

УДК 004.4

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).13](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).13)APPLICATION OF PRINCIPLES OF OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING
LANGUAGES FOR SIMULATION OF CELL DIVISIONЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПІВ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНИХ МОВ
ПРОГРАМУВАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ КЛІТИННОГО ПОДІЛУ**Oksana P. Koshova**

koshovao111@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0794-6774

Yuriy F. Oleksiichuk

olexiichuk@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0585-3307

Artem V. Oborozhnyy

artemq5@gmail.com

ORCID: 0009-0008-1372-9454

Oksana O. Chernenko

oksanachernenko7@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9084-0999

О. П. Кошова,

канд. пед. наук, доц.

Ю. Ф. Олексійчук,

канд. фіз.-мат. наук, доц.

А. В. Оборозний,

здобувач освіти

О. О. Черненко,

канд. фіз.-мат. наук, доц.

*Poltava University of economics and trade, Poltava**Полтавський університет економіки та торгівлі, м. Полтава*

Abstract. Modern biology and medicine require more and more accurate and detailed models of cellular processes. Modeling cell division is critical to understanding phenomena such as tumor growth, tissue regeneration, and organismal development. Object-oriented programming languages allow you to create models that are easy to understand, modular and flexible. This facilitates rapid development and modification of models without the need to completely rewrite the code, which is especially important for scientific research. *The purpose* of the study is to model cell division by means of object-oriented programming languages. *Method.* The research uses methods of object-oriented programming languages, the program code is written in Kotlin. *The results.* A model of cell division has been created that covers the key stages of the process. The use of object-oriented principles made it possible to structure the model in such a way that each component of the cell and stage of division was represented by a separate class. Thanks to the principles of encapsulation, all elements and processes of the model have been separated into separate modules, which makes their modification and reuse much easier. This contributes to the improvement of the quality and reliability of the software used for simulation. The use of inheritance and polymorphism made it possible to create a hierarchy of classes, which provides convenient extensibility of the model. This makes it easy to add new cell types and processes without having to change the existing code structure. *The novelty of the work.* The work demonstrates a new way of using the principles of object-oriented programming for modeling complex biological processes, in particular, cell division. This is an important step in the development of the methodology of bioinformatics and computer biology. *Practical significance.* The work is relevant from both a scientific and a practical point of view, contributing to the development of new methods of studying cellular processes and the integration of biological knowledge with modern information technologies. It has significant value for education, as it demonstrates an example of using modern programming methods to solve complex scientific problems. This can contribute to the training of new generations of scientists and programmers who have the necessary knowledge and skills to work in the field of bioinformatics and systems biology. **Key words:** cell division; model; OPP; Kotlin; abstraction.

Анотація. Сучасна біологія та медицина потребують все більш точних та детальних моделей клітинних процесів. Моделювання клітинного поділу є критично важливим для розуміння таких явищ, як ріст пухлин, регенерація тканин та розвиток організму. Об'єктно-орієнтовані мови програмування дозволяють створювати моделі, що є легко зрозумілими, модульними та гнучкими. Це сприяє швидкому розвитку та модифікації моделей без необхідності повного переписування коду, що є особливо важливим для наукових досліджень. *Мета дослідження* полягає в моделюванні клітинного поділу засобами об'єктно-орієнтованих мов програмування.

Методика. В дослідженнях використані методи об'єктно-орієнтованих мов програмування, код програми написаний на Kotlin. *Результати.* Створено модель клітинного поділу, яка охоплює ключові етапи процесу. Використання об'єктно-орієнтованих принципів дозволило структурувати модель таким чином, щоб кожен компонент клітини та етап поділу був представлений окремим класом. Завдяки принципам інкапсуляції, всі елементи та процеси моделі були розділені на окремі модулі, що значно полегшує їх модифікацію та повторне використання. Це сприяє підвищенню якості та надійності програмного забезпечення, що використовується для моделювання. Застосування наслідування та поліморфізму дозволило створити ієрархію класів, що забезпечує зручну розширюваність моделі. Це дозволяє легко додавати нові типи клітин та процеси без необхідності змінювати існуючу структуру коду. *Новизна роботи.* Робота демонструє новий спосіб використання принципів об'єктно-орієнтованого програмування для моделювання складних біологічних процесів, зокрема клітинного поділу. Це є важливим кроком у розвитку методології біоінформатики та комп'ютерної біології. *Практична значимість.* Робота є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору, сприяючи розвитку нових методів дослідження клітинних процесів та інтеграції біологічних знань з сучасними інформаційними технологіями. Має значну цінність для освіти, оскільки демонструє приклад використання сучасних методів програмування для вирішення складних наукових задач. Це може сприяти підготовці нових поколінь науковців та програмістів, що володіють необхідними знаннями та навичками для роботи у сфері біоінформатики та системної біології.

Ключові слова: клітинний поділ; модель; ООП; Kotlin; абстракція.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Перші мови програмування, що дозволяли описувати об'єкти та працювати з ними, були створені ще в 60-тих роках XX століття [1-3]. Прикладами таких мов можна вважати Simula (назва є скороченням від SIMULATION Language – мова симуляції), що базувалася на мові Algol [1], та її новішу версію – Simula 67 [3]. Хоча в Simula 67 використовуються поняття об'єкта, класу, підкласу, успадкування тощо, питання про те, є ці мови об'єктно-орієнтованими чи просто об'єктними розширеннями мови Algol, залишається дискусійним. Але ці мови мали значний вплив на об'єктно-орієнтовані мови, що з'явилися пізніше: C++, Java, Object Pascal, C# та інші [4].

Об'єктно-орієнтований підхід в програмуванні став домінуючим наприкінці минулого століття і залишається таким до сьогодні. Ріст популярності об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) пов'язаний в першу чергу з такими мовами, як Smalltalk [5], C++ [6], Java [7-8], Object Pascal/Delphi [9].

Об'єктно-орієнтоване моделювання (OOM) – підхід, згідно якого ситуація, що моделюється, описується з допомогою об'єктів та взаємозв'язків між ними. Об'єкти в моделі описують об'єкти з реального світу, що дозволяє створювати інтуїтивно зрозумілі моделі. В освітньому процесі OOM використовується при викладанні програмування та інших предметів [10-11], для управління навчальним процесом загалом [12], для виявлення запозичень в тексті [13]. Також OOM застосовується при моделюванні в бухгалтерському обліку [14], в будівництві та архітектурі [15], в географії [16], в системному аналізі мереж [17], в гідрогеології ґрунтових вод [18], в оптовому ринку електроенергії [19], в біології [20-24] та інших сферах науки.

Моделюванню поділу клітин присвячена значна кількість праць [25-29], але підходу, що застосований в даній роботі, не було знайдено. Застосування OOM

та ООП до поділу клітин дозволяє зробити модель простою та інтуїтивно зрозумілою. Це дозволяє використовувати результати в навчальному процесі для школярів та студентів. Також створена програма може бути розширена при моделюванні більш складних біологічних систем. Це робить тему актуальною.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для опису та моделювання біологічних процесів використовуються різні підходи, один із них об'єктно-орієнтований. В [20] описується об'єктно-орієнтоване програмування у термінах, пов'язаних із моделюванням біологічних систем. Розглядаються основні принципи ООП: успадкування, інкапсуляція, поліморфізм, абстрагування на прикладах біологічних систем. Також описується можливість використовувати об'єктний підхід для побудови моделей рослин. Робота [21] присвячена використанню OOM в молекулярній біології. В [22] розглядаються математичні можливості для моделювання різних біологічних мереж: регуляції генів, взаємодії білків, філогенетичних, передачі сигналів, метаболічних, екологічних тощо, в тому числі з використанням об'єктно-орієнтованого підходу. В [23] представлені оцінки впливу кількох гіпотетичних розливів нафти в Баренцевому морі на популяції кільчастої тюленя та білого ведмеда, згенеровані програмою, що реалізує об'єктно-орієнтовану модель. Змінюючи дату виділення масла та швидкість міграції тварин, генеруються різні дані про вплив. В [24] складну біологічну систему (SARS-CoV) було змодельовано та представлено як об'єктно-орієнтовану програмну систему, використовуючи в тому числі UML. Зокрема відзначається, що подібність між біологічними та об'єктно-орієнтованими програмними системами на рівні організації системи вказує на те, що можна представляти одне іншим. Тому до інтеграції біологічної інформації на системному рівні можна підійти шляхом зворотного проектування біологічної системи

в об'єктно-орієнтовану архітектуру програмного забезпечення. Дотримання чітко визначеного процесу розробки програмного забезпечення для зворотного проектування біологічної системи дає значні переваги.

Отже, проведений аналіз публікацій показує, що ООМ та ООП може бути застосованим для моделювання поділу клітини.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Моделюванню поділу клітин присвячена значна кількість праць [25-29], але підходу, що застосований в даній роботі, не було знайдено. Застосування ООМ та ООП до поділу клітин дозволяє зробити модель простою та інтуїтивно зрозумілою. Це дозволяє використовувати результати в навчальному процесі для школярів та студентів. Також створена програма може бути розширена при моделюванні більш складних біологічних систем. Це робить тему актуальною.

Мета дослідження – застосувати принципи об'єктно-орієнтованих мов програмування (ООМП) для моделювання клітинного поділу.

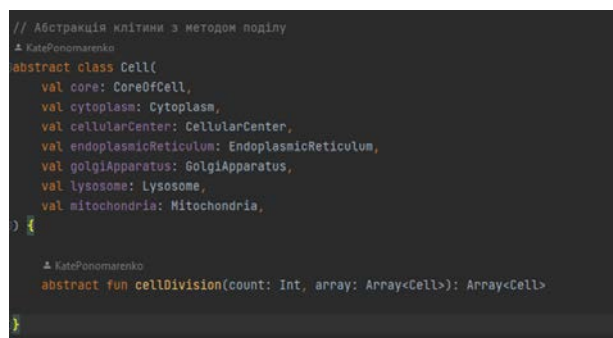
Об'єктом дослідження є моделювання процесів біологічних систем.

Предметом розробки є моделювання поділу клітини.

Методами розробки є методи ООМП з використанням мови програмування Kotlin.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Метою розробки було представлення моделі клітини з реалізацією ділення у парадигмі об'єктно орієнтованого програмування. Для виконання поставленої задачі було використано мову програмування Kotlin для реалізації абстракції клітини (рис. 1).



```
// Абстракція клітини з методом поділу
// KatePonomarenko
abstract class Cell {
    val core: CoreOfCell,
    val cytoplasm: Cytoplasm,
    val cellularCenter: CellularCenter,
    val endoplasmicReticulum: EndoplasmicReticulum,
    val golgiApparatus: GolgiApparatus,
    val lysosome: Lysosome,
    val mitochondria: Mitochondria,
}

// KatePonomarenko
abstract fun cellDivision(count: Int, array: Array<Cell>): Array<Cell>
```

Рис. 1. Реалізація абстракції клітини

Абстракція містить основні компоненти клітини та метод поділу, який надалі будемо реалізовувати у вигляді геометричної прогресії.

Реалізація методу ділення клітини представлена на рис. 2.

Для цього використовуємо геометричну прогресію із записом у новостворений масив, щоб зручно отримати всі утворені клітини. Створення нової відбувається шляхом передачі всіх параметрів

з батьківської до нової, тобто принцип генетичної спадковості клітини реалізований шляхом наслідування від супер класу, а саме батьківської клітини.



```
override fun cellDivision(count: Int, array: Array<Cell>): Array<Cell> {
    if (count >= 1) {
        val newArray = mutableListOf<Cell>()

        array.forEach { @:Cell
            newArray.add(it)
            newArray.add(CellImpl(it))
        }

        return cellDivision(count - 1, newArray.toArray())
    }

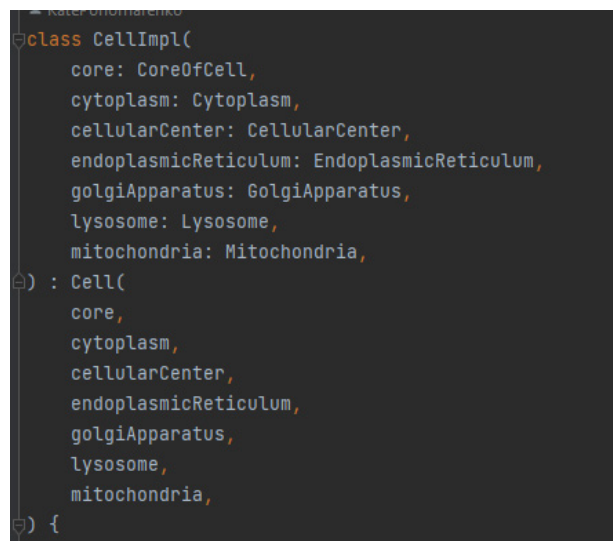
    return array
}
```

Рис. 2. Реалізація методу ділення клітини

Розглянемо роботу програми. Код програми складається з таких компонентів:

Абстрактний клас Cell, який містить основні складові клітини, такі як ядро, цитоплазма, клітинний центр, ендоплазматична сітка, апарат Гольджі, лізосоми та мітохондрії. Він також містить абстрактний метод cellDivision, який відповідає за ділення клітини.

Клас CellImpl (рис. 3), який успадковує від абстрактного класу Cell. Він реалізує метод cellDivision, який дозволяє клітині ділитися задану кількість разів, повертаючи масив нових клітин.



```
class CellImpl(
    core: CoreOfCell,
    cytoplasm: Cytoplasm,
    cellularCenter: CellularCenter,
    endoplasmicReticulum: EndoplasmicReticulum,
    golgiApparatus: GolgiApparatus,
    lysosome: Lysosome,
    mitochondria: Mitochondria,
) : Cell {
    core,
    cytoplasm,
    cellularCenter,
    endoplasmicReticulum,
    golgiApparatus,
    lysosome,
    mitochondria,
} {
```

Рис. 3. Клас CellImpl реалізує складові абстрактного класу Cell

Функція main, яка використовує клас CellImpl для створення прикладу клітини, отримує від користувача число разів, скільки необхідно провести ділення клітини, та виконує ділення за допомогою методу cellDivision.

Спочатку створюємо екземпляр клітини за допомогою класу CellImpl, передавши у конструктор основні складові клітини. Конструктор CellImpl

REFERENCES

- [1] Dahl, Ole-Johan, and Kristen Nygaard. (1966). SIMULA: an ALGOL-based simulation language. *Communications of the ACM* 9, no. 9, pp. 671–678.
- [2] Dahl, O.-J., and Nygaard, K. (1967). Class and Subclass Declarations, in *Simulation Programming Languages* (ed. J. N. Buxton), 158–174. Amsterdam: North Holland.
- [3] Ichbiah, Jean D., and Stephen P. Morse (1974). General concepts of the simula 67 programming language. In *International Tracts in Computer Science and Technology and Their Application*, vol. 7, pp. 65–93. Elsevier.
- [4] Wong, William. Before C. (2017). What Did You Use? Electronic Design.
- [5] Goldstein, Ira P., and Daniel G. Bobrow (1980). Extending object oriented programming in Smalltalk. In *Proceedings of the 1980 ACM Conference on LISP and Functional Programming*, pp. 75–81.
- [6] Wiener, Richard S., and Lewis J. Pinson (1988). An introduction to object-oriented programming and C++. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.,.
- [7] Gosling, James. The feel of Java. *Computer* 30, no. 6, pp. 53–57.
- [8] Gosling, James. (2000). The Java language specification. Addison-Wesley Professional.
- [9] Wiener, Richard S., and Claude Wiatrowski (1998). Visual object-oriented programming using Delphi. SIGS Publications, Inc.
- [10] Teplytskyi O. I. (2012). Obiektno-orientovane modeliuвання yak tekhnolohiia doslidzhennia skladnykh system ta yak navchalna dystsyplina [Object-oriented modeling as a technology for the study of complex systems and as an educational discipline]. *Kompiuterne modeliuвання v osviti: materialy V Vseukrainskoho naukovo-metodychnoho seminaru – Computer modeling in education: materials of the 5th All-Ukrainian scientific and methodological seminar*. (Kryvyi Rih, April 6, 2012). Kryvyi Rih: Publishing Department of the NMetAU. pp. 41–46.
- [11] Linnik O. P., Moiseienko N. V., Yevtieiev V. M., Teplytskyi I. O., Semerikov S. O. (2006). Obiektno-orientovane modeliuвання u pidhotovtsi maibutnykh uchyteliv fizyky. [Object-oriented modeling in the training of future physics teachers]. *Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohienka. Seriiia pedahohichna – Collection of scientific works of Kamianets-Podilskiy National University named after Ivan Ohienko. Pedagogical series*. 12, pp. 127–130.
- [12] Stetsenko I. V. (2011). Imitatsiine modeliuвання systemy upravlinnia navchalnym protsesom VNZ z vykorystanniam obiektno-orientovanoho pidkhodu. [Simulation modeling of the educational process management system of universities using an object-oriented approach.] *Matematychni mashyny i systemy –Mathematical machines and systems*, №2, pp. 162–170.
- [13] Kuropiatnyk O. S. (2019). Konstruktyvne ta obiektno-orientovane modeliuвання tekstiv dlia vyiavlennia zapozychen. [Constructive and object-oriented modeling of texts for the detection of borrowings]. *Systemni tekhnolohii –System technologies*. №4(123). pp. 34–47.
- [14] Kulikova N. T. (2014). Obiektno-orientovane modeliuвання v bukhhalterskomu obliku: poniattia obiektu. [Object-oriented modeling in accounting: the concept of an object]. *Efektivna ekonomika – Efficient economy*, №1.
- [15] Honcharenko T. A. (2019). Obiektno-orientovane modeliuвання prostorovykh obiektiv heneralnoho planuvannya. [Object-oriented modeling of spatial objects of general planning]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system : zb. nauk. prats. Kyiv: nats. un-t bud-va i arkhitektury – Management of the development of complex systems: coll. of science works Kyiv. national University of Construction and Architecture*; Goal. ed. Lizunov P. P. Kyiv: KNUBA. No. 38. pp. 64 – 70.
- [16] Egenhofer, Max J., and A. Frank (1989). Object-oriented modeling in GIS: inheritance and propagation. In *Proc. Auto-Carto*, vol. 9, pp. 588–598.
- [17] Sharma, Neetesh, and Paolo Gardoni. (2022). Mathematical modeling of interdependent infrastructure: An object-oriented approach for generalized network-system analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 217, no. 5.
- [18] Steward, David R., Jeffrey M. Peterson, Xiaoying Yang, Tom Bulatewicz, Mauricio Herrera-Rodriguez, Dazhi Mao, and Nathan Hendricks. (2009). Groundwater economics: An object-oriented foundation for integrated studies of irrigated agricultural systems. *Water Resources Research* 45, no. 5.
- [19] Kyrylenko O. V., Blinov I. V., Popovych V. I., Olefir D. O. (2011). Metodolohiia obiektno orientovanoho modeliuвання dlia opysu funktsionuvannya konkurentnoho optovoho rynku elektrychnoi enerhii. [Methodology of object-oriented modeling to describe the functioning of the competitive wholesale electric energy market]. *Problemy zahalnoi enerhetyky - Problems of general energy*, vol. 1, pp. 5–10.
- [20] Sequeira, R. A., R. L. Olson, and J. M. McKinion (1997). Implementing generic, object-oriented models in biology. *Ecological Modelling* 94, no. 1, pp. 17–31.
- [21] Dorkeld, F., G. Perrière, and C. Gautier (1993). Object-oriented modelling in molecular biology. *Proceedings of the Artificial Intelligence and Genome WorkshoI*, JCAI, pp. 99–106.
- [22] Janowski, Sebastian Jan, Barbara Kaltschmidt, and Christian Kaltschmidt (2013). Biological network modeling and analysis. In *Approaches in Integrative Bioinformatics: Towards the Virtual Cell*, pp. 203–244. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [23] Downing, K. and Reed, M. (1996). Object-oriented migration modelling for biological impact assessment. *Ecological modelling*, 93(1-3), pp.203–219.
- [24] Shegogue, Daniel, and W. Jim Zheng. (2005). Object-oriented biological system integration: a SARS coronavirus example. *Bioinformatics* 21, no. 10, pp. 2502–2509.

- [25] Oegema, Karen, and Tony Hyman (2006). Cell division. *WormBook: The Online Review of C. elegans Biology* [Internet].
- [26] Droop, Alastair, Philip Garnett, Fiona AC Polack, and Susan Stepney (2011). Multiple model simulation: modelling cell division and differentiation in the prostate. In *Proceedings of the 2011 Workshop on Complex Systems Modelling and Simulation*, Paris, France, pp. 79–111.
- [27] Ransom, Robert, and Raymond J. Matela. (1984). Computer modelling of cell division during development using a topological approach. *Development* 83, no. Supplement, pp. 233–259.
- [28] Mishra, Prashant, and David C. Chan. (2014). Mitochondrial dynamics and inheritance during cell division, development and disease. *Nature reviews Molecular cell biology* 15, no. 10, pp. 634–646.
- [29] Tomasetti, Cristian, Lu Li, and Bert Vogelstein. (2017). Stem cell divisions, somatic mutations, cancer etiology, and cancer prevention. *Science* 355, no. 6331, pp. 1330–1334.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Dahl, Ole-Johan, and Kristen Nygaard. (1966). SIMULA: an ALGOL-based simulation language. *Communications of the ACM* 9, no. 9, pp. 671–678.
- [2] Dahl, O.-J., and Nygaard, K. (1967). Class and Subclass Declarations, in *Simulation Programming Languages* (ed. J. N. Buxton), 158–174. Amsterdam: North Holland.
- [3] Ichbiah, Jean D., and Stephen P. Morse (1974). General concepts of the simula 67 programming language. In *International Tracts in Computer Science and Technology and Their Application*, vol. 7, pp. 65–93. Elsevier.
- [4] Wong, William. Before C. (2017). What Did You Use? Electronic Design.
- [5] Goldstein, Ira P., and Daniel G. Bobrow (1980). Extending object oriented programming in Smalltalk. In *Proceedings of the 1980 ACM Conference on LISP and Functional Programming*, pp. 75–81.
- [6] Wiener, Richard S., and Lewis J. Pinson (1988). An introduction to object-oriented programming and C++. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.,.
- [7] Gosling, James. The feel of Java. *Computer* 30, no. 6, pp. 53–57.
- [8] Gosling, James. (2000). The Java language specification. Addison-Wesley Professional.
- [9] Wiener, Richard S., and Claude Wiatrowski (1998). Visual object-oriented programming using Delphi. SIGS Publications, Inc.
- [10] Теплицький О. І. (2012). Об'єктно-орієнтоване моделювання як технологія дослідження складних систем та як навчальна дисципліна. *Комп'ютерне моделювання в освіті: матеріали V Всеукраїнського науково-методичного семінару* (Кривий Ріг, 6 квітня 2012 р.). Кривий Ріг: Видавничий відділ НМетАУ. С. 41–46.
- [11] Ліннік О. П., Моїсєнко Н. В., Євтєєв В. М., Теплицький І. О., Семеріков С. О. (2006). Об'єктно-орієнтоване моделювання у підготовці майбутніх учителів фізики. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка*. Серія педагогічна 12, С. 127–130.
- [12] Стеценко І. В. (2011). Імітаційне моделювання системи управління навчальним процесом ВНЗ з використанням об'єктно-орієнтованого підходу. *Математичні машини і системи*, №2, С. 162–170.
- [13] Куроп'ятник О. С. (2019). Конструктивне та об'єктно-орієнтоване моделювання текстів для виявлення запозичень. *Системні технології*, №4(123). С. 34–47.
- [14] Кулікова Н. Т. (2014). Об'єктно-орієнтоване моделювання в бухгалтерському обліку: поняття об'єкту. *Ефективна економіка*, №1.
- [15] Гончаренко Т. А. (2019). Об'єктно-орієнтоване моделювання просторових об'єктів генерального планування. *Управління розвитком складних систем : зб. наук. праць. Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури* ; гол. ред. Лізунов П. П. Київ : КНУБА. № 38. С. 64 – 70.
- [16] Egenhofer, Max J., and A. Frank (1989). Object-oriented modeling in GIS: inheritance and propagation. In *Proc. Auto-Carto*, vol. 9, pp. 588–598.
- [17] Sharma, Neetesh, and Paolo Gardoni. (2022). Mathematical modeling of interdependent infrastructure: An object-oriented approach for generalized network-system analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 217, no. 5.
- [18] Steward, David R., Jeffrey M. Peterson, Xiaoying Yang, Tom Bulatowicz, Mauricio Herrera-Rodriguez, Dazhi Mao, and Nathan Hendricks. (2009). Groundwater economics: An object-oriented foundation for integrated studies of irrigated agricultural systems. *Water Resources Research* 45, no. 5.
- [19] Кириленко О. В., Блінов І. В., Попович В. І., Олефір Д. О. (2011). Методологія об'єктно орієнтованого моделювання для опису функціонування конкурентного оптового ринку електричної енергії. *Проблеми загальної енергетики*, вип. 1, С. 5–10.
- [20] Sequeira, R. A., R. L. Olson, and J. M. McKinion (1997). Implementing generic, object-oriented models in biology. *Ecological Modelling* 94, no. 1, pp. 17–31.
- [21] Dorkeld, F., G. Perrière, and C. Gautier (1993). Object-oriented modelling in molecular biology. *Proceedings of the Artificial Intelligence and Genome WorkshoI*, JCAL, pp. 99–106.
- [22] Janowski, Sebastian Jan, Barbara Kaltschmidt, and Christian Kaltschmidt (2013). Biological network modeling and analysis. In *Approaches in Integrative Bioinformatics: Towards the Virtual Cell*, pp. 203–244. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- [23] Downing, K. and Reed, M. (1996). Object-oriented migration modelling for biological impact assessment. *Ecological modelling*, 93(1-3), pp. 203–219.
- [24] Shegogue, Daniel, and W. Jim Zheng. (2005). Object-oriented biological system integration: a SARS coronavirus example. *Bioinformatics* 21, no. 10, pp. 2502–2509.
- [25] Oegema, Karen, and Tony Hyman (2006). Cell division. *WormBook: The Online Review of C. elegans Biology* [Internet].
- [26] Droop, Alastair, Philip Garnett, Fiona AC Polack, and Susan Stepney (2011). Multiple model simulation: modelling cell division and differentiation in the prostate. In *Proceedings of the 2011 Workshop on Complex Systems Modelling and Simulation*, Paris, France, pp. 79–111.
- [27] Ransom, Robert, and Raymond J. Matela. (1984). Computer modelling of cell division during development using a topological approach. *Development* 83, no. Supplement, pp. 233–259.
- [28] Mishra, Prashant, and David C. Chan. (2014). Mitochondrial dynamics and inheritance during cell division, development and disease. *Nature reviews Molecular cell biology* 15, no. 10, pp. 634–646.
- [29] Tomasetti, Cristian, Lu Li, and Bert Vogelstein. (2017). Stem cell divisions, somatic mutations, cancer etiology, and cancer prevention. *Science* 355, no. 6331, pp. 1330–1334.

© Кошова О. П., Олексійчук Ю. Ф., Оборонний А. В., Черненко О. О.
Дата надходження статті до редакції: 18.06.2024
Дата затвердження статті до друку: 08.07.2024