

УДК 004.032.26

АЛГОРИТМИ НЕЙРОННИХ СІТОК ДЛЯ ПРОБУДОВИ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

Ванін В.В., д.т.н.,

vaninvladimir30@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7008-7269

Залевська О.В., к.т.н.,

o.zalevska@kpi.ua, ORCID: 0000-0002-3163-1695

Сидоренко Ю.В., к.т.н.,

suliko3@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1953-0410

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

Gong XiaoDong,

gongxd@126.com,

Shandong Academy of Sciences, Qilu University of Technology (China)

Ковальчук О.В.,

ksusha.mgu@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4249-8751

Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького (Запоріжжя, Україна)

Клітинні автомати вже багато років знаходяться в центрі уваги завдяки своїй здатності генерувати широкий спектр складних динамічних систем. Вони базуються на основі простих базових наборів правил та відображають багато суттєвих рис складної самоорганізованої колективної поведінки, що спостерігається в реальних системах. Під тривимірними клітинними автоматами розуміють автомати, що найбільш близькі до об'єктів реального світу, але поведінка таких машин залишається мало вивченою. Існує безліч реалізацій одновимірних та двовимірних клітинних автоматів, таких як ігри Ленгтона Мурашник та Життя, але для тривимірних клітинних автоматів їх набагато менше. Клітинні автомати дозволяють надати єдиний пристрій для опису математичної моделі вивчення процесів різної природи.

Під час досліджень виникає потреба в розумінні того, що відбувалось декілька етапів тому та початкового стану системи, в залежності лише від її поточного стану. Велике значення для таких систем має той факт, що клітинні автомати можуть бути універсальною моделлю для паралельних обчислень. В роботі розглядається можливість відновлення правил побудови клітинного автомату та його початкового положення за допомогою нейронних мереж. Етапи еволюції динамічної системи замінюються на випробування згорткової нейронної мережі. Це дозволяє значно скоротити час обрахунку етапу розвитку клітинного автомату.

Використання нейронних мереж надає можливості для знаходження розв'язку оберненої задачі еволюції. Для вирішення цієї задачі було розроблено та реалізовано скрипт на мові програмування Python на базі бібліотек Keras та Theano для побудови моделі Згорткової нейронної мережі. Дана модель вивчає правила переходу для тривимірних клітинних автоматів, що приводять до генерації стабільних структур певного наперед заданого вигляду.

Ключові слова: клітинний автомат, нейронні мережі, еволюція, динамічна система, тривимірний простір.

Постановка проблеми. Клітинні автомати дозволяють надати єдиний пристрій для опису математичної моделі вивчення процесів різної природи. Це призводить до потреби розробки універсального та єдиного апарату для дослідження клітинних автоматів вченими різних галузей науки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Широкого застосування клітинні автомати набули під час роботи Джона фон Неймана. Він працював над самовідтворенням і намагався уявити редукціоністську теорію біологічного розвитку. Намагався створити систему, яка б могла створювати точні копії самої себе [1]. Космічний корабель фон Неймана був першою моделлю дискретного паралельного комп'ютера історія, яка була офіційно продемонстрована як універсальний комп'ютер, тобто. здатний імітувати універсальну машину Тьюринга та обчислювати всі рекурсивні функції[2].

Томмазо Тоффолі використовував клітинні автомати для прямого моделювання законів фізики, заклавши цим основу вивчення оборотних космічних апаратів [3-4].

Робота Стівена Вольфрама допомогла поставити зростаючу спільноту прихильників КА на наукову карту. У серії статей Вольфрам вивчав одновимірні космічні апарати, що дало першу якісну таксономію їхньої поведінки та заклало основу для майбутніх досліджень [5-6].

Для одновимірних та двовимірних клітинних машин існує широкий спектр реалізацій, таких як Мурашник Ленгтона та гра «Життя» [7-8], але для тривимірних клітинних машин таких реалізацій набагато менше.

Формування цілей статті. Розробити програмний застосунок, що досліджуватиме еволюцію тривимірних клітинних автоматів. Основною аудиторією цього додатка є вчені, діяльність яких пов'язана з вивченням динамічних систем, а також безпосередньо з вивченням клітинних автоматів.

Основна частина. Нехай Z^n – n-вимірний однорідний простір сітки, де $n = 3$ для тривимірного простору. Тривимірна форма представлена як стан, який являє собою впорядкований набір зайнятих комірок [9].

Однією з найбільших проблем, що стоять перед сферою генерації, є «як правильно повідомити автомату, що потрібно будувати? І коли зупинитися?». Здається, біологія це зрозуміла. Вона оптимізувала використання законів фізики та обчислень після мільйонів років еволюції. З точки зору КА, проблема полягає в тому, щоб знайти правило оновлення, яке перетворить одну клітинку на дуже компактне тіло. Отже, замість пошуку оптимального правила оновлення в біології можна використовувати алгоритм нейронної мережі, який знаходить це правило протягом кількох поколінь [10]. Нейронна мережа може пройти кілька випробувань, як певна форма віртуальної еволюції, яку проходять організми. Таким чином, можна використовувати архітектуру нейронної мережі для створення цільового зображення з початкової клітини.

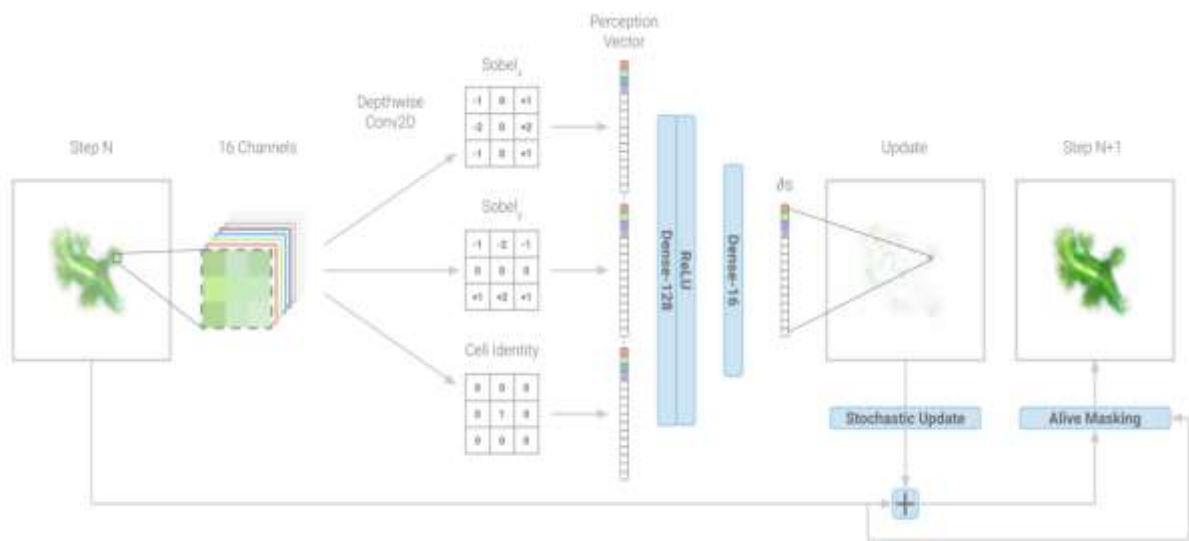


Рис. 1. Структура нейронної мережі генерації 3Д форм

Вхідний об'єкт тут має матрицю клітинок розміром 40 на 40 на 40. Кожна клітинка має 8 станів (каналів). Ми не використовуємо канали RGB та «прозорість» і приймаємо наш об'єкт як забарвлений в один колір. Це нам збереже пам'ять для тренування мережі. Канали невидимі і не обов'язково мають заздалегідь визначене значення, крім одного, що заповнений 1 чи 0 відповідно до існування клітини чи ні. Їх можна вважати уявленням про хімічні та фізичні взаємодії, які відчувають біологічні клітини. Правило оновлення дізнається, як використовувати ці канали для досягнення цільового зображення. Клітини взаємодіють відповідно до околиці Мура ($r=2$)(рис.1).

Петля зворотного зв'язку встановлюється за допомогою функції втрат L2. Значення втрат розраховується шляхом порівняння видимих каналів відтвореного зображення з каналами цільового зображення. Відмінність різних каналів один від одного полягає лише в пошуку правильного правила оновлення за допомогою векторів сприйняття. Вони гнучкі та будуть адаптовані архітектурою нейронної мережі для

оптимізації правила оновлення. У той час як втрати у видимому каналі будуть розраховані за допомогою середньоквадратичної помилки (MSE), щоб керувати навчанням.

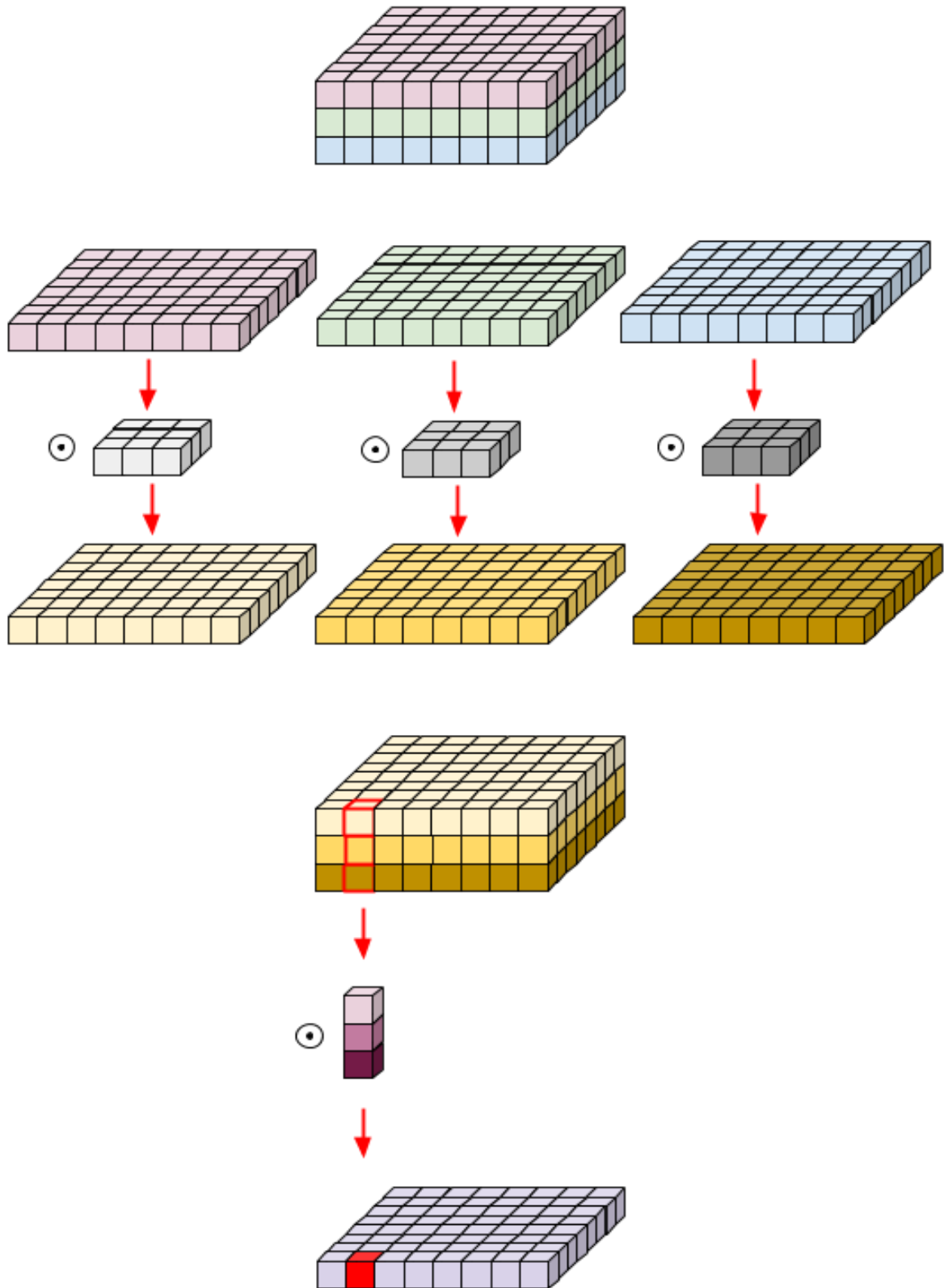


Рис. 2. Згортки для 3Д структур

В основі згорткових нейронних мереж (CNN) і тому, що дає їм їх назви, є шари згортки. Явно розроблені для роботи з зображеннями, CNN натхненні тим, як бачать люди. На відміну від традиційних нейронних мереж, які векторизують зображення, CNN приймають 2D-форму зображення. Цей процес має значну перевагу перед звичайними нейронними мережами; він підтримує просторову локальність пікселів. Оскільки зображення не векторизоване, 2d-об'єкти зображення правильно передаються в мережу.

Для 3D об'єкту ми можемо використовувати згорткову мережу аналогічно, тому що 3D об'єкт можна презентувати як набір картинок, як наприклад, коли роблять медичну томографію.

Тут застосовується фільтр, показаний на рисунку 2, згорнуті з кожним із 16 каналів у двох шарах згортки. Отримана матриця потім лінеаризується на вектори сприйняття і подається в кінцевий лінійний нейронний шар, який дає 64 вихідних вузлів, де функція активації ReLU потім передає їх у лінійний шар, який створює 8 значень. Кожне значення представляє правило оновлення для одного з 8 вихідних каналів.

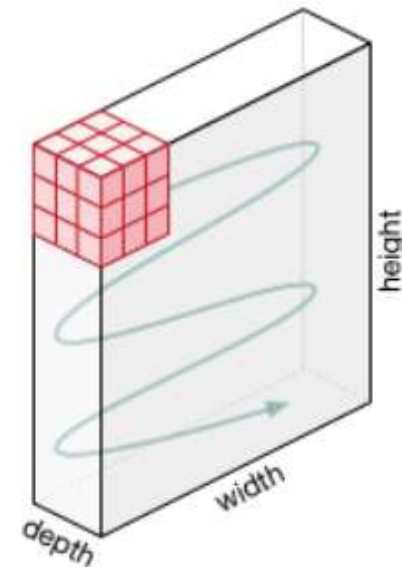


Рис. 3. Фільтр для двовимірного об'єкту з 3 каналами

Визначено варіанти використання розробленого застосунку, що відповідає наведеним параметрам. Результат показано у таблиці 1

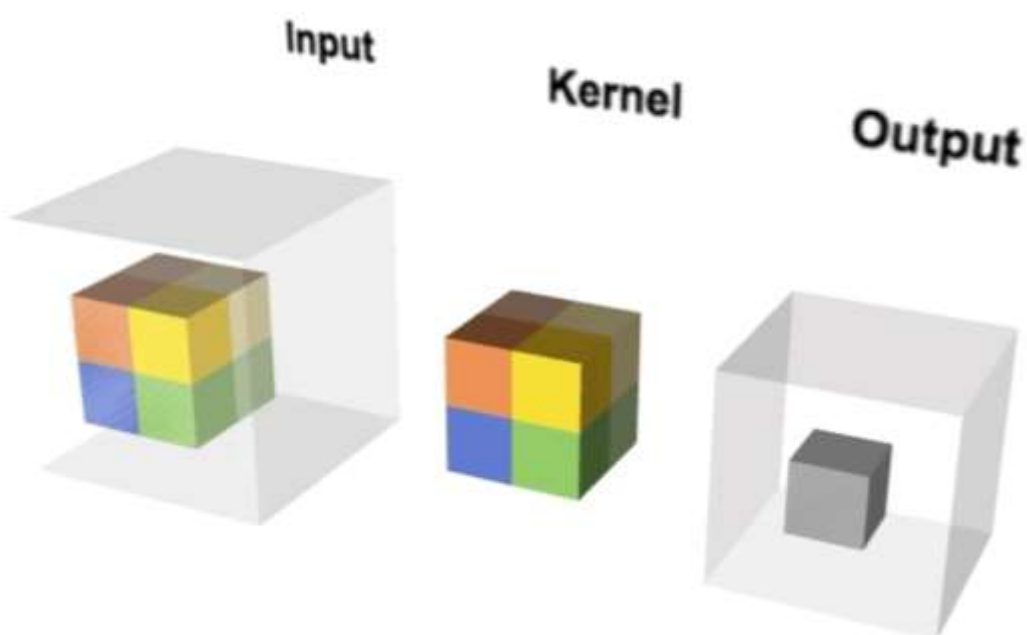


Рис. 4. Фільтр для тривимірного об'єкту з 3 каналами

Визначено варіанти використання розробленого застосунку, що відповідає наведеним параметрам. Результат показано у таблиці 1.

Таблиця 1

Варіанти використання застосунку

Актор	Можливість використання	Опис дії варіанта використання
Користувач	Введіть розмір поля по x , y , z	Користувач встановлює курсор на потрібні параметри.
Користувач	Встановлює кількість сусідів для відображення нового осередку	Користувач натискає одну із 27 різних кнопок.
Користувач	Встановить кількість сусідів для комірки, щоб померти	Користувач натискає одну із 27 різних кнопок.
Користувач	Відновити правила народження клітин	Користувач натискає відповідну кнопку скидання для правил скидання осередку.
Користувач	скинути правила знищення клітин	Користувач натискає відповідну кнопку скидання, щоб знищити комірку.

Користувач	Прийняти зміну	Користувач натискає, щоб змінити настройки гри.
Користувач	Початок гри	Користувач натискає відповідну кнопку, після чого відображається результат аналізу.
Користувач	Навігація по полю	Користувач переглядає поле під різними кутами за допомогою клавіатури.

Висновки. Було проведено ряд статистичних експериментів для дослідження поведінки довільно заданих початкових клітинних автоматів в тривимірному просторі. Ці статистичні дані було використано для проведення статистичного аналізу поведінки тривимірних клітинних автоматів і зроблено висновок про їх тенденцію до утворення стабільних структур при певних початкових умовах.

Було успішно розроблено та реалізовано скрипт на мові програмування Python на базі бібліотек Keras та Theano для побудови моделі Згорткової нейронної мережі, що вивчає правила переходу для тривимірних клітинних автоматів, що приводять до генерації стабільних структур певного вигляду.

Література

1. Sutner, Klaus. De Bruijn Graphs and Linear Cellular Automata. *Complex Systems*. 1991. Vol.5: pp.19–30.
2. Залевська О.В., Фіногенов О.Д., Ібнухсейн І., Суворова В.Є., Використання засобів онлайн технологій для побудови тривимірних клітинних автоматів. 23 міжнародна науково–практична конференція: “Сучасні проблеми геометричного моделювання”, Мелітополь, 2021. с. 39.
3. Wolfram S. Cellular automation Fluids. *J.Stat.Phys*. 1986. Vol. 45. pp. 471-526.
4. Minsky, M. Cellular Vacuum. *International Journal of Theoretical Physics*. 1982. Vol. 21. pp. 537–551.
5. Ібнухсейн І., Суворова В.Є., Залевська О.В. Клітинні автомати та гра «Життя». II всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція молодих вчених та здобувачів вищої освіти «Сучасна молодь в світі інформаційних технологій». Херсон. 2021. С. 184-186.
6. Cellular Automaton. 2001. Retrieved from: <https://mathworld.wolfram.com/CellularAutomaton.html> (01.05.2021)
7. Yves Bouligand. Disordered Systems and Biological Organization. 1986. pp. 374–375.
8. Суворова В.Є., Ібнухсейн І., Залевська О.В. Огляд та застосування

еволюційних клітинних автоматів. II всеукраїнська науково-практичної інтернет-конференція молодих вчених та здобувачів вищої освіти «Сучасна молодь в світі інформаційних технологій». Херсон, 2021. С. 192-195.

9. Y. Su and W. S. Lei. Relationship between fracture toughness and fractal dimension of fracture surface of steel. *Int. J. Fract.*, 106(3):L41–L46, 2000
10. Залевська О., Фіногенов О., Ібнухсейн І., Суворова В. Використання засобів он-лайн технологій для побудови тривимірних клітинних автоматів. *Сучасні проблеми моделювання*, 2021. Вип. 22, 39-47. <https://doi.org/10.33842/22195203/2021/22/39/4>

ALGORITHMS OF NEURAL NETWORKS FOR THE CONSTRUCTION OF CELLULAR AUTOMATA

Volodymyr Vanin, Olga Zalevska, Iuliia Sydorenko, Oksana
Kovalchuk, Gong XiaoDong

Cellular automata have been in the spotlight for many years due to their ability to generate a wide range of complex dynamical systems. They are based on simple underlying rule sets and reflect many essential features of complex self-organized collective behavior observed in real systems. Three-dimensional cellular automata are understood as the automata that are closest to real-world objects, but the behavior of such machines remains poorly understood. There are many implementations of one-dimensional and two-dimensional cellular automata, such as Langton's games Anthill and Life, but for three-dimensional cellular automata there are much fewer of them. Cellular automata allow to provide a single device to describe a mathematical model for studying processes of different nature.

During research, there is a need to understand what happened several stages ago and the initial state of the system, depending only on its current state. Of great importance for such systems is the fact that cellular automata can be a universal model for parallel computing. In this paper, we consider the possibility of restoring the rules for constructing a cellular automaton and its initial position using neural networks. The stages of evolution of the dynamical system are replaced by the tests of convolutional neural network. This allows to significantly reduce the time of calculation of the stage of development of the cellular automaton.

The use of neural networks provides opportunities for finding a solution to the inverse problem of evolution. To solve this problem, a Python script based on Keras and Theano libraries was developed and implemented to build a convolutional neural network model. This model studies the transition rules for three-dimensional cellular automata that lead to the generation of stable structures of a certain predetermined form.

Keywords: cellular automaton, neural networks, evolution, dynamical system, three-dimensional space.

References

1. Sutner, Klaus. De Bruijn Graphs and Linear Cellular Automata. Complex Systems. 1991. Vol.5: pp.19–30.
2. Zalevskaya O.V., Finogenov O.D., Ibnukhsein I., Suvorova V.E. (2021) The use of online technologies for the construction of three-dimensional cellular automata. 23 international scientific and practical conference: *Modern problems of geometric modeling*, Melitopol (p. 39) [in Ukrainian]
3. Wolfram S. Cellular automation Fluids. J.Stat.Phys. 1986. Vol. 45. pp. 471-526.
4. Minsky, M. Cellular Vacuum. International Journal of Theoretical Physics. 1982. Vol. 21. pp. 537–551.
5. Ibnukhsein I., Suvorova V.E., Zalevska O.V. (2021) Cellular automata and the game "Life". II All-Ukrainian scientific and practical Internet conference of young scientists and applicants for higher education "*Modern youth in the world of information technology*". Kherson. (pp. 184-186). [in Ukrainian]
6. Cellular Automaton. (2001). URL: <https://mathworld.wolfram.com/CellularAutomaton.html> (01.05.2021)
7. Yves Bouligand (1986). Disordered Systems and Biological Organization. pp. 374-375.
8. Suvorova V.E., Ibnukhsein I., Zalevska O.V. Review and application of evolutionary cellular automata (2021) II All-Ukrainian scientific and practical Internet conference of young scientists and applicants for higher education "*Modern youth in the world of information technology*". Kherson. (pp. 192-195). [in Ukrainian]
9. Y. Su and W. S. Lei. Relationship between fracture toughness and fractal dimension of fracture surface of steel. Int. J. Fract., 106(3):L41-L46, 2000
10. Zalevskaya, O., Finogenov, O., Ibnukhsein, I., & Suvorova, V. (2021). The use of online technologies for the construction of three-dimensional cellular automata. *Modern problems of modeling*, (22), 39-47. <https://doi.org/10.33842/22195203/2021/22/39/4> [in Ukrainian]