TFeature;

6) виділення ознак:

MExtraction: TMap -> TFeature;

7) прийняття управлінських рішень:

MAnalyzing: TFeature -> TDecision

8) діяльність:

MAction: TDecision -> TGeoSurface;

- 9) районування:
MZoning: TDecision -> TMap;
- 10) вибір ознак:
MSelection: TDecision -> TFeature;
- 11) вибір параметрів ДЗЗ:
MAuth: TDecision -> TImage.

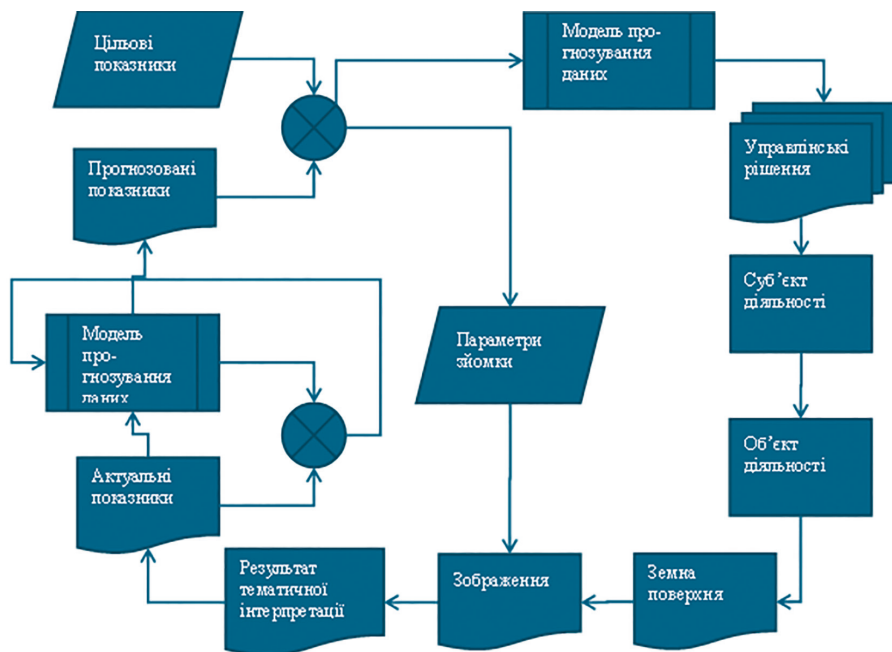


Рис. 3. Узагальнена схема системи обробки геопросторової інформації [11]

Введені об'єкти та морфізми схематично наведено на рис. 4.

Отже, для вирішення проблеми подання різномірних технологій програмної інженерії в єдиній формі, зручній для їх інтеграції та координації в рамках загального циклу проектування програмних систем зручно використовувати математичний апарат теорії категорій, на базі якого можна будувати універсальні теоретико-категорійні семантичні моделі цих технологій [11], [12].

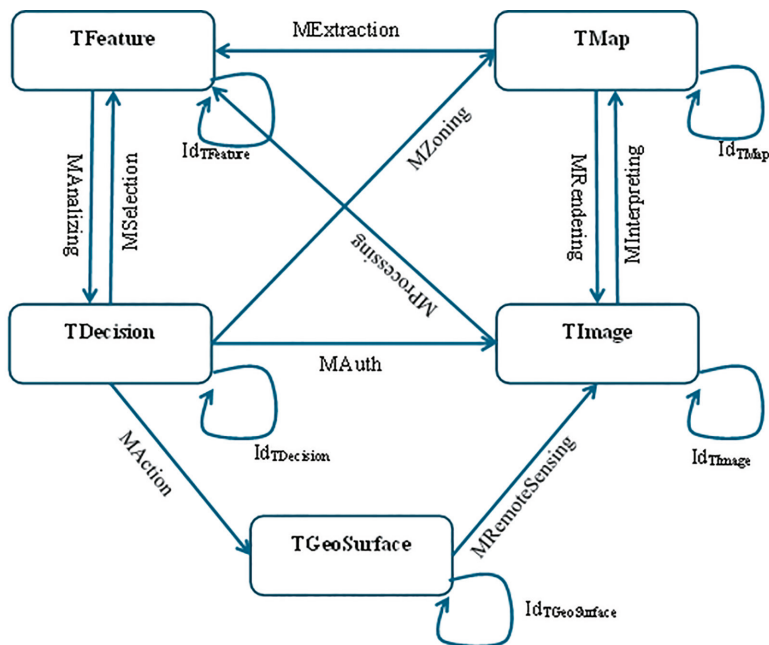


Рис. 4. Основні об'єкти та морфізми системи обробки геопросторової інформації

Висновки та пропозиції. У роботі представлено узагальнений підхід до опису та обробки геопросторової інформації на основі формалізованої моделі геопросторових інформаційних структур (GeoIS), що охоплює всі основні етапи — від збору даних до прийняття управлінських рішень. Запропоновано типізацію GeoIS, введено відповідні морфізми та побудовано категорійну модель CAT_GeoIS, яка дозволяє формально описувати перетворення між об'єктами, а також забезпечує цілісність і несуперечливість процесів аналізу й обробки геопросторових даних.

Використання апарату теорії категорій дозволяє уніфікувати різноманітні процеси та інформаційні структури, що сприяє підвищенню надійності, масштабованості й ефективності систем обробки геопросторової інформації, особливо в умовах ризику та невизначеності. Запропонований підхід створює основу для подальшого розвитку інтелектуальних геоінформаційних систем із вбудованими механізмами прогнозування та прийняття рішень. У перспективі це дозволить формалізувати інтеграцію нових дже-

рел даних, підвищити рівень автоматизації та забезпечити адаптивність систем до змін середовища.

Результати дослідження можуть бути використані як теоретична база при проектуванні нових архітектур геоінформаційних систем і у навчальному процесі для підготовки фахівців у галузі інформаційних технологій, геоінформатики та управління.

© Бутко І.М., Голубенко О.І., Маковейчук О.М., 2025

ЛІТЕРАТУРА

1. Довгий С. О., Лялько В. І., Бабійчук С. М., Кучма Т. Л., Томченко О. В., Юрків Л. Я. Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування: навчальний посібник. Київ : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. – 315 с.
2. Кохан С. С., Востоков А. Б. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи : підручник. Київ : Вища школа, 2009. 511 с.
3. Аерокосмічні методи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ecology.udau.edu.ua/assets/files/024.pdf> (дата звернення: 30.04.2025).
4. Карпінський Ю., Лященко А. Геоінформаційні технології: нові парадигми і нові ризики топографо-геодезичної та картографічної діяльності // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2011. Вип. II (22). С. 43–48.
5. Бутко І. М. Використання даних геопросторового моніторингу для прийняття управлінських рішень // *Ukraine – EU. Modern Technology, Business and Law: collection of international scientific papers : in 2 parts. Part 1. Modern Priorities of Economics. Societal Challenges*, April 03–08, 2017 : thesis of reports. Чернівці, 2017. С. 87–89.
6. Бутко І. М., Мамарев В. М., Ожінський В. В., Харченко С. П. Інформація дистанційного зондування Землі в системі державного управління: сучасний стан та перспективи // *Космічна наука і технологія*. 2017. № 2. С. 21–30.
7. Adamek J., Herrlich H., Strecker G. *Abstract and Concrete Categories*. – New York : Wiley and Sons, 1990. 496 с.
8. Milewski B. Category Theory for Programmers: The Preface [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bartoszmilewski.com/2014/10/28/category-theory-for-programmers-the-preface/> (дата звернення: 30.04.2025).
9. PNGwing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pngwing.com/en/free-png-ktozl> (дата звернення: 16.06.2025).
10. Blass, A. The interaction between category theory and set theory // *Contemporary Mathematics*. 1984. № 30.
11. Бутко І. М. Формалізація технології використання геопросторових структур в системах обробки геопросторової інформації / І. М. Бутко // *Сучасні наукові дослідження і інновації*. 2020. № 7 (45). С. 56–63. – Режим доступу: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/2201> (дата звернення: 16.06.2025).

12. Burrough P. A., McDonnell R. A. Principles of Geographical Information Systems. – Oxford : Oxford University Press, 1998. 333 c.

REFERENCES

1. Dovhyi S. O., Lialko V. I., Babyichuk S. M., Kuchma T. L., Tomchenko O. V., Yurkiw L. Ya. Fundamentals of Earth Remote Sensing: History and Practical Application: Textbook. – Kyiv: Institute of Gifted Child of NAPS of Ukraine, 2019. 315 p.
2. Kokhan S. S., Vostokov A. B. Earth Remote Sensing: Theoretical Foundations: Textbook. – Kyiv: Higher School, 2009. 511 p.
3. Aerospace Methods [Electronic resource]. – Access mode: <http://ecology.udau.edu.ua/assets/files/024.pdf> (accessed: 30.04.2025).
4. Karpinsky Yu., Liashenko A. Geoinformation Technologies: New Paradigms and New Risks of Topographic-Geodetic and Cartographic Activities // *Modern Achievements of Geodetic Science and Production*. 2011. Issue II (22). P. 43–48.
5. Butko I. M. Use of Geospatial Monitoring Data for Management Decision Making // Ukraine – EU. Modern Technology, Business and Law: Collection of International Scientific Papers: in 2 parts. Part 1. *Modern Priorities of Economics. Societal Challenges*, April 03–08, 2017: Thesis of Reports. Chernihiv, 2017. P. 87–89.
6. Butko I. M., Mamaryev V. M., Ozhinsky V. V., Kharchenko S. P. Remote Sensing Information in the State Management System: Current Status and Prospects // *Space Science and Technology*. 2017. No. 2. P. 21–30.
7. Adamek J., Herrlich H., Strecker G. Abstract and Concrete Categories. – New York: Wiley and Sons, 1990. 496 p.
8. Milewski B. Category Theory for Programmers: The Preface [Electronic resource]. – Access mode: <https://bartoszmilewski.com/2014/10/28/category-theory-for-programmers-the-preface/> (accessed: 30.04.2025).
9. PNGwing [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.pngwing.com/en/free-png-ktozl> (accessed: 16.06.2025).
10. Blass A. The Interaction between Category Theory and Set Theory // *Contemporary Mathematics*. 1984. No. 30.
11. Butko I. M. Formalization of the Technology of Using Geospatial Structures in Geospatial Information Processing Systems / I. M. Butko // *Modern Scientific Research and Innovations*. 2020. No. 7 (45). P. 56–63. – Access mode: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/2201> (accessed: 16.06.2025).
12. Burrough P. A., McDonnell R. A. Principles of Geographical Information Systems. – Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.

СТАТТЯ НАДІЙШЛА ДО РЕДАКЦІЇ 01.10.2025