

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Києво-Могилянська Академія»
Факультет інформатики
Кафедра мультимедійних систем

Магістерська робота

освітній ступінь – магістр

на тему: «**Моделювання складних процесів за допомогою клітинних
автоматів**»

Виконав: студент 1-го року навчання,

Спеціальності
121 Інженерія програмного забезпечення

Білокінь Данило Тарасович

Керівник: Жежерун О. П.
Кандидат наук, доцент Національного
університету "Києво-Могилянська
Академія"

Рецензент _____
(прізвище та ініціали)

Магістерська робота захищена з оцінкою
«_____»

Секретар ЕК _____
«_____» _____ 2022 р.

Міністерство освіти і науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ»

Факультет інформатики

Кафедра мультимедійних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри мультимедійних систем,
доцент., к.н..

_____ Жежерун О. П.
(підпис)

„_____” _____ 2022 р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

на курсову роботу

студенту 1-го курсу, факультету інформатики

Білокіню Данилу Тарасовичу

Моделювання складних процесів за допомогою клітинних автоматів.

Зміст ТЧ до магістерської роботи:

Зміст

Анотація

Вступ

1 Аналіз предметної області

2 Теоретичні відомості

3 Практичне використання

Висновки

Список літератури

Додатки

Дата видачі „_____” _____ 2022 р. Керівник _____
(підпис)

Завдання отримав _____
(підпис)

Календарний план виконання курсової роботи

Тема: Моделювання складних процесів за допомогою клітинних автоматів

Календарний план виконання роботи:

№ п/п	Назва етапу дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапу	Примітка
1.	Отримання завдання на курсову роботу	Жовтень- листопад 2021 р.	
2.	Огляд літератури за темою роботи	Листопад- грудень 2021 р.	
3.	Аналіз сучасних методів	Січень 2021 р.	
4.	Написання текстової частини.	Квітень 2022 р.	
5.	Перегляд курсової роботи науковим керівником	Квітень 2022 р.	
6.	Перегляд змісту роботи керівником	01.06.2022	
7.	Внесення змін до курсової роботи відповідно до зауважень наукового керівника	03.06.2022	

Студент Білокінь Д.Т. _____
(підпис)

Керівник Жежерун О. П. _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 2022 р

ЗМІСТ

Анотація	5
Вступ.....	6
Розділ 1 Аналіз предметної області.....	7
1.1 Аналіз сучасного стану питання та обґрунтування вибору тематики	7
Розділ 2 Теоретичні відомості.....	8
2.1 Основні відомості та підходів	8
2.2 Огляд основного середовища	9
2.2.1 Пояснення кодів Вольфрама для клітинних автоматів	10
2.3 Класифікація клітинних автоматів.....	11
2.3.1 Огляд клітинного автомату Гра Життя.....	12
Розділ 3 Практичне використання клітинних автоматів.....	18
3.1 Використання клітинних автоматів для моделювання природних катастроф	18
Висновки	21
Список використаних джерел	22

Анотація

Дана робота присвячена вивченню поняття клітинного автомату, розгляд його можливостей з метою моделювання складних процесів та систем.

Для дослідження було використано методи науково-методологічного аналізу підручників, наукових статей, монографій; синтез; порівняння та узагальнення теоретичних положень.

У роботі аналізується сучасний стан питання, пояснюються основні теоретичні відомості клітинних автоматів, підходи, їхня класифікація та детально описується на прикладі Гра Життя, аналізуються проблеми та їхнє вирішення за допомогою моделювання складних процесів та використання клітинних автоматів.

Вступ

Актуальність теми. Світ неможливий без складних явищ: ріст, життя, відновлення, самовідтворення, загибель, смерть тощо. Диференціальні рівняння та системи не повністю та всебічно описують структуру, динаміку складних явищ, водночас клітинні автомати легко справляється з описом таких явищ, як ріст, народження, загибель, самовідтворення, поведінку тощо. Клітинні автомати зручні для моделювання в багатьох наукових галузях, уникаючи застосування та викладу математичного громіздкого опису, чим і пояснюють свою поширеність і популярність. Водночас клітинні автомати мають незначне теоретичне підґрунтя, слабо вивчені з боку схожих обчислювальних експериментів та на предмет стійкості результатів, отриманих внаслідок моделювання.

Тож, клітинні автомати через свою відносну простоту використання та моделювання, зручні для моделювання складних процесів, вивчення динаміки та аналізу.

Метою дослідження є вивчення клітинних автоматів, їхнє застосування у моделюванні складних процесів.

Об'єктом дослідження є клітинні автомати у розрізі складних процесів.

Відповідно **предметом** дослідження є аналіз та вивчення клітинних автоматів, їхня класифікація, середовища моделювання, дослідження прикладів застосування.

В даній курсовій роботі застосовано такі **методи дослідження** як вивчення літератури, обстеження, науково-методологічний аналіз.

Інформаційну базу дослідження становлять книги та праці Стівена Вольфрама, та інші наукові статті та дослідження математиків та науковців у галузі клітинних автоматів.

Розділ 1 Аналіз предметної області

1.1 Аналіз сучасного стану питання та обґрунтування вибору тематики

Марвін Мінський, американський дослідник в галузі штучного інтелекту, у своїй праці «Обчислення і автомати» [1] називає важливим вивчення різноманітних шляхів утворення складної поведінки з простих пристроїв, дій описів чи концепцій. Одним з таких засобів, що виконує дані вимоги, є клітинні автомати.

Клітинні автомати дають змогу з легкістю змодельовати велику кількість складних процесів та явищ, що із складністю описуються за допомогою диференціальних рівнянь та систем, наприклад, такі процеси як ріст, самовідтворення, розвиток, загибель, зникнення тощо. Через зростаючу кількість нових ґрунтовних монографій з вивчення цього напрямку [2, 3, 4], робимо висновок, що моделі, побудовані на основі клітинних автоматів, з кожним роком набувають все більше популярності.

Клітинний автомат – це математичний об’єкт з дискретним простором та часом. Простір – це уявна площа (поле) з набором клітинок, що утворюють деяку решітку. Під часом розуміють набір кроків або поколінь даних клітинок, що у свою чергу містять у собі кілька бітів даних, одиницею виміру часу є такт.

Клітинні автомати набули свою популярність завдяки своїй відносній простоті та поєднанні великою кількістю можливостей використання з метою моделювання сукупності однорідних взаємозв’язаних об’єктів. Клітинні автомати можуть бути влучно використані для побудов моделей дискретних паралельних процесів, створення паралельних алгоритмів опрацювання даних завдяки тому, що вони є паралельними структурами [5].

Розділ 2 Теоретичні відомості

2.1 Основні відомості та підходів

Клітинні автомати є дискретними динамічними системами. Їхня поведінка повністю визначається у термінах локальних залежностей, як і для великого класу безперервних динамічних систем, що визначені за допомогою рівнянь у похідних. Тому клітинні автомати в галузі інформаційних технологій виступають еквівалентом поняття «поле».

Площина клітинних автоматів представлений рівномірною сіткою, кожна клітинка або комірка якої включає у себе кілька бітів даних. Умовно можна представити аркуш у клітинку, клітинки якого разом являють собою клітинний автомат. Час спливає дискретними кроками, а закони миру підпорядковуються одному єдиному заданому набору правил (умовний довідник), завдяки якому клітина при кожному своєму кроку визначає свій новий стан, спираючись на свій поточний стан, а також і на стан клітин, що є її близькими або діагональними клітинами, тобто умовними сусідами, на попередньому кроці. Ця функція ж однаковою для всіх кліток поля. Таким чином, заданий набір правил є визначеним для означеного місця та всі правила є ідентичними. Тобто, клітинний автомат – це система, поведінку якої повністю визначають поточний стан поля і локальними взаємодіями.

Для підтримки цілої ієрархії структур та явищ достатньо простого операційного механізму, що задається спеціальним набором правил, які підходять даним структурам та явищам. За допомогою клітинних автоматів є можливість побудувати моделі з метою дослідження у природніх та математичних науках, а також комбінаторній математиці та для пояснення соціально-економічних процесів тощо. Використовуючи принцип клітинних автоматів, можна вивчити еволюцію великих фізичних систем природнім шляхом. Клітинні автомати можна порівняти з машиною Тюрінга для

послідовних розрахунків, оскільки вони утворюють загальну парадигму паралельних обчислень [6, с. 8–9].

За допомогою клітинних автоматів можна зв'язати мікроскопічну поведінку з макроскопічними явищами.

Тоффолі Т. та Марголус Н. у своїй роботі, спираючись на дослідження Вольфрама [7] про роль клітинних автоматів у використанні зауважили наступне: «клітинні автомати знайшли стійке (та більш важливе) використання у якості концептуальних та практичних моделей для простороворозподільних динамічних систем, для яких фізичні системи є першими та найбільш важливими прототипами [6].

2.2 Огляд основного середовища

Необхідно зазначити, що для моделювання необхідні середовища. Тоффолі та Марголус у своїй роботі [6] представили стандартне середовище моделювання – машину клітинних автоматів САМ-6 (Cellular Automata Machine) через широкую доступність великому колу користувачів її апаратних засобів та програмного забезпечення.

Дана машина була розроблена у Лабораторії інформатики Массачутського технологічного інституту. Наразі її розробленням займається компанія *Systems Concepts*, що розташована в США, Сан-Франциско з метою розповсюдження даного апарату широким науковим колам по максимально низькій ціні після задоволення внутрішніх потреб вище зазначеного американського інституту МТІ.

САМ-6 – це машина клітинних автоматів, призначена, щоб виконувати роль лабораторії експериментатора, засобом повідомлення результатів та середовищем задля інтерактивної демонстрації у режимі реального часу. Керуюче програмне забезпечення для САМ-6 написано на загальнодоступній мові *FORTH* та працює на *IBM-PC* з пам'яттю 256К.

Вольфрам у своїй роботі визначив головні правила клітинного автомата, які використовують найдоступніші можливості САМ-6.

2.2.1 Пояснення кодів Вольфрама для клітинних автоматів

Існує 256 видів найпростіших клітинних автоматів, які визначив Вольфрам. Він запропонував називати їх просто числами від 0 до 255, тому їх визначенню дали назву - код Вольфрама. Розглянемо використання коду на прикладі автомату під номером 110. Для початку переводимо чисто в двійкову систему числення -

$$11010 = 011011102 \text{ . Можемо представити в вигляді таблиці (Табл. 1).}$$

Таблица 1

Розшифровка правила 110

111	110	101	100	011	010	001	000
0	1	1	0	1	1	1	0

Джерело: складено автором на основі джерела [6].

Таблиця показує залежність стану клітини на наступному кроці (другий рядок) в залежності від стану сусідів (перший рядок).

Для зрозумілості можна представити в такому вигляді рисунка (Рис. 1):

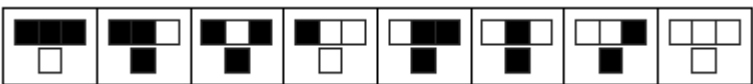


Рис. 1 – Візуалізація правила 110. Джерело [6]

Існують два основні та найчастіше застосованих в двовимірних системах клітинних автоматів типи окола – сукупності клітин. Окіл Мура має на увазі сукупність 8 клітин, кожна з якої має спільну вершину з головною центральною клітиною (Рис. 2).

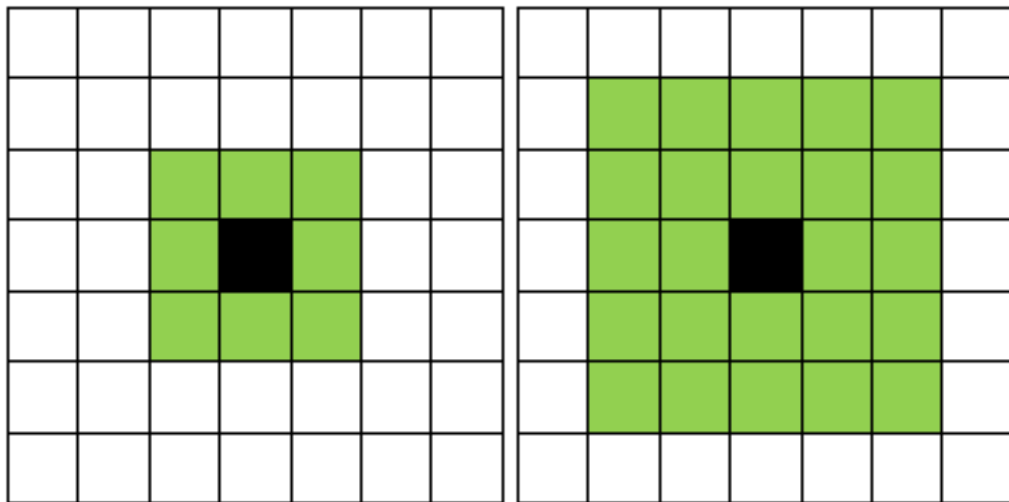


Рис. 2 – Окіл Мура: (а) 1-го порядку; (б) 2-го порядку. Джерело: [8]

Окіл Фон Неймана, в свою чергу, полягає в тому, що це сукупність чотирьох клітин на квадратному паркеті, кожна з яких має спільну сторону з центральною клітиною (Рис. 3).

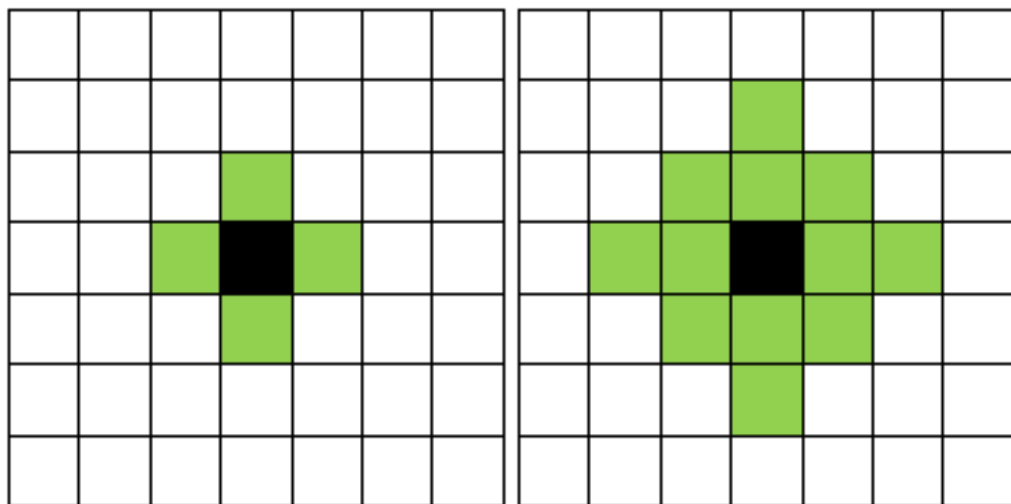


Рис. 3 – Окіл фон Неймана: (а) 1-го порядку; (б) 2-го порядку. Джерело: [8]

2.3 Класифікація клітинних автоматів

Стівен Вольфрам у своїй книзі *A New Kind of Science* запропонував методику, за якою можна розподілити всі можливі клітинні автомати в залежності від їх еволюції на 4 класи. Спроба Вольфрама була першою спробою класифікувати саме правила, а не їх типи поведінки окремо. Розташуємо ці класи за Вольфрамом у порядку зростання їхньої складності.

- Клас 1: швидкий перехід до гомогенної стабільності є результат еволюції початкових умов; будь-які негомогенні конструкції швидко зникають.
- Клас 2: результатом еволюції початкових умов стає швидкий перехід в незмінний негомогенний стан або поява циклічної послідовності. Більшість конструкцій початкових умов швидко зникають, але деякі залишаються. Місцеві зміни в початкових умовах здійснюють місцевий характер на подальший хід еволюції.
- Клас 3: результатом еволюції початкових умов стають псевдо-випадкові, хаотичні послідовності. Будь-які стабільні конструкції відразу знищуються шумом, що їх оточує, після їхнього появи. Місцеві зміни в початкових умовах мають невизначний вплив на подальший хід еволюції системи.
- Клас 4: результатом еволюції початкових умов стають структури, що встановлюють взаємодію складним чином з формуванням місцевих, стійких структур. Внаслідок еволюції можуть виходити деякі послідовності вище описаного Класу 2. Місцеві зміни в початкових умовах невизначено впливають на хід еволюції системи. Деякі клітинні автомати цього класу можуть бути Тьюрінг-повними (універсальні по Тьюрінгу – машина, що здатна замінити машину Тьюрінга), що доведено на прикладах Правило 110 та Гра Життя, описаної нижче.

2.3.1 Огляд клітинного автомату Гра Життя

Одним із прикладів клітинного автомата, що набув найбільшого поширення та впізнання у світі став і продовжує бути – «Гра життя» (універсальна по Тьюрінгу), що був вигаданий відомим англійським математиком Джоном Хортон Конвей, який займався теорією скінченних груп, теорією вузлів, теорією чисел. Творець цього відомого клітинного автомата описав його сутність та

принцип у жовтневому випуску журналу *Scientific American*, в рубриці «Математичні ігри» Мартіна Гарднера у 1970 році [10]. Для свого клітинного автомату, Джон Хортон надихався роботою Джона фон Неймана, Станіслава Улама. Вони розробили клітинний автомат (без використання комп'ютера) для дослідження можливості створення самовідтворюваних машин [1]. «Життя» можна вважати за гру, що описує популяцію стилізованих організмів, які розвиваються у часі під впливом протидіючих тенденцій розмноження та вимирання.

Індивідуум даної популяції виражений клітинкою у стані 1 (умовна зафарбована клітинка), в той час як клітина у стані 0 представляє собою незафарбований пустий простір (клітинку). Для стислості викладу та зрозумілішого уявлення, введемо поняття «зафарбовані» та «пусті» клітинки, або ж «живі» та «мертві» відповідно до їхнього стану 1 або 0, описаних вище. За кожного наступного кроку, кожна клітинка простору змінює свій стан в залежності від свого стану та стану безпосереднього близького оточення – сусідства, – що складається із 8 найближчих сусідів (справа, зліва, зверху, знизу, та чотирьох сусідів по діагоналі), відповідно до заданих Конвеєм правил. Сусіди клітинки мають свої назви відповідно до свого розташування: *NORTH*, *SOUTH*, *WEST*, *EAST*, *N.WEST*, *N.EAST*, *S.WEST*, *S.EAST*. За правилами у клітинки є наступні варіанти подальшого стану – смерть, життя або народження. Клітинка зазнає народження у випадку, якщо в її оточенні будуть знаходитися виключно 3 сусіда із станом 1 (живі), продовжить своє життя за умови наявності тільки 2 або 3 живими сусідами (зафарбовані клітинки), а помере у всіх інших випадках – якщо буде лише 1 чи більше 3 сусідів у стані 1 (живих) через «самотність» або «перенаселення» відповідно.

Для моделювання Гри Життя, середовищу CAM-6 задається набір правил, однаковий для всіх клітинок. Для задання правил CAM-6 FORTH, необхідно задати визначення слова *8sum*, що буде вираховувати кількість живих сусідів центральної клітинки (*center*) та використовувати кількість як адресу для

знаходження елементу даних в таблиці, що відповідає цьому конкретному числу; дані самостійно визначають новий стан клітинки [6].

Для графічного зображення та візуалізації Гри Життя будемо користуватись поняттями «зафарбовані» та «пусті» клітинки, що означають клітини у стані 1 (життя, народження) та 0 (смерть) відповідно. Найбільш розповсюджена, цікава та відома конфігурація даного клітинного автомата є «Глайдер», зображений на Рис. 4. Дана конфігурація цікава тим, що клітинки постійно рухаються по діагоналі, слідуючи заданим правилам життя, народження або смерті, описаних зверху. З кожним наступним кроком глайдер змінює розташування клітинок, з яких складається та рухається у діагональному напрямленні. На Рис. 4 зображені 5 різних станів глайдера, починаючи з першого стану ($t=0$), та наступних, де t – дискретна величина часу або крок – набуває свого значення від 1 до 4. Вже через 4 кроки фігура повторюється, як осцилятор – модель, що повертається у свій початковий стан (орієнтація та положення) після кінцевої кількості поколінь, але глайдер змінює свої місце розташування, проходячи одну клітинку, чим і відрізняється від осцилятора.

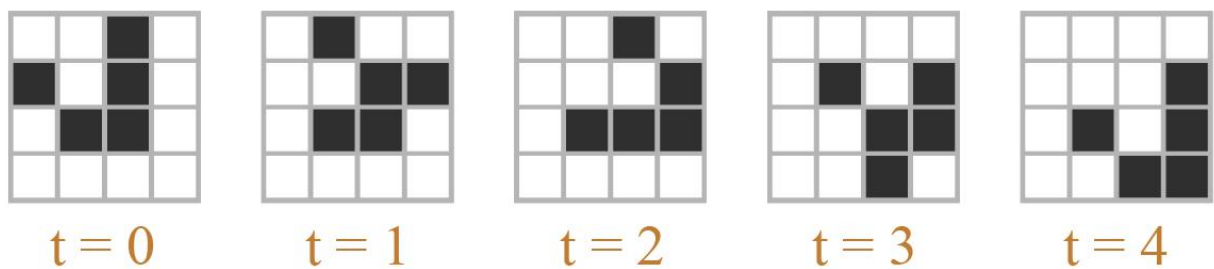


Рис. 4 – Конфігурація «Глайдер», Гра Життя. Джерело [11].

Спочатку, коли Джон Конвей вигадав Гру Життя, він мав на меті створити деяку симуляцію бактерій. За його першопочатковим задумом під зафарбованою клітинкою «ховалась» бактерія. Відповідно до визначених правил клітинного автомата Конвея, якщо бактерій ставало занадто багато, то вони вмирали внаслідок їхньої великої популяції у певному місці, внаслідок перенаселення, а

якщо поряд з бактерією було зовсім мало її сусідів – наступала смерть внаслідок так званої самотності.

Хоча початковим референсом були бактерії, форма яких була нечіткою, а їхня поведінка була відносно складною та хаотичною, за допомогою таких простих, чітких та влучних правил вдалось створити різні складні конструкції.

Якщо клітинки зі станом 0 та 1 випадковим чином розташувати на великому середовищі у рівній кількості в Грі Життя Рис. 5(а), то після певної кількості шагів високої активності популяція стане «рідшою» Рис. 5(б), а пізніше більша частина площини стане сталою та нерухомою за винятком декількох місць Рис. 6 (а), а врешті-решт вся активність спадає, за виключенням деяких «мигаючих» або нових формувань Рис. 6 (б).

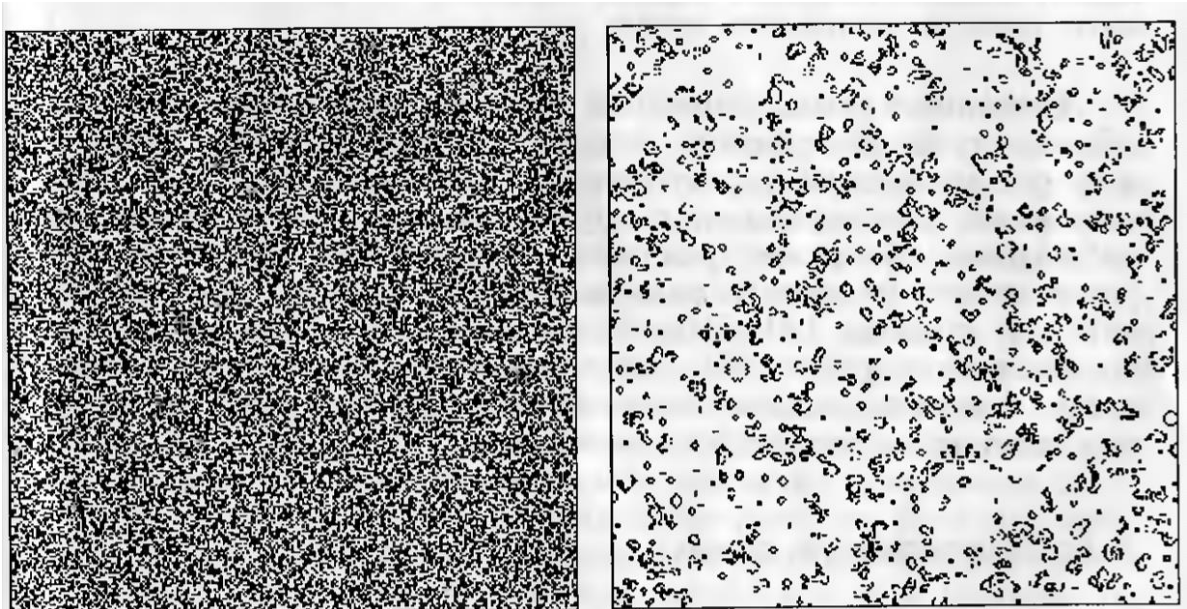


Рис. 5 – Кадри Гри Життя: (а) вихідна випадкова конфігурація; (б) декілька десятків кроків після початкового розподілення клітинок. Джерело [6].

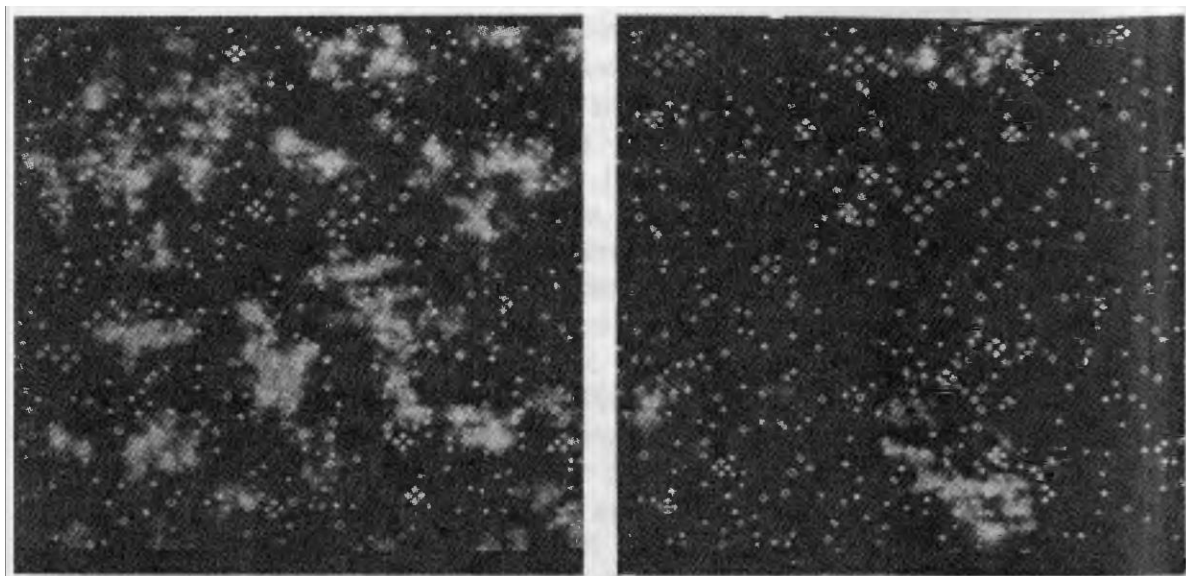


Рис. 6—(а) Декілька сотен кроків після розподілення клітинок випадковим чином, активність концентрується в кількох тліючих областях; (б) після декілька тисяч кроків майже вся діяльність затухла. Джерело [6].

В Грі Життя розробили навіть машину Тюрінга, зображену на Рис. 7, тобто повноцінний комп'ютер. З цього робимо висновок, що можливо в Грі Життя побудувати комп'ютер, загрузити програму, яка складатиметься з 0 та 1, тобто послідовностей вище описаних глайдерів та завдяки цьому отримати певну відповідь. Фактично, в Грі Життя можливо обчислити будь-який алгоритм, навіть просимулювати іншу Гру Життя або навіть увесь Всесвіт всередині симуляції Гри Життя, що залишає велике поле для досліджень. Саме тому Гру Життя називають «Тьюрінг-повною», що значить, що за допомогою даного клітинного апарату можна виконати будь-яке обчислення. Найбільша особливість Гри Життя полягає в тому, що за допомогою дуже простого заданого набору правил, можна отримати та проаналізувати доволі складну поведінку.



Рис. 7 – Побудована машина Тюрінга в Гра Життя (Фрагмент). Джерело [12].

Розділ 3 Практичне використання клітинних автоматів

3.1 Використання клітинних автоматів для моделювання природних катастроф

Оскільки клітинні автомати зручні та відносно прості для моделювання складних процесів і явищ, що в свою чергу допомагає уникати застосування математичного громіздкого опису, їхнє використання високо поширене і популярне для багатьох наукових досліджень та моделювання.

Клітинні автомати зазнали свого використання у такому цікавому та новому дослідженні «Моделювання потокоподібних зсувів у міських районах: застосування клітинних автоматів із SCIDDICA» [13] у співавторстві Валерії Лупіано, Гільермо Едвін Мачадо, Лорена Пауліна Моліна, Джіно Мірокле Кріші, Сальваторе Ді Грегоріо, викладеному у 2016 році.

Автори відзначають, що для моделювання потокоподібних зсувів використовуються різні методики. Головна проблема стосується затоплення міських районів, які неможливо асимілювати до морфології через те, що міська місцевість дуже нерівна, містить вузькі вулиці та провулки, дивне розташування будівель, саме тому процеси дискретизації апроксимаційних чисельних методів мали бути обережно досліджено в їхніх межах. В дослідженні був використаний напів-імперичний підхід з обчислювальною парадигмою клітинних автоматів SCIDDICA (пов'язаний з PDE підходом). Багато розширень SCIDDICA були пізніше розроблені Ді Грегоріо та співавторами [14], щоб покращити модель та/або охопити характеристики різних або більш складних зсувів. SCIDDICA — це сімейство детермінованих моделей МСА для моделювання поведінки зсувів, які можна типологічно визначити як «потоки».

Прогрес використання SCIDDICA-SS2 дозволив змоделювати повну еволюцію зсувів від зони відриву до її виснаження з високим рівнем точності. Це стало перевагою для аналізу небезпек і ризиків у зонах, що знаходились під загрозою. Покращений SCIDDICA-SS2 був успішно застосований до всіх добре

відомих потоків 2009 року у Сицилії, та показав гарні результати у порівнянні з результатами моделювання попередніх версій.

Для отримання найбільш точного відтворення спостережуваної події було проведено точне дослідження. В алгоритмі мінімізації різниць (AMD) було введено новий підстан, який кодував дані будівлі таким чином, щоб враховувати комірки, які містять будівлі та ґрунт одночасно, щоб елементи на різній висоті співіснували в одній комірці.

Основні рівняння, реалізовані в моделі, складаються в основному з рівняння неперервності.

Основний алгоритм, який використаний в роботі - AMD (A The algorithm of minimization of the difference), який адаптований до неоднорідних ситуацій, які пояснюються таким чином: є n кількість клітин, яким прописані певні характеристики висоти та площі, m ($m < n$) "центральних" клітин з додатковим об'ємом. В даному випадку величина, яка має бути мінімізована це різниця висот.

В алгоритмі використовуються такі змінні:

- n - сусідні клітини;
- m - центральні клітини;
- h_i = висота не розподіленого об'єму в клітині i $1 \leq i \leq n$;
- a_i = площа клітини i $1 \leq i \leq n$;
- d_j = висота розподіленого об'єму в клітині j $1 \leq j \leq m$;
- f_i' = спільний потік(об'єм) з центральної клітини в сторону клітини i $1 \leq i \leq n$ і/або частина d_j , який залишився в центральній клітині j $1 \leq j \leq m$;
- $h_i' = h_i + f_i'/a_i$ $1 \leq i < n$ нова висота клітини після проходження потоків.

Опис алгоритму:

Ініціалізація – всі сусідні клітини вважаються "доступними" для прийому потоків від центральних клітин, A - множина доступних клітин.

Цикл - знаходимо середню висоту для сусідніх клітин за Формулою 1:

$$\hbar = (\sum_{1 \leq j \leq m} d_j a_j + \sum_{k \in A} h_k a_k) / \sum_{k \in A} a_k$$

Кожна клітина x з $h_x \geq \hbar$ виключається з множини A .

Кінець циклу - переходимо до початку циклу поки не будуть виключені всі клітини з множини A .

Результат - $f_{k'} = a_k(\hbar - h_k)$ для $k \in A(h_k < \hbar)$; $f_{k'} = 0$ для $k \notin A(h_k \geq \hbar)$

Для коректної роботи в умовах міської забудови треба додати декілька умов. Так як забудова неоднорідна та будинок може сприйматись пагорбом через який не може проходити потік треба суттєво збільшити кількість клітинок, так щоб розмір клітинки був менший за ширину вулиці.

Отже, нові функції SCIDDICA-SS2 можуть бути дуже важливими для аналізу небезпек і ризиків у містах, які знаходяться під загрозою потокоподібних зсувів, після калібрування його параметрів за реальними подіями, що відбулися на їх території. Ефективність можливих робіт зі зменшення небезпеки також може бути перевірена моделюванням.

Наступною важливою метою майбутніх досліджень є моделювання ситуацій, коли частина сміттєвих потоків впадає в тунелі (або канали, модифіковані в тунелі), які перетинають міську територію.

Висновки

У ході написання курсової роботи дізнались про можливості моделювання складних процесів за допомогою клітинних автоматів, вивчили теоретичну частину клітинних автоматів, надали їм класифікацію, опрацювали наукові статті, монографії, книги та підручники, оглянули підходи, детально оглянули найбільш поширені приклади клітинних автоматів, таких як Гра Життя.

Клітинні автомати за рахунок своєї відносної простоти у використанні та заданні правил для моделювання складних процесів, явищ і об'єктів можуть бути доцільно та високо результативно використані в багатьох галузях науки, таких як: соціологія, економіка, біологія, фізика, або в інформаційних процесах тощо. Водночас необхідно зазначити, що клітинні автомати містять загально слабе теоретичне підґрунтя та дана тематика потребує більш глибокого вивчення, обґрунтування та доведення стійкості та точності результатів, що отримують внаслідок моделювання.

Список використаних джерел

1. Минский М. Вычисления и автоматы. М.: Мир, 1971. 366 с.
2. Аладьев В. З. Классические однородные структуры: Клеточные автоматы. CA: Palo Alto, Fultus Books, 2009. 535 с.
3. Schiff J. L. Cellular automata. A Discrete View of the World. A John Wiley & Sons Inc., Publication. University of Auckland, 2008. 279 p.
4. Wolfram S. A new kind of science. Champaign, IL: Wolfram Media Inc., 2002. 1280 p.
5. Жуков В.Е. Клеточные автоматы в криптографии. Часть 2. Вопросы кибербезопасности. 2017. No4(22). С.47-66.
6. Тоффолі Т., Марголус Н., Машини клітинних автоматів: Пер. з англ. – М.: Мир, 1991. – 280 с.
7. Wolfram, Stephen (ed.), Theory and Applications of Cellular Automata, World Scientific (1986).
8. Tyler, Tim. The Moore neighbourhood
9. Gray, L. "A Mathematician Looks at Wolfram's New Kind of Science." Not. Amer. Math. Soc. 50, 200-211, 2003.
10. Gardner, Martin (October 1970). "The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'life'" (PDF). Mathematical Games. Scientific American. Vol. 223, no. 4. pp. 120–123. doi:10.1038/scientificamerican1070-120. JSTOR 24927642.
- von Neumann, John; Burks, Arthur W. (1966), Theory of Self-Reproducing Automata. (Scanned book online), University of Illinois Press, retrieved 2017-02-28 <https://haskell-course-projects.readthedocs.io/ru/latest/simulations/life.html>
12. Youtube channel Onigiri: <https://www.youtube.com/watch?v=FiO6jkNkrb4>
13. Lupiano, Valeria et al, Simulations of Flow-like Landslides Invading Urban Areas: a Cellular Automata Approach with SCIDDICA

14. Avolio MV, Di Gregorio S, Mantovani F, Pasuto A, Rongo R, Silvano S, Spataro W (2000) Simulation of the 1992 Tessina landslide by a cellular automata model and future hazard scenarios. *J Appl Earth Obs Geoinf* 2(1):41–50