

ГЕОПРОСТОРОВА ПІДТРИМКА

УДК 528.942:004.942

DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2022.52.54-58>

О. Міхно, канд. техн. наук, доц.
almikhno@ukr.net
ORCID ID 0000-0003-4994-2405,
Я. Патракеєв, студ.
patrick20017@icloud.com
ORCID ID 0000-0003-4075-4205,
Н. Левінськова, доц.
levinskova@ukr.net
ORCID ID 0000-0002-2532-2925

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ВОЄННО-ГЕОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ
НА ОСНОВІ МЕТОДУ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

Прогностичне моделювання урбанізованої території має бути невід'ємною складовою воєнно-географічного аналізу оперативно-стратегічного напрямку. За відсутності достатньої інформації від видових засобів розвідки, прогнозу, у тому числі і довгострокові, можуть суттєво підвищити достовірність інформації в системі підтримки прийняття рішень. Виходячи з цього, методи математико-картографічного моделювання мають право на існування у такій системі, як додаткове джерело прогностичної інформації. З усього різноманіття методів математико-картографічного моделювання для дослідження було обрано метод клітинних автоматів, який має такі властивості: просторова динаміка, часова дискретність та багатofакторність. ґрунтовно проаналізовано літературні джерела, що визначають стан і сучасні тенденції розвитку картографічного моделювання територіального розвитку міст у світі. Визначено місце методу клітинних автоматів у системі математико-картографічного моделювання як інструменту створення прогностичних моделей динаміки просторового поширення явищ. Розроблено структуру просторової бази даних математико-картографічного моделювання територіального розвитку українського міста Дніпро. Побудовано локальні функції переходів, які визначають відносини між одиничними клітинними автоматами в растровій поверхні моделювання. Високорівневою мовою програмування Python було створено додаток, який може бути інтегрованим до середовища геоінформаційної системи ArcGIS, і проведено моделювання територіального розвитку міста Дніпро. За результатами моделювання отримано сценарії розвитку міста на найближчі п'ять та десять років. Зростання площі територіального розвитку міста Дніпро за п'ять найближчих років може становити 72 кв. км, а за наступних десяти років – 120 кв. км. Усього розширення міської території можливе на 184 кв. км, що забезпечить загальне збільшення її площі на 44 %.

Ключові слова: воєнно-географічний аналіз, математико-картографічне моделювання, метод клітинних автоматів, міське середовище.

Постановка проблеми. Сучасні події у світі призвели до зміни політики добросусідства на воєнний стан, зміни акцентів розвитку суспільства в бік захисту незалежності і суверенітету від найближчого сусіда, який має істотно потужніший військовий потенціал. Оперативні напрями, які ще вісім років тому не розглядались як можливі, тепер актуальні і вимагають постійного проведення воєнно-географічного аналізу. Окрім аналізу розвідувальної інформації про суміжну територію, у якому велику частину займають результати дистанційного зондування, для отримання всебічної і актуальної інформації про неї необхідно застосовувати прогностичні моделі, які в комплексі з іншими даними будуть достовірною базою для підтримки прийняття відповідних військово-політичних рішень. І, на жаль, тепер такий аналіз мабуть треба буде вести постійно. У роботі розглядається математико-картографічне моделювання розвитку урбанізованої території як складової воєнно-географічного аналізу оперативно-стратегічного напрямку.

Дослідження навколишнього середовища неможливе без визначення логічних зв'язків між просторовими об'єктами і визначення часової траєкторії їхніх змін. Просторово-часові моделі, які відображають ці зв'язки, є невід'ємною частиною сучасних наукових досліджень. Найкращою моделлю навколишнього середовища є саме навколишнє середовище, але створення такої складної моделі обмежується суб'єктивними факторами, такими як обмеження можливостей людини і створених нею технічних засобів для дослідження інформації про навколишнє середовище. З розвитком обчислювальних засобів границі галузі досліджень розширюються. З'являються нові методи

моделювання територіального розвитку, які зайняли достойне місце в системі математико-картографічних методів. Багато дослідників спрямовують увагу наукового суспільства на метод клітинних автоматів, іноді він з'являється в літературі під назвою мультиагентного методу. У ньому за допомогою побудови гнучких зв'язків між прив'язаними до просторових координат складовими (агентами) формується послідовність сигналів, які, проходячи через ці зв'язки, поступово змінюють стан агентів, додаючи нові властивості всій території.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогноз розвитку території зараз є затребуваним у багатьох галузях сучасної науки, починаючи з природничих галузей і закінчуючи філософськими аспектами розвитку суспільства. Основною метою природничих і суспільних наук є побудова інформаційної основи для системи підтримки прийняття управлінських рішень для забезпечення сталого розвитку територій. Методи мультиагентного аналізу знайшли своє відображення в багатьох зарубіжних і вітчизняних публікаціях. Математико-картографічне моделювання в цьому випадку стає однією зі складових комплексного аналізу території, який забезпечує високу достовірність результатів прогнозу, що є найважливішою вимогою до даних воєнно-географічного опису. Наприклад, вирішення задачі оптимізації маршрутів автомобільного транспорту при прогнозуванні зростання житлової забудови за допомогою методу клітинних автоматів наведено в роботі [1]. Цікаво спостерігати часову модифікацію урбанізованої території під час її моделювання з моменту зародження міста (виникнення фортеці) до появи сучасних його кордонів [2], одночасно прово-

© Міхно О., Патракеєв Я., Левінськова Н., 2022

дячи дослідження інфраструктури міста [1, 3]. Дослідницький інститут систем знань (Research Institute for Knowledge Systems) із Нідерландів, який є провідним дослідницьким центром у сфері інтеграції моделей землекористування і систем підтримки прийняття рішень, презентував результати прогностичного моделювання розвитку території австралійського міста Сідней для різних стратегій планування його зростання [4]. Моделювання на основі методу клітинних автоматів розвитку міста Ер-Ріяд у Саудівській Аравії розглянуто в роботі [5]. У роботах [6, 7] наведено метафоричні визначення урбанізованої території: функціональне місто, розумне, мережеве, місто нетрів, туристичне місто, наукове місто тощо. Такі метафори дозволяють виділити найбільш концентровані проблеми та особливості міст, які дозволяють визначити стратегію прогностичного моделювання розвитку міст.

Мета статті. Стаття присвячена розгляду можливості застосування методу клітинних автоматів для прогностичного аналізу урбанізованої території на прикладі міста, що перебуває в стані сталого розвитку. Постійне уточнення параметрів навколишнього середовища під час ітеративного процесу моделювання дозволить

суттєво підвищити ефективність прогнозування за відсутності додаткової інформації про об'єкт моделювання від джерел дистанційного зондування.

Виклад основного матеріалу дослідження. За весь довгий період розвитку моделювання навколишнього середовища перший щабель по праву займає карта як образно-знакова просторово-часова модель світу. Хоча все частіше з'являються пропозиції перейменування терміна "картографічне моделювання" на "геопросторове моделювання" у зв'язку із суттєвим розвитком комп'ютерної галузі, яка є основою для реалізації процесу моделювання, він ще не набув широкого застосування. Тим більше, що термін "геопросторове моделювання" вимагає наявності термінологічного апарату і створення системи горизонтальних і вертикальних зв'язків, які ще потребують розробки. В існуючій системі картографічного моделювання метод клітинних автоматів займає своє місце в частині математико-картографічного моделювання як інструмент створення моделей динаміки поширення явищ як складової їхнього просторового поширення (рис. 1) [8].

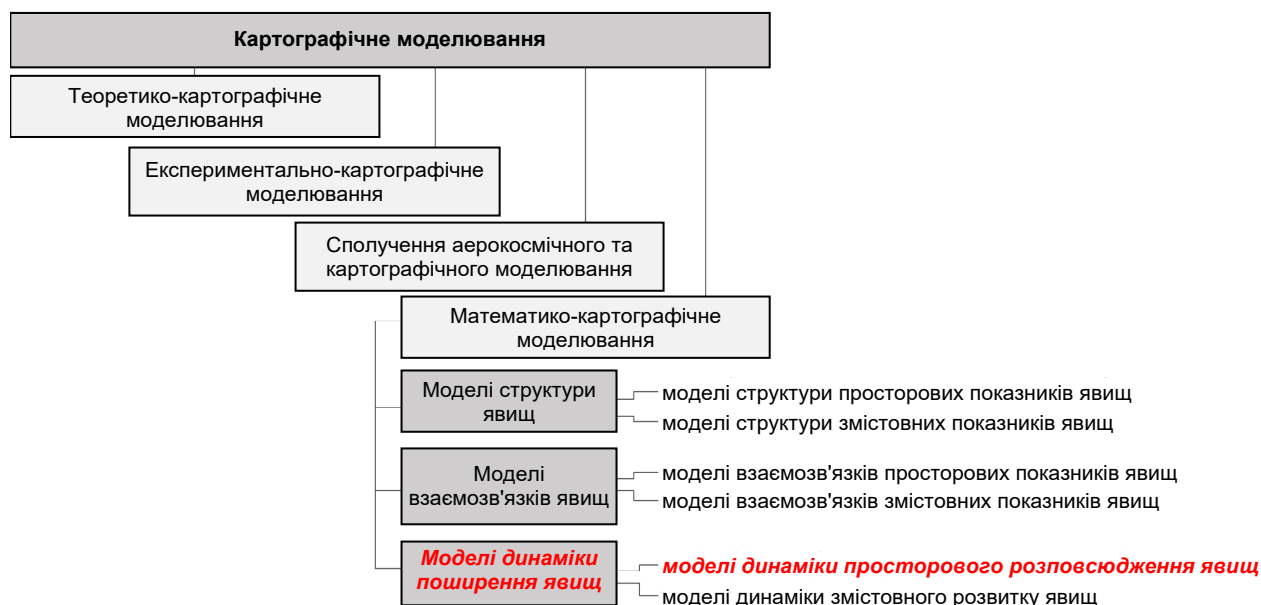


Рис. 1. Структура картографічного моделювання

Зазначений метод досить широко застосовується при моделюванні поширення просторових явищ [9–11]. Його сутність виражається в наступному. Окремим клітинним автоматом є математичний об'єкт, зазвичай це просторова комірка растрового покриття, що визначається двома основними дискретними параметрами – просторовим станом і часом. При дискретній зміні часу змінюється і просторовий стан окремого автомата. Можлива зміна стану окремого клітинного автомата визначається локальною функцією переходу для цього автомата. Функції переходу формуються, виходячи зі станів клітинних автоматів, що розташовані по сусідству і враховують поточний стан самого клітинного автомата. Тобто множина станів C і множина функцій переходів F повністю описують автомат S :

$$S = (C, F). \quad (1)$$

Стан окремого клітинного автомата $S(C_{t+1})$ на часовому кроці $t+1$ визначається функцією переходу залежно від його стану C_t та інформації I_t на попередньому t часовому кроці:

$$F: (C_t, I_t)C_{t+1}. \quad (2)$$

Внутрішній стан (C) і зовнішня інформація (I) дискретно змінюють стан окремого клітинного автомата залежно від змісту попередньо визначених локальних функцій переходів.

Основним фактором впливу на моделювання розвитку урбанізованої території насамперед розглядають топографічні властивості місцевості: рельєф, гідрографію, рослинність, наявність вже забудованих територій тощо. У роботі було проведено геоінформаційне математико-картографічне моделювання методом клітинних автоматів розвитку території українського міста Дніпро, вихідні просторові дані для якого (векторна карта і різночасові космічні знімки) наведено на рис. 2.

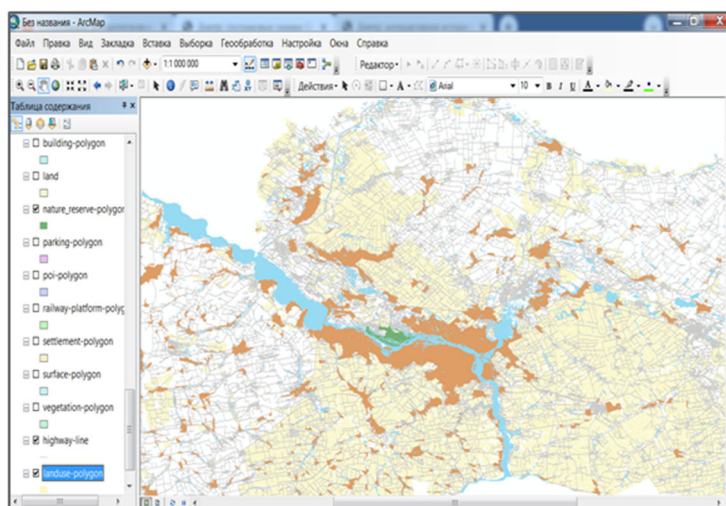
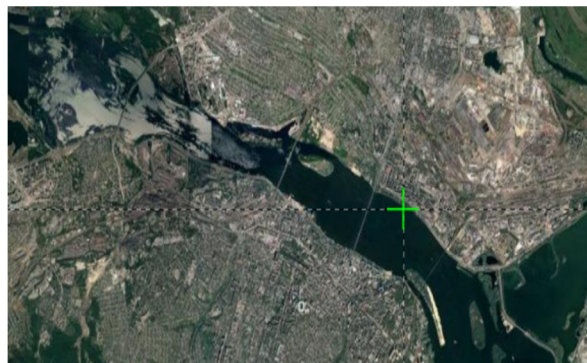
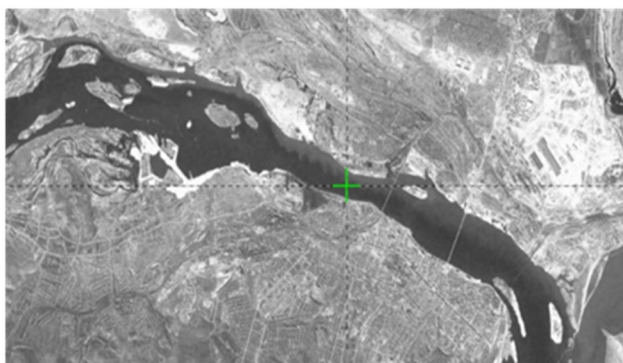


Рис. 2. Вихідні просторові дані для моделювання розвитку території міста Дніпро

Загалом геопросторова база вміщує 15 відношень, п'ять з яких безпосередньо використовувались для проведення моделювання. Базовими наборами об'єктів були вибрані топографічні шари; *населені пункти (NasPunkt)*, *дорожня мережа (TransNetwork)*, *гідрографія (Vodoimiy)*. Крім того, до фрагмента геопросторової бази даних входять набори безпосередньо клітинних автоматів *GeoAutomation* та зв'язків між ними *GeoRelationship*.

Вплив функції переходу на стан окремих клітинних автоматів визначається відповідно до шаблону сусідства Е. Мура (рис. 3). Це означає, що окремий клітинний автомат на кожній ітерації (у момент часу t) може отримувати керівний сигнал виключно від своїх сусідів (відповідно до індексу Е. Мура) і повертати інформацію про себе лише цим окремим клітинним автоматам.



Рис. 3. Шаблон сусідства Е. Мура і його трансформація при моделюванні

Локальні функції переходу формуються на основі попередньо визначених наборів продуктивних правил типу "ЯКЩО-ТО" у шаблоні сусідства Е. Мура. Тобто це означає, що якщо умова виконана, то стан окремого клітинного автомата зміниться на визначений. Такий простий умов-

ний алгоритм дає можливість моделювати досить складні процеси розвитку територій. У табл. 1 наведено два з усього набору продуктивних правил, які були реалізовані під час моделювання розвитку території міста Дніпро.

Таблиця 1. Продуктивні правила математико-картографічного моделювання

Правило 1	
ЯКЩО	наявність комірки з характеристикою "земельна ділянка під забудову приміської зони"
ТО	комірка з характеристикою "земельна ділянка під забудову приміської зони" змінить свій стан на "міська зона"
Правило 2	
ЯКЩО	наявність комірки з характеристикою "земельна ділянка під забудову приміської зони"
ТА	наявність хоча б однієї сусідньої комірки з характеристикою "шоссе"
ТО	комірка з характеристикою "земельна ділянка під забудову приміської зони" змінить свій стан на "міська зона"

Фрагмент растрового покриття клітинних автоматів для моделювання розвитку території міста Дніпро наведено на рис. 4. Там же показаний поточний стан кожного окремого автомата.

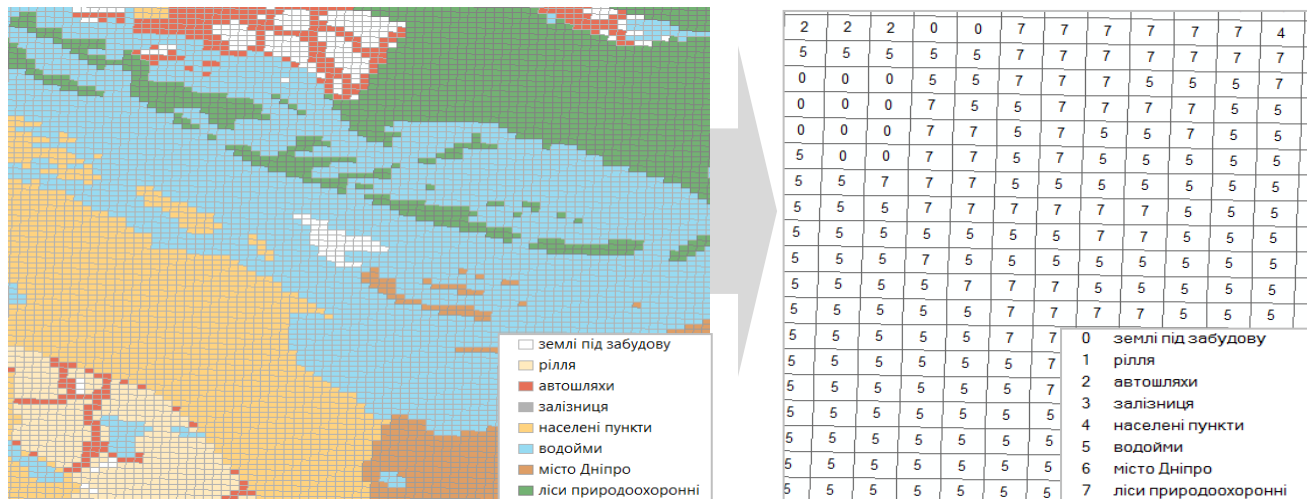


Рис. 4. Приклад растрового покриття клітинних автоматів при моделюванні територіального розвитку міста Дніпро

Інформаційна база геоданих для моделювання була сформована у середовищі сучасної геоінформаційної системи *ArcGIS*. Для обробки даних моделювання був написаний додаток скриптовою мовою програмування *Python*, яка є інтегрованою мовою середовища цієї геоінформаційної системи. Для моделювання було використано 392 тисячі окремих клітинних автомати. Покроковий процес становив 578 ітерацій.

З урахуванням восьми локальних правил сценарії територіального розвитку міста Дніпро наведено на рис. 5. У результаті моделювання отримано сценарії розвитку міста на найближчі п'ять та десять років. Зростання площі територіального розвитку міста Дніпро за п'ять років може становити 72 кв. км, а за наступних десяти років – 112 кв. км. Усього прогнозується розширення міської території на 184 кв. км, що забезпечить загальне збільшення міської території на 44 %.

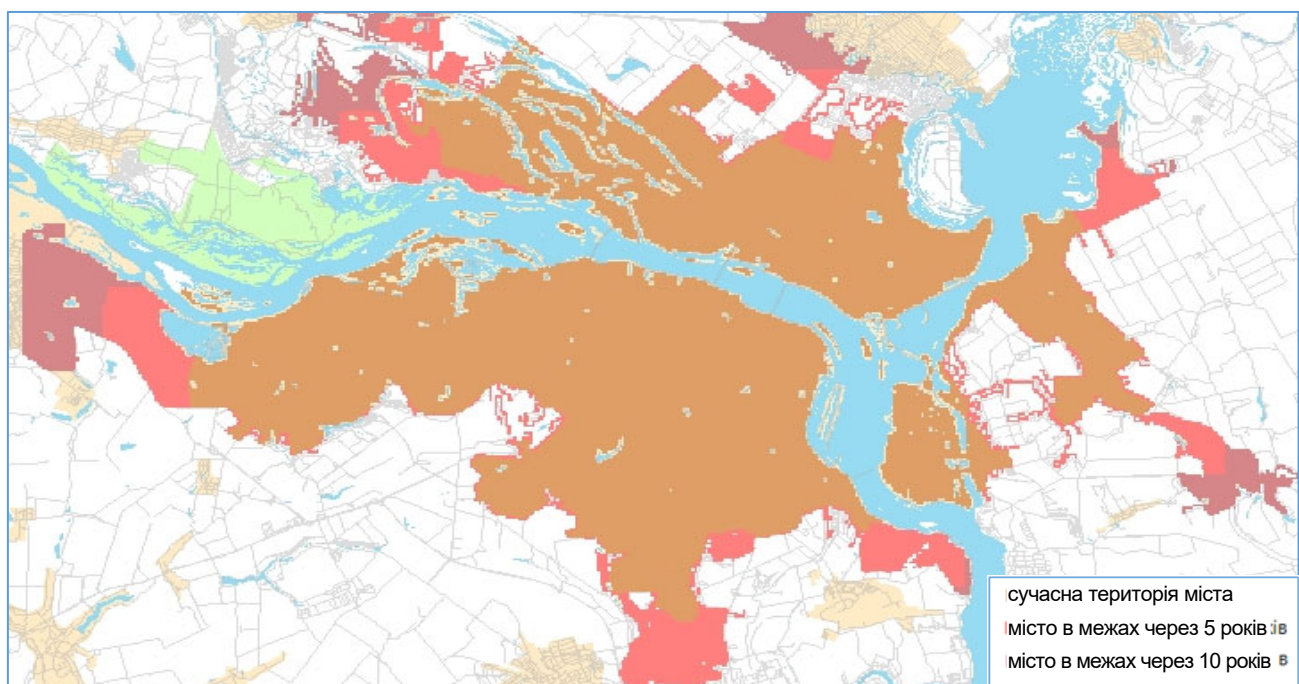


Рис. 5. Сценарій територіального розвитку міста Дніпро

Висновки. У роботі розглянуто питання застосування методів математико-картографічного моделювання в дослідженні розвитку території міста як складової воєнно-географічного аналізу оперативного-стратегічного напрямку. Показано можливість побудови моделей територіального розвитку на основі використання методу клітинних автоматів. За результатами виконаного дослідження можна зробити такі висновки:

1. методи математико-картографічного моделювання широко застосовуються при вирішенні прогностичних задач територіального розвитку сучасного міста;

2. у програмному середовищі геоінформаційної системи ArcGIS було розроблено геопросторову базу даних моделювання територіального розвитку українського міста Дніпро методом клітинних автоматів;

3. сформовано основні продуктивні правила, що визначають порядок зміни станів окремих клітинних автоматів. В основі цих правил лежать топографічні властивості місцевості навколо об'єкта математико-картографічного моделювання;

4. для обробки даних моделювання був написаний додаток скриптовою мовою програмування Python, яка є інтегрованою мовою середовища геоінформаційної системи. ArcGIS;

5. у результаті моделювання отримано сценарії розвитку міста на найближчі п'ять та десять років. Зростання площі територіального розвитку міста Дніпро за п'ять років може становити 72 кв. км, а за наступних десяти років – 112 кв. км. Усього прогнозується розширення міської території на 184 кв. км, що забезпечить загальне збільшення міської території на 44 %.

Список використаних джерел

1. Anderson T., Dragičević S. Representing Complex Evolving Spatial Networks: Geographic Network Automata // *ISPRS Internat. J. of Geo-Information*, 2020. Vol. 9(4). C. 270.
2. Torrens P.M., Benenson I. Geographic automata systems // *Internat. J. Geogr. Inf. Sci.*, 2005. Vol. 19. P. 385–412.
3. Міхно О.Г., Патракеєв Я.І. Моделювання територіального розвитку міст з застосуванням географічних клітинних автоматів: мат-ли IV Всеукр. наук. конф. Геодезія, землеустрій, геоінформатика в південному регіоні: сучасний стан та перспективи розвитку. Одеса : ОДАБА, 2019. С. 46–49.

4. Anderson T., Dragičević S. Network-agent based model for simulating the dynamic spatial network structure of complex ecological systems // *Ecological Modelling*, 2018, Vol. 389. P. 19–32.

5. Crooks A., Heppenstall A., Malleson N., Manley E. Agent-Based Modeling and the City: A Gallery of Applications. In: Shi W., Goodchild M.F., Batty M., Kwan M.P., Zhang A. (eds) // *Urban Informatics. The Urban Book Series*. Singapore : Springer, 2021.

6. Morgan G. Reflections on images of Organization and its implications for organization and environment // *Organ. Environ.*, 2011. Vol. 24(4). P. 459–478.

7. Barter N., Russel S. Organizational metaphors and sustainable development: enabling or inhibiting? // *Sustain. Account. Manag. Pol. J.*, 2013. Vol. 4(2). P. 145–162.

8. Взаимодействие картографии и геоинформатики / под ред. А.М. Берлянта и О.Р. Мусина. Москва : Науч. мир, 2000. 192 с.

9. Кобильник Т.П. Клітинні автомати як засіб моделювання складних систем // *Фізико-математична освіта*, 2018. Вип. 4(18). С. 71–75.

10. Sarkar P. A brief history of cellular automata // *ACM Computing Surveys*, 2000. Vol. 32, No 1. P. 80–107.

11. Schiff J.L. Cellular automata. A Discrete View of the World // A John Wiley & Sons Inc., Publication. University of Auckland, 2008. 279 p.

References

1. Anderson, T. & Dragičević, S. (2020). Representing Complex Evolving Spatial Networks: Geographic Network Automata. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 9(4):270.
2. Torrens, P. M. & Benenson, I. (2005) Geographic automata systems. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 19. 385–412.
3. Mikhno, O. G. & Patrakeyev, J. I. (2019) Modeling of territorial development of cities using geographic cellular automata. *Geodesy, Land management, Geoinformatics in the southern region: current state and development prospects: Materials of IV Allukr. Scien. Conf. Odesa*. 46-49.
4. Anderson, T. & Dragičević, S. (2018) Network-agent based model for simulating the dynamic spatial network structure of complex ecological systems. *Ecological Modelling*, 389. 19–32.
5. Crooks, A.; Heppenstall, A.; Malleson, N.; Manley, E. (2021) Agent-Based Modeling and the City: A Gallery of Applications. In: Shi, W., Goodchild, M.F., Batty, M., Kwan, M.P., Zhang, A. (eds) *Urban Informatics*. The Urban Book Series. Springer, Singapore.
6. Morgan G. (2011) Reflections on images of Organization and its implications for organization and environment. *Organ. Environ.* 24(4). 459–478.
7. Barter, N.; Russel, S. (2013) Organizational metaphors and sustainable development: enabling or inhibiting? *Sustain. Account. Manag. Pol. J.* 4(2). 145–162.
8. Interaction of Cartography and Geoinformatics (2000) In: Berlyant A.M. & Musina, O.R. (eds). *Moscow: Scientific World*. 192 p.
9. Kobyllynyk, T.P. (2018) Cellular automata as means of modeling complex systems. *Physical-mathematical education*. 4(18). 71-75.
10. Sarkar, P. (2000) A brief history of cellular automata. *ACM Computing Surveys*. 32(1). 80-107.
11. Schiff, J.L. (2008) Cellular automata. A Discrete View of the World. A John Wiley & Sons Inc., Publication. University of Auckland, 279 p.

Надійшла до редколегії 10.11.22

O. Mikhno, PhD in Technical Sci., Assoc. Prof.

almikhno@ukr.net

ORCID ID 0000-0003-4994-2405,

J. Patrakeyev, Stud.

patrick20017@icloud.com

ORCID ID 0000-0003-4075-4205,

N. Levinskova, Assoc. Prof.

levinskova@ukr.net

ORCID ID 0000-0002-2532-2925

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

MILITARY AND GEOGRAPHIC MODELING OF TERRITORY DEVELOPMENT BASED ON THE CELLULAR AUTOMATA METHOD

Prognostic modeling of urbanized territory should be an integral component of military and geographical analysis of operational-strategic direction. In the absence of sufficient information from various means of intelligence, forecasts, including long-term ones, can significantly increase the reliability of information in the decision-making support system. Based on this, the methods of mathematical-cartographic modeling have the right to exist in such system as an additional source of prognostic information. From all variety of methods of mathematical-cartographic modeling, the method of cellular automata was chosen for study, as a discrete in time, dynamic in space and multifactorial process. Thorough analysis of literary sources, which determine the state and modern trends in development of cartographic modeling of territorial development of cities in the world, was carried out. The place of the method of cellular automata in the system of mathematical- cartographic modeling as tool for creating prognostic models of dynamics of spatial distribution of phenomena is determined. The structure of spatial database of mathematical-cartographic modeling of the territorial development of Ukrainian city Dnipro has been developed. Local transition functions are constructed that determine the relationships between single cellular automata in the raster surface of simulation. A software application was developed in high-level Python general-purpose programming language, integrated into the environment of ArcGIS geoinformation system, and modeling of territorial development of city Dnipro was carried out. As a result of modeling, scenarios of the city's development for the next five and ten years were obtained. The growth of the area of territorial development of city Dnipro in the next five years may amount to seventy-two square kilometers, and in the next ten years – one hundred and twelve square kilometers. In total, the expansion of the city territory by one hundred and eighty-four square kilometers is predicted, which will ensure its total increase by forty-four percent.

Keywords: military-geographical analysis, mathematical-cartographic modeling, cellular automata method, urban environment.