

DOI: 10.35681/1560-9189.2024.26.1.308506

УДК 004.5

**В. Р. Сенченко¹, А. В. Бойченко¹, О. В. Коваль^{1,2},
Р. М. Бисько², О. М. Хоменко²**

¹Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

²НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»
Проспект Берестейський, 37, 03056 Київ, Україна

Огляд методів і технологій сценарного аналізу каскадних ефектів

Представлено систематичний аналіз існуючих методів і технологій сценарного аналізу каскадних ефектів з точки зору їхньої ефективності для використання при розробці моделі захисту критичної інфраструктури. Розглянуто найбільш важливі досягнення в даній сфері за останні десятиліття. Виділено десять перспективних підходів: метод аналізу перехресних впливів, інтерпретаційне структурне моделювання, їхнє поєднання, метод Delphi, динамічне моделювання, методи аналізу ризиків, метод мережевого аналізу, агентне моделювання, моделювання геоінформаційні системи, методи машинного навчання. За результатами сформовано підсумкову таблицю, в якій представлено стислий опис кожного із розглянутих підходів, технології та інструментальні засоби його реалізації, переваги порівняно з іншими підходами, недоліки і особливості застосування. Показано, що для розглянутих методів розроблено пакети комп'ютерного моделювання, які дозволяють досліджувати складні сценарії виникнення каскадних ефектів.

Ключові слова: сценарний аналіз, каскадний ефект, критична інфраструктура, управлінська діяльність, методи моделювання.

Вступ

Сценарний аналіз у сфері розроблення управлінських рішень для критичної інфраструктури (КІ) [30] полягає в проведенні дослідження, у ході якого будується кілька альтернативних варіантів сценаріїв розвитку каскадних ефектів при заданих обмеженнях [2]. Будучи важливою складовою управлінської діяльності у сфері критичної інфраструктури, сценарний аналіз [3, 4], надає досліднику низку можливостей для оцінки вагомості впливу показників на розвиток каскадних ефектів і дозволяє спрогнозувати прийдешні наслідки.

Відповідно до визначення, яке надає міжнародна організація EU Matrix [1], каскадні ефекти — це динамічні процеси, коли вплив негативної події породжує послідовність подій не лише у своїй інфраструктурі, але й інших інфраструктурах. Вплив каскадних ефектів часто призводить не лише до значних фінансових, економічних збитків, але й до соціальних негативних наслідків.

За своєю природою каскадні ефекти є складними та багатовимірними і розвиваються як у просторі, так і у часі [22]. При моделюванні каскадні ефекти зазвичай візуалізуються у вигляді деревоподібних структур. Кожна гілка дерева складається з послідовних подій і відображає причинно-наслідкові зв'язки, які реально існують у критичній інфраструктурі.

На рис. 1 наведено приклад каскадного ефекту внаслідок ураження енергетичного об'єкта крилатою ракетою (це може бути не лише генеруючий об'єкт, а й трансформаторна підстанція або лінія передач). Як наслідок, відмова у системі постачання електроенергії може призвести до втрати зв'язку в інформаційних мережах, які, як показано на рисунку, можуть впливати на роботу банківської сфери та системи платежів у регіоні, а це призводить до неможливості обробки банківських транзакцій, більш того — створює загрозу безпеки фінансових операцій. У сучасній міській інфраструктурі системи телекомунікацій часто використовуються для управління транспортом, тому відмова системи телекомунікацій також може впливати на контроль за рухом транспорту, а відключення інформаційних панелей і світлофорів може призвести до транспортного колапсу в межах обласного міста.

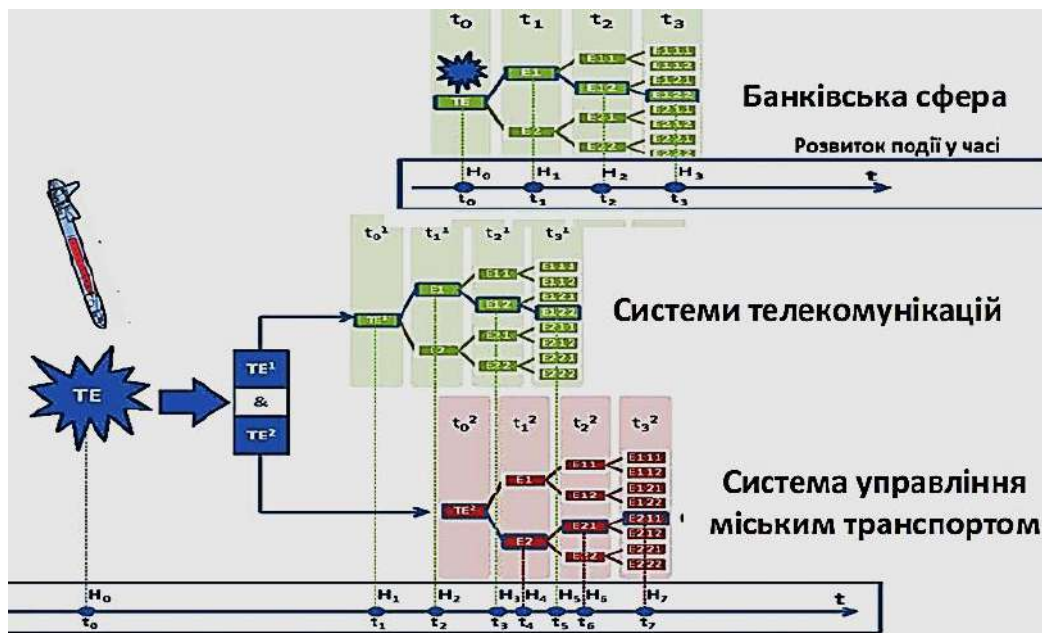


Рис. 1. Приклад каскадного ефекту внаслідок ураження енергетичного об'єкта

Отже, розуміння зв'язків, які реально існують між критичними інфраструктурами та іноді бувають прихованими, дуже важливо для розробки стратегій захисту та реагування на каскадні події, а також мінімізації їхніх наслідків [18]. Тому актуальність і доцільність сценарного аналізу виникнення та подальшого розвитку каскадних ефектів не викликає сумнівів, особливо в умовах воєнного стану в Україні.

Більш того, вона обумовлена необхідністю забезпечення резильєнтності та живучості об'єктів критичної інфраструктури [5, 7, 8]. На жаль, високий рівень загроз воєнного та терористичного характеру підсилюється технічною зношеністю та застарілістю більшості об'єктів КІ в Україні, що ускладнюється неможливістю належної експлуатації і ремонту обладнання КІ, а також дефіцитом кваліфікованого персоналу та обмеженими ресурсами [4].

Саме тому дуже важливим є застосування зрозумілих для фахівців методів сценарного аналізу та зручних комп'ютерних технологій моделювання, за допомогою яких імітується не лише послідовність каскадних подій, але й прогноуються їхні розвиток і наслідки.

Статтю присвячено огляду методів і технологій, які дозволяють виконувати якісний сценарний аналіз каскадних ефектів з метою створення імітаційної моделі їхнього розвитку. Безумовно такі моделі мають враховувати причинно-наслідкові зв'язки та динаміку розвитку подій, що дозволяє розрахувати кількісні параметри каскадних ефектів, включаючи наслідки на різні сфери суспільства. Знання, що отримані в процесі імітаційного моделювання, буде використано для вироблення управлінських рішень, підвищення резильєнтності критичних інфраструктур і мінімізації негативних наслідків при виникненні каскадного ефекту.

Огляд формальних методів сценарного моделювання каскадних ефектів

Мета сценарного аналізу полягає не в тому, щоби точно передбачити майбутній розвиток подій, а в тому, щоби дослідити якомога більше ймовірних сценаріїв розвитку каскадних процесів і на підставі отриманих знань розробити стратегії щодо пом'якшення та компенсації негативного впливу. Застосовуючи методи сценарного моделювання каскадних ефектів, можна суттєво покращити якість прийняття управлінських рішень і розробити стратегії щодо підвищення резильєнтності КІ.

За останні десятиліття в галузі системного аналізу було напрацьовано ряд проривних підходів і методів, які можуть з неабиякою ефективністю бути використаними для дослідження та прогнозування сценаріїв розвитку каскадних ефектів у критичних інфраструктурах України та інших держав. Серед найбільш відомих можна виділити такі методи як Cross-Impact Analysis (CIA) [22, 25], Interpretive Structural Modeling (ISM) [24, 26], Dynamic Modeling [12, 14, 19, 20], Cascading Effects in Risk Consequences Assessment (CERCA) [16], Network Analysis of Evaluating Cascading Impacts [29, 31, 33], Agent-Based Modeling (ABM) [36], Monte Carlo Simulation, Complex Event Simulation, Geographic Information Systems (GIS) [50, 64], Data Analytics and Machine Learning та Risk assessment methodologies [56]. Розглянемо кожен із цих напрямків детальніше з метою оцінки можливості їхнього застосування при сценарному аналізі каскадних ефектів для різних сфер як технічних систем, так і систем природного або соціального характеру.

Метод аналізу перехресного впливу

Найбільш відомим методом, який застосовується при аналізі складних систем, є Cross-Impact Analysis (CIA) — аналіз перехресного впливу [23, 35]. Цей метод дозволяє встановити причинно-наслідкові зв'язки між каскадними подіями,

враховуючи їхній перехресний вплив на визначений часовий горизонт. Метод ґрунтується на використанні висновків експертів щодо подій, які могли би охарактеризувати розвиток каскадного процесу на певному відрізку часу. Він визначає ключові чинники або вивчає зв'язки та взаємодію між різними факторами або подіями для встановлення, як вони впливають на розвиток процесів у системі. Базовим інструментом методу є використання матриць для оцінки їхнього впливу одного фактора або події на інші.

Події (Event), які на думку експертів підлягають розгляду при побудові сценарію, визначаються через $Ev_i, i = 1, \dots, N$. Вважається, що ці події адекватно характеризують сценарії розвитку каскадних подій.

Суть методу полягає в побудові так званої **матриці перехресного впливу** події на сценарії розвитку процесів [32]. Ця матриця визначає взаємний вплив подій і має розмірність $N \times N$, де N — кількість вибраних подій. Наприклад, якщо потрібно зробити передбачення щодо розвитку умовного процесу, для якого було визначено чотири важливі події, то класична матриця перехресного впливу може мати вигляд, показаний на рис. 2.

Подія	Відображення впливу			
	Ev_1	Ev_2	Ev_3	Ev_4
Ev_1		—	↑	—
Ev_2	—		—	↑
Ev_3	—			
Ev_4	—	↑	—	

Рис. 2. Матриця перехресного впливу для чотирьох подій

З наведеної матриці випливає, що перша подія Ev_1 впливає на третю подію Ev_3 , яка, у свою чергу, впливає на Ev_4 . Подія Ev_2 впливає на Ev_4 .

Далі виконується оцінка ймовірності того, що означені події можуть відбутися:

$$\left(P^{Ev}(Ev_i) \right), i = 1, \dots, N.$$

Після отримання оцінок ймовірностей для кожної значущої події $\left(P^{Ev}(Ev_i) \right), i = 1, \dots, N$ виконується формальна оцінка виникнення кожного можливого сценарію Sn_N з використанням механізму двійкової логіки 0 або 1. Кількість усіх можливих оцінок визначають числом 2^N . Для наведеного прикладу $N = 4$ кількість можливих оцінок сценарію $Sn_N = 2^N, 2^4 = 16$.

Формально всі можливі оцінки ймовірних сценаріїв розвитку подій Sn_N можна представити у вигляді матриці з набором чотирирозрядних величин.

(0000)	(1000)	(0100)	(0010)
(0001)	(1100)	(1010)	(1001)
(0110)	(0101)	(0011)	(1110)
(1011)	(1101)	(0111)	(1111)

Це означає, наприклад, що чотирирозрядна величина (0101) характеризує сценарій, який відбувається за умови настання двох подій Ev_2 та Ev_4 . Аналогічним чином описуються і всі інші варіанти ймовірних сценаріїв розвитку подій.

Метою методу CIA [7, 10] є формування детальної моделі для опису каскадних ефектів, для чого вводяться додаткові та більш конкретні поняття й характеристики подій і взаємозалежності між подіями. Методологія формування моделі опису каскадних ефектів складається з наступних етапів.

1. Документальна ідентифікація залежностей між факторами та подіями КІ. Наприклад, звіт про інцидент, який вказує на можливість каскадного ефекту, але фіксує що каскад не відбувся через сприятливі умови (завдяки успішному захисту електростанції від повені).

2. Вводяться два принципових поняття впливу події (Dependency Impacts — DI) і впливу системи (System Impacts — SI) на розвиток каскадного ефекту.

Dependency Impacts стосуються впливу початкових події Ev_{DI} на стан КІ (комунальна служба) через її залежність від інших КІ. Прикладом DI може бути збій у транспортній системі, якій призводить до того, що 25 % робітників КІ не можуть дістатися до свого робочого місця.

System Impacts стосуються результуючих впливів початкових подій Ev_{SI} на основну КІ внаслідок однієї або кількох подій Ev_{DI} . Прикладом системного впливу може бути втрата функціональності КІ через те, що 25–35 % персоналу КІ не дісталися до робочого місця, а альтернативний персонал не можна викликати.

3. Вказується ступень стійкості (резильєнтності) КІ — здатності системи підтримувати функціональність при певних показниках впливів подій Ev_{DI} та системних подій Ev_{SI} , тобто уникати впливу подій на КІ за умови, що сумарний вплив не перевищує певний показник (наприклад, кількісний або функціональний). Це може бути, наприклад, у формі резервування окремих вузлів КІ.

4. У моделі перехресного впливу обов'язково уточнюються та чітко визначаються умови настання тригерних подій, що запускають каскадний ефект з урахуванням залежностей від подій Ev_{DI} та системних подій Ev_{SI} DI або SI на кожному часовому інтервалі. Наприклад, коли збій транспорту відбувається в годину пік, то кількість персоналу, якій не встигає до початку роботи збільшується, або втрата 25 % персоналу призводить до більшого впливу на функціональність КІ під час періоду відпустки, ніж у порівнянні з іншими періодами часу через більші труднощі з викликом додаткового персоналу.

Метод перехресного впливу при аналізі каскадних подій допомагає досліджувати та розуміти взаємозалежність факторів і подій, дозволяючи особам, які приймають рішення, передбачати потенційні наслідки каскадних ефектів, визначати ризики та планувати їхнє усунення. CIA забезпечує структуровану основу для системного розгляду того, як різні фактори та події можуть впливати на КІ при виникненні каскадних подій.

Метод структурного моделювання

Метод інтерпретаційного структурного моделювання (Interpretive Structural Modeling — ISM) [24, 26] — це автоматизований метод розробки графічного відображення структури та складу каскадних ефектів. У такому представленні компоненти КІ представляються вузлами графа, а наявність певного зв'язку між ними вказується через спрямовані ребра графа. Фактично метод являє собою інтерактивний процес навчання, який дозволяє структурувати набір різних прямо та опосередковано пов'язаних каскадних факторів і подій у комплексну системну модель. Сформована таким чином модель відображає структуру складного процесу взаємодії КІ при настанні каскадного ефекту.

Методологія побудови формальної моделі взаємодії ключових факторів каскадних подій методом ISM складається з наступних кроків.

Крок 1. Побудова структурної матриці взаємодії (Structural Self-Interaction Matrix) між факторами та подіями. Для аналізу факторів і подій необхідно визначити семантичний зв'язок між факторами i та j через предикати типу «призводить до» або «впливає на». На основі цього розробляється матриця семантичних зв'язків між ідентифікованими факторами каскадного ефекту.

Крок 2. Формування матриці досяжності (Reachability Matrix) події від певних умов. Для цього розробляються правила, які встановлюють тип формалізованої взаємодії між факторами i та j (V , A , X або O) як в межах однієї КІ, так і взаємодії між різними структурами, де V — пряме відношення (i пов'язане з j); A — зворотне співвідношення (j пов'язане з i); X — представляє зворотний зв'язок між i та j ; O — немає зв'язку між i та j . Змінні i , j представляють, відповідно, стовпець i та рядки j матриці (таблиці). Тобто матриця взаємодії через заміну чотирьох символів (V , A , X або O), які визначають характер взаємодії між факторами i та j , на 1 або 0, перетворюється на формальну структуру для проведення комп'ютерного моделювання варіантів розвитку сценарію.

Крок 3. Розділ рівнів (Level partitions) для визначення ступеню (рівня) впливу фактора на розвиток сценарію каскадного ефекту. Для цього формальними методами розраховується перетин множин факторів і визначаються рівні різних факторів. Цей процес триває, доки не буде знайдено рівень кожного фактора. Поділ на рівні допомагає зрозуміти вплив різних факторів на сценарії розвитку каскадних ефектів.

Крок 4. Формування орграфа (Digraph). На підставі кінчної форми матриці досяжності формується модель каскадних процесів у вигляді орграфа, який включає вузли (фактори та події) і лінії ребер, перехідні посилення між факторами i та j . Після видалення непрямих зв'язків розробляється остаточний орграф, який використовується для представлення елементів каскадних ефектів і їхніх взаємозалежностей у термінах вузлів і ребер, іншими словами орграф — це візуальне представлення взаємозалежностей каскадних ефектів.

ISM є цінним для розуміння складних взаємозв'язків та оцінки впливів у системі, але він може бути обмежений своєю складністю, перевіркою транзитивності та надмірним спрощенням зв'язків. Метод, як правило, використовується на високому рівні для формування та дослідження візуальної моделі каскадних подій.

Комбінований метод CIA-ISM

Останнім часом спостерігається поєднання двох методів Cross-Impact Analysis and Interpretative Structural Modeling (CIA-ISM) [6, 10, 23] аналізу перехресного впливу та інтерпретаційного структурного моделювання в комбінований метод аналізу сценаріїв [10]. Таке поєднання дозволяє генерувати майбутні сценарії та аналізувати їхній розвиток на основі можливостей виникнення ідентифікованих подій і їхніх взаємозалежностей [23]. Комплексний метод дозволяє чітко встановити причинно-наслідкові зв'язки між факторами або подіями в динамічних ситуаціях, враховуючи їхній перехресний вплив, і відображувати розвиток каскадного ефекту у вигляді спрямованих графів з прив'язкою до часового горизонту подій. Кроки дослідження каскаду можуть складатися з послідовного застосування методів CIA та ISM.

1. Визначення ключових подій (CIA), що мають відношення до досліджуваної області, враховуючи їхню ймовірність і потенційні наслідки. Залучення експертів і консультації є вирішальними на цьому етапі.

2. Оцінка перехресного впливу (CIA) (позитивний, негативний або нейтральний) кожної події на кожну іншу подію зі списку. Це передбачає розгляд як прямих, так і непрямих ефектів і їхню кількісну оцінку за допомогою системи оцінки (наприклад, «+1» — для сильного позитивного впливу, «-1» — для сильного негативного впливу).

3. Створення матриці доступності (ISM) на основі аналізу перехресного впливу, в якій кожен рядок і стовпець представляють подію. Перетин двох подій (i, j) має позначку, якщо подія i впливає на подію j (як визначено на кроці 2).

4. Аналіз охоплення (ISM) визначає, які події можуть прямо чи опосередковано «досягти» інших подій, аналізуючи матрицю.

5. Кластерний аналіз (ISM) з метою групування подій на основі їхніх шаблонів досяжності та визначення кластерів подій зі схожими характеристиками та потенційними каскадними ефектами.

6. Інтерпретація моделі (ISM) для виявлення рушійних подій, їхньої взаємозалежності та потенційних шляхів розгортання каскадних ефектів.

7. Візуалізація моделі (ISM) за допомогою діаграм або блок-схем для кращого зрозуміння розвитку каскадів.

Метод CIA-ISM останнім часом використовувався у кількох дослідженнях з метою управління надзвичайними ситуаціями та ризиками, такими як ризики промислових КІ, надзвичайні ситуації землетрусів тощо. Результати застосування комбінованого методу створюють можливість допомоги керівникам і зацікавленим сторонам більш чітко уявити майбутні сценарії розвитку каскадних подій з метою прийняття рішення для управління надзвичайними ситуаціями.

Метод Делфі

При застосуванні методу CIA як окремо, так і у випадку комплексного методу CIA-ISM слід звернути увагу на методологічну організацію первинного дослідження каскадних ефектів. Найбільш поширеною методологією і досі залишається Delphi [23, 28], яка може застосовуватися для оцінки ймовірності виникнення каскадного ефекту та потенційних наслідків ризиків.

Метод Delphi доцільно використовувати при аналізі каскадних ефектів шляхом виявлення та синтезу експертних думок і розуміння складних або невизначених проблем, що пов'язані з каскадними катастрофами або критичними збоями інфраструктури. Цей підхід може допомогти зрозуміти потенційний причинно-наслідковий вплив кожної події на інші події, що важливо для оцінки каскадних ефектів.

Методологічною основою методу Делфі (Delphi Method) є отримання від експертів через опитувальні форми знань для оцінки ймовірності розвитку різних варіантів сценаріїв. Цей метод протягом його інтенсивного застосування набув значного розвитку та різноманітних інтерпретацій і сфер застосування від медичних і політичних прогнозів до сценаріїв розвитку технічних систем [23]. Але основна ідея методу Делфі залишається незмінною і полягає в проведенні фахівцями інтуїтивно-логічного аналізу проблеми з кількісною і якісною оцінкою суджень і формальним опрацюванням результатів. Опитувальні форми містять низку запитань, що передбачають відповіді за наперед визначеною формою, щоб кількісно оцінити значення певних змінних або характеристик. Одержані результати опитувань використовують для побудови можливих сценаріїв розвитку каскадних подій.

Порядок формування сценаріїв розвитку досліджуваного процесу або події методом Делфі включає проведення відповідних заходів.

1. Підбір групи експертів за тематикою дослідження та визначення проблеми, що виникла.
2. Формулювання мети розв'язання проблеми.
3. Розробка форми опитування для сформованої групи експертів.
4. Проведення опитування за розробленою формою.
5. Обробка статистичних даних опитування для синтезу результатів.
6. Аналіз отриманих результатів кожним експертом. При цьому експерт може враховувати відповіді та висновки всієї групи.
7. Якщо деякі експерти коригуватимуть свої відповіді, після виконання заходу 6, слід повторно обробити дані опитування згідно з п. 5.
8. Заходи п.п. 5–7 слід виконувати доти, поки експерти не припинять коригувати свої відповіді. Одержаний результат вважають консенсусним. Якщо після кількаразового виконання п.п. 5–7 у відповідях експертів немає стабільності, це свідчить про нерозв'язання сформульованої проблеми або про не зовсім вдалий підбір експертів і потребує повернення до п. 1 та повторення п.п. 1–8.
9. Консенсусне рішення експерти аналізують додатково, щоб інтерпретувати його та розробити сценарії розвитку досліджуваної системи.

Етапи проведення експертного опитування за методом Делфі показано на рис. 3.

Метод Делфі, попри його безсумнівні переваги, суперечливий. Найбільшою пасткою може бути конформізм експертів [28]. Деякі фахівці вважають, що ефект більшості може призвести до посилення ефекту пристосування експертів, ідеї яких відрізняються від загальної, і прийняття рішення, яке перемагає статистично.

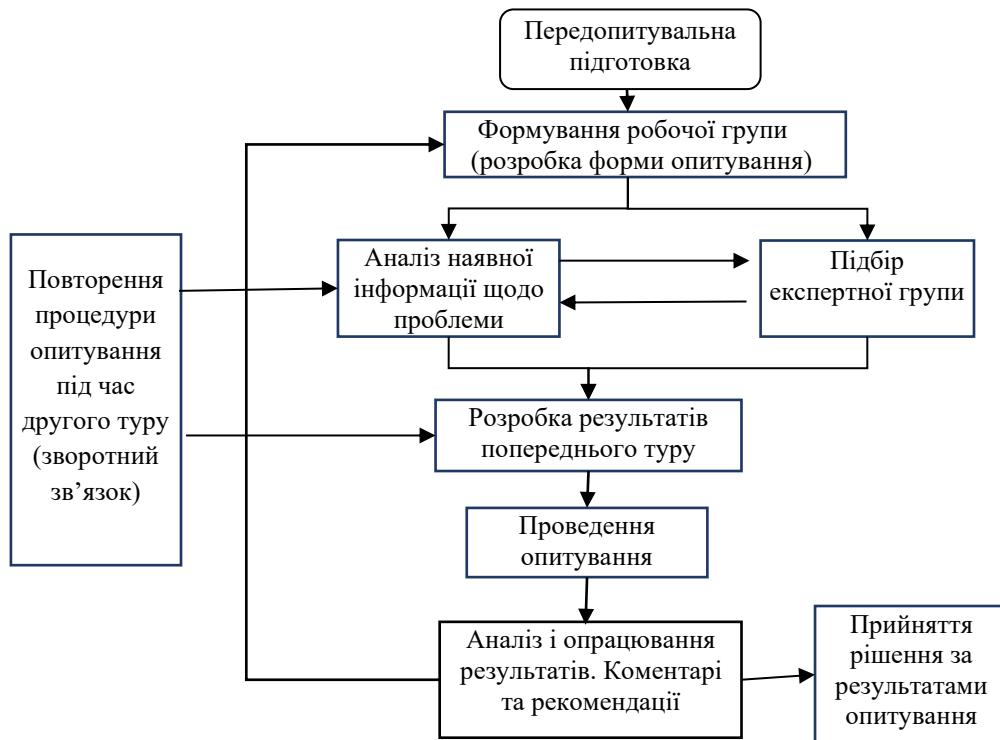


Рис. 3. Відображення етапів проведення експертного опитування за методом Делфі

Метод динамічного моделювання

Dynamic Modeling [12, 14, 19, 20] каскадних ефектів — забезпечує створення динамічних моделей, які представляють взаємодію між різними КІ в часі та просторі. Динамічне моделювання це потужний підхід до моделювання та аналізу каскадних ефектів у критичних інфраструктурах. Моделювання динаміки каскадних ефектів складається з наступних етапів [14, 20].

І. Побудова моделі

1. Ідентифікація, яка визначає системні межі, включаючи ключові компоненти та фактори, їхню взаємодію та визначення кількісних параметрів змінних.

2. Збір даних щодо динаміки системи та потенційних ініціюючих (тригерних) подій.

3. Вибір відповідного методу моделювання на основі уявлення про критичні інфраструктури та історичних даних. При цьому розрізняють три принципові підходи:

— моделювання на основі агентів для аналізу соціальних та економічних каскадів;

— моделювання динаміки системи через вивчення циклів зворотного зв'язку та часові затримки для сценаріїв виснаження ресурсів або збою інфраструктури;

— аналіз мережі з фокусуванням на інформаційні потоки або ресурси для дослідження кібернетичних атак.

II. Калібрування та валідація моделі

1. Налаштування параметрів моделі на основі історичних даних для забезпечення реалістичного сценарію розвитку каскадних подій та отримання точних прогнозів.

2. Аналіз чутливості — оцінка поведінки моделі на змінних вхідних параметрах для визначення критичних факторів (тригерів) впливів і невизначеностей.

3. Валідація методом порівняння прогнозованої моделі з реальними даними для переконання в коректності та передбачуваності побудованої моделі каскадного ефекту.

III. Моделювання сценарію розвитку каскадного ефекту

1. Проведення випробувань моделі каскадного ефекту на широкому спектрі можливих подій через завдання різних параметрів початкових факторів, які запускають процеси.

2. Проведення досліджень і спостережень за тим, як початкові події поширюються каскадом, викликаючи вторинні та третинні ефекти в різних доменах моделі.

3. Порівняльний аналіз умов моделювання з різними сценаріями та параметрами, щоб зрозуміти діапазон можливих каскадних траєкторій.

4. Виявлення вразливостей з метою визначення критичних вузлів і шляхів, найбільш чутливих до каскадних збоїв.

IV. Вироблення управлінських рішень

1. Вироблення стратегії стійкості для запобігання або мінімізації негативних впливів від каскадних ефектів на основі змодельованої поведінки.

2. Визначення ознак раннього попередження для потенційних збоїв та ініціювання своєчасних заходів попереднього реагування на можливі події.

3. Результати моделювання можуть стати основою для прийняття управлінських рішень і довгострокового планування для підвищення функціональної стійкості та резильєнтності критичних інфраструктур.

Слід підкреслити, що для побудови коректних моделей каскадних ефектів потрібні точні та вичерпні дані, які не завжди можуть бути доступними або стандартизованими. Тому при калібруванні та валідації моделі має бути знайдений правильний баланс між складністю моделі та можливістю інтерпретації, оскільки іноді занадто важко відкалібрувати та зрозуміти складні моделі [19]. Ще одним критичним фактором при створенні моделі є невизначеність і стохастичність. Це пов'язано з динамікою реальних інфраструктур, тому в процесі функціонування КІ можуть виникати випадкові та непередбачені події, які важко включаються в детерміновані моделі.

Так, у роботі [19] наведено приклад загального алгоритму динамічного моделювання каскадних подій в енергетичній системі. Алгоритм зосереджується на визначенні вхідних умов, мережевих і топологічних характеристиках, а також даних системних компонентів і контролерів, які потрібні для обчислення початкового стану системи, розміру кроку моделювання, часу моделювання та наборі початкових сценаріїв відмови $s \in S$. Після покрокового моделювання, включаючи всю динаміку подій, формується каскадний ланцюг подій для кожного сценарію розвитку. На основі цього можна обчислити різні каскадні метрики.

Зрозуміло, що кінцевий вплив каскадних збоїв важко всебічно оцінити, оскільки існують довгострокові потенційні втрати, такі як відшкодування та витрати на

технічне обслуговування, спричинені, наприклад, відключенням електроенергії. Як правило, для кожної конкретної галузі визначаються свої показники, які характеризують наслідки каскадних подій. Наприклад, очікуваний попит не виправдовується, зростає ризикова вартість або умовна ризикована вартість послуг у пов'язаних КІ та багато інших.

Algorithm 1: Dynamic Modelling Algorithm

Inputs: Network data, dynamic data of system components and controllers, a power flow solver, a simulation step size, simulation time, initial failure scenario $s \in S$

Procedure:

- 1: Initialise system state.
 - 2: for $s \leftarrow 1, |S|$ do
 - 3: Execute the initial outage(s).
 - 4: Check for network separation.
 if Yes, then
 Select a reference machine in each island.
 Update network admittance matrix.
 - 5: Check for island(s) with no generator.
 if Yes, then
 Trip the corresponding island(s).
 - 6: Simulate all islands simultaneously until any of the following occurs:
 if Simulation reaches the pre-set time, then
 Go to Step 8.
 if Any relay threshold is crossed, then
 Go to Step 7.
 - 7: Check for discrete events.
 if Yes, then
 Execute the event by changing relay output signal to TRUE.
 Go to Step 4.
 else
 Go to Step 6.
 - 8: End of simulation.
-

Outputs: A cascading chain of events and total demand loss for each initial failure scenario $s \in S$

Тобто, для коректного моделювання наслідків каскадних подій у суміжних КІ мають використовуватися ймовірні функції (empirical probability distribution functions EPDF) або додаткові кумулятивні функції розподілу (cumulative distribution functions CCDF), які дозволяють враховувати неявні матеріальні наслідки через втрати попиту. Безумовно, такі оцінки є важкими та передбачають корегування степеневого закону з двома ключовими властивостями цих розподілів, які зазвичай спостерігаються в історичних даних і змодельованих каскадах.

Незважаючи на ці проблеми, динамічне моделювання дає безцінне розуміння динаміки взаємодії каскадних ефектів у КІ [19]. Застосовуючи цей підхід, можна

отримати більш глибоке розуміння потенційних збоїв, розробити ефективні стратегії пом'якшення наслідків і створити більш стійкі КІ.

Методологія CERCA

Cascading Effects in Risk Consequences Assessment (CERCA) є однією з методологій, яка використовується для оцінки ризику геогідрологічного сценарію і оцінки каскадних ефектів [16]. Мета CERCA — запропонувати простий, ефективний, операційний інструмент, який можна адаптувати для багатьох цілей. Тобто CERCA позиціонується як інструмент для типового «аналізу сценарію» в контексті багатьох небезпек за допомогою якісної оцінки каскадних ефектів і наслідків для різних факторів ризику, зокрема з точки зору людських втрат. Історично CERCA зв'язується з тематичним дослідженням геогідрологічного каскаду подій, які відбувались у Россано (Калабрія, Італія) в період 2004–2021 рр.

Як правило, збір інформації, що стосується подій і їхніх наслідків, не є стандартизованим і різниться між суб'єктами, які збирають дані для різних цілей (наприклад, оцінка ефективності системи попередження, розпізнавання пошкоджень інфраструктури, плани відновлення та страхові відшкодування). Створення цієї бази знань на національному рівні може зайняти багато часу та потребувати людських ресурсів. Це вимагає доступу до даних, які часто є недостатніми та невизначеними і страждають через відсутність однорідності, що необхідно для створення баз даних із багатьма подіями з огляду на різні потреби, що пов'язані з інтегрованим управлінням ризиками.

Методологія CERCA розглядає проблему як аналіз типового сценарію через оцінку можливих каскадних ефектів і наслідків, що характеризуються причинно-наслідковим зв'язком, спричиненим тригерною подією (Triggering Event — TE). «Каскадний сценарій» відповідає ланцюжку або дереву подій, починаючи з TE, можливих різних явищ, які взаємодіють або незалежно генеруються однією і тією самою подією, і шкоди, завданої різним категоріям ризику. Концептуально каскадний сценарій складається з чотирьох етапів (рис. 4):

- 1) визначення та ретельний опис TE, які ініціюють каскадний ефект;
- 2) характеристика прояву каскадного ефекту (Representative Elementary Phenomena — REP) для класифікації видів подій;
- 3) установлення причинно-наслідкових зв'язків між явищами каскаду та пошкоджених елементів під загрозою (Damaged Elements at Risk — DEAR);
- 4) фатальні наслідки (Fatalities Circumstances — FC).

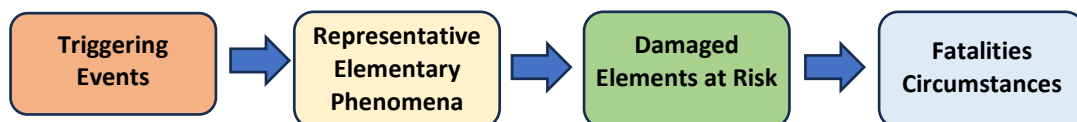


Рис. 4. Послідовність етапів методології CERCA для оцінки каскадних ефектів

Першим кроком побудови та оцінки каскадного сценарію є визначення типу TE. Для класифікації початкових умов виникнення каскадних ефектів типи TE, зазвичай, оформлюються у вигляді таблиці з атрибутами: <Ініціююча подія> <Код>

<Опис> (див. табл. 1). Безумовно, для класифікації початкових умов залучаються експерти.

Таблиця 1

Ініціююча подія	Код	Опис
Раптова повінь та інші швидко наступаючі повені (час концентрації ≤ 6 год)	ТЕ01	Повінь, спричинена екстремальними дощами протягом короткого періоду часу на відносно невеликій території, яка піднімається та спадає досить швидко з невеликим або без попереднього попередження
Повінь із середнім початком (час концентрації < 12 год)	ТЕ02	Річкова повінь, що відбувається в басейнах із часом концентрації менше 12 годин

Тригерна подія може спричинити дерево подій, що складається з одного ланцюжка елементів або кількох паралельних гілок, які викликають різні негативні явища або пошкодження. Наприклад, каскадні наслідки основної події, такої як повінь, що характеризується різними паралельними явищами (прорив дамби, затоплення, ерозія берега тощо) описуються різними незалежними шляхами, що виникають з тієї ж ТЕ. Методологія CERCA дозволяє розглядати ситуації, коли одночасно може виникати більше однієї ТЕ, що описуються як «паралельні небезпеки». Причому кожна із небезпек має окреме дерево подій.

Наступним етапом є визначення характеристик прояву каскадних ефектів Representative Elementary Phenomena — REP. Ідентифікація та класифікація характерних явищ (проявів) REP каскадного ефекту також виконується групою експертів. Явища, залежно від типу REP, описуються в термінах предметної області з наголосом на процеси, характеристики або локалізації. Сценарій каскадних подій може характеризуватися через різні явища, наприклад, гідрологічний сценарій розвитку характеризується явищами, які наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Ерозія та зсуви	Код
Ерозія	REP1
Ґрунтовий зсув	REP2
Нестійкість схилу, локально глибока	REP3
Каменепад	REP4
Сельовий потік	REP5
Воронка	REP6
Дренаж	
Затоплення через неадекватні дренажні або каналізаційні системи, поверхневий потік води	REP7
Руслові явища	
Часткове або повне перекриття мостів/звуження русла річки /потоків у великих (малих) річках	REP8
Підвищення рівня води у великих (малих) річках	REP9
Ерозія берегів у великих (малих) річках	REP10
Перенесення наносів у великих (малих) річках	REP11

Третій етап Damaged Elements at Risk стосується зв'язування від явищ з потенційними наслідками (завдання шкоди) на інфраструктуру. Так, прямі збитки спричинені фізичним контактом паводкової води з людьми чи майном і опосередковано

впливають на мережі та соціальну діяльність, спричиняючи додаткові витрати на заходи, що вжиті для запобігання іншим збиткам (наприклад, втрати виробництва для компаній). Крім того, можна розрізнити негайні чи віддалені наслідки (наприклад, переривання комунікаційних мереж і критичної інфраструктури) та матеріальні чи нематеріальні наслідки (наприклад, психологічні наслідки втрати життя, переміщення та пошкодження майна). Методи оцінки цих впливів варіюються від кількісних до якісних або описових. Приклад зв'язування явищ з наслідками (завдання шкоди) на інфраструктуру показано в табл. 3.

Таблиця 3

Код	Інфраструктура	Опис явища
E1	Приватні та громадські будівлі	Приватні домогосподарства, індивідуальна комерційна діяльність, офіси, інституційні будівлі, школи, університети, лікарні, центри охорони здоров'я, поліцейські/армійські дільниці, в'язниці тощо. а) пошкодження підвалу або першого поверху/дворів будівель; б) пошкодження конструкцій; в) пошкодження тимчасових конструкцій: риштування, намети, сцени, трибуни
E2	Транспортна інфраструктура	Дороги, мости, залізниці, аеропорти, гавані, метро, підземні переходи, та місця для паркування
E3	Оборонні споруди та гідротехнічна інфраструктура	Дамби, дренажні системи, берегові оборонні споруди тощо
E4	Промисловість	Виробничі та промислові об'єкти, ІРСС та установки
E5	Технологічна та сервісна інфраструктура	Лінії розподілу електроенергії, система водопостачання, очисники систем очищення стічних вод, радіо/телебачення, телефонні лінії

На останньому етапі Fatalities Circumstances фіксуються та аналізуються так звані фатальні наслідки, де вказуються збитки в різних сферах, включаючи і людські жертви.

CERCA надає простий, ефективний, інструмент, який можна адаптувати для багатьох цілей, таких як покращення систем раннього попередження та резильєнтності КІ від наслідків каскадних подій.

Приклад побудови дерева подій каскадного ефекту, яке розкриває причинно-наслідкові зв'язки між подіями за методологією CERCA, наведено на рис. 5. Тригерною подією каскаду визнана «Раптова повінь та інші швидко наступаючі повені» за класифікацією CERCA — TE01.

Наслідками події TE01 є каскад з такими характеристиками прояву REP (за класифікацією CERCA):

REP7: Затоплення через неадекватні дренажні або каналізаційні системи, поверхневий потік води;

REP8b: часткове або повне перекриття мостів/звуження русла річки/потоків (дрібні річки);

REP9b: Підвищення рівня води (малі річки);

REP10b: Ерозія берегів (малі річки);

- REP11b: Перенесення наносів (мали річки)
 - REP15b: Широке затоплення (дрібні річки);
 - REP19b: пошкодження/розрив дамби (дрібні річки).
- Повідомлено про збитки, що стосуються різних активів:
- E1: громадські та приватні будівлі;
 - E2: Транспортна інфраструктура;
 - E3: Оборонні споруди та гідротехнічна інфраструктура;
 - E5: Технологічна та сервісна інфраструктура;
 - E6: Здоров'я людини;
 - E7: Сільське землекористування;
 - E8: Інше.

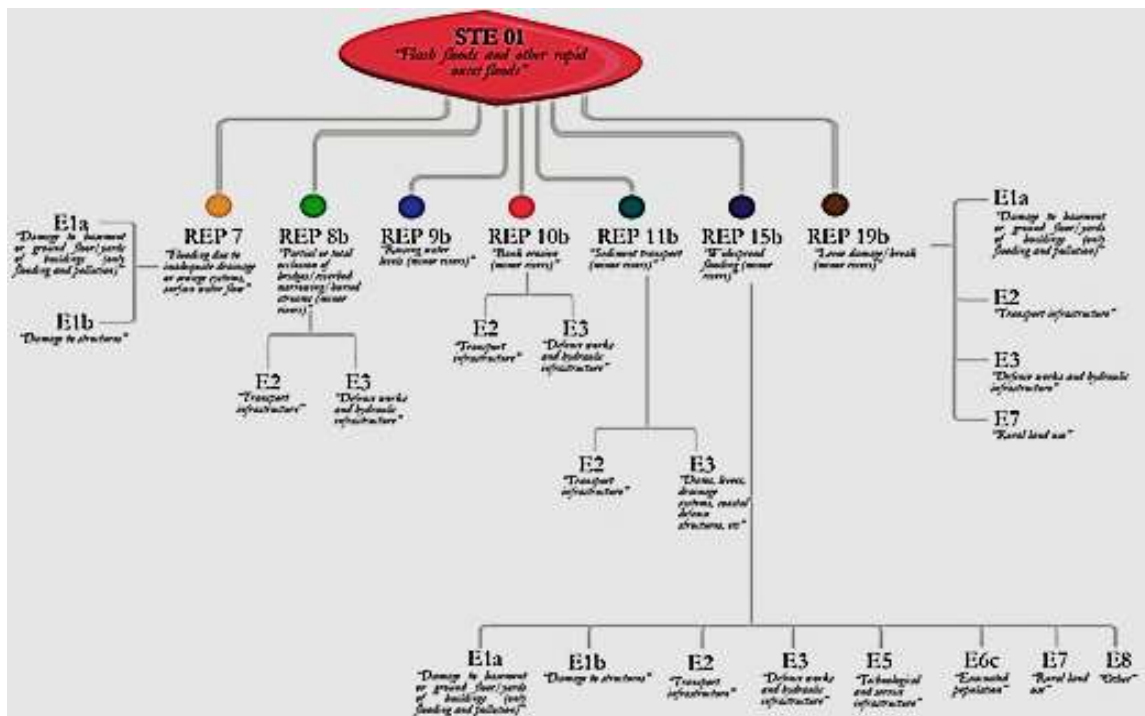


Рис. 5 Дерево подій зі сценаріїв, що пов'язані з TE01 за класифікацією CERCA

Отже, CERCA позиціонується як методологія для аналізу сценаріїв каскадних подій та управління ризиками, що пов'язані із багатьма небезпеками. Цей підхід базується на прозорій та інтуїтивно-зрозумілій методології класифікації подій і послідовного опису та дослідження розвитку взаємопов'язаних процесів, які ініційовані тригерними подіями. Ця методологія може адаптуватися для дослідження багатьох цілей, таких як розвиток каскадів природного походження, покращення систем раннього попередження та підвищення резильєнтності критичної інфраструктури.

Мережевий аналіз каскадних подій

Мережевий аналіз каскадних подій (Network Analysis of Evaluating Cascading Impacts) [29, 33] надає цінну основу для оцінки пульсаційних ефектів збоїв у

взаємопов'язаних критичних інфраструктурах. Відображаючи зв'язки та залежності між об'єктами, можна отримати уявлення про те, як ізольовані події можуть викликати широкомасштабні наслідки у взаємопов'язаних інфраструктурах. Методологія аналізу сценаріїв розвитку каскадних впливів для мережевих структур складається з наступних етапів.

I. Побудова мережевої моделі

1. Формування мережевої топології взаємодіючих критичних інфраструктур з визначенням вузлів, дуг, описом ваги та характеру з'єднань.

2. Визначення взаємозв'язків між компонентами інфраструктур і виявлення причино-наслідкових факторів, які спричинюють каскадні події. Це можуть бути фізичні зв'язки між різними компонентами КІ, інформаційні потоки або залежності технологічних процесів.

3. Визначення елементів ризику в критичних інфраструктурах (найбільш вразливі вузли інфраструктури, фінансові установи, соціальні наслідки).

II. Аналіз каскадних механізмів

1. Визначення переліку тригерних подій (початкових збоїв), які порушують мережеву взаємодію КІ (наприклад, стихійне лихо, кібератака, атака на об'єкт енергетичної структури).

2. Розуміння механізму розповсюдження та поширення каскадного ефекту мережею та загального впливу на її функціональну резильєнтність (наприклад, як збій в енергосистемі впливає на функціонування суміжних КІ, або розповсюдження вірусу на функціонування інформаційно-аналітичної системи, які фактори в цьому процесі відіграють ключову роль).

3. Моделювання та симуляція різних сценаріїв розвитку каскадних подій у мережі для дослідження і аналізу наслідків поширення ймовірних каскадних сценаріїв з метою отримання загального уявлення про потенційні наслідки.

III. Виявлення критичних елементів і вразливостей

1. Вимірювання центральності показників (вузлів) мережі для ідентифікації вразливих вузлів, а також вузлів з високим рівнем зв'язку, які можуть впливати на функціональність мережі.

2. Аналіз мережевого потоку з метою визначення критичних шляхів і вузьких місць мережі, які посилюють вплив на її функціональність.

3. Оцінка вразливості різних компонентів (вузлів) мережевої структури до збоїв і каскадних ефектів, враховуючи їхні вагові коефіцієнти та розташування в мережі.

IV. Оцінка каскадних впливів

1. Знаходження прямих і непрямих впливів на функціонування мережевої структури при виникненні каскадного ефекту. Кількісна оцінка та розрахунок прямих і вторинних наслідків каскадних подій для різних сценаріїв розвитку подій у мережі.

2. Просторова та часова динаміка сценаріїв поширення каскадного ефекту з урахуванням можливих петель (циклів) зворотного зв'язку та відстрочених ефектів.

3. Оцінка системних ризиків, потенціальних масових збоїв із визначенням сценаріїв, які можуть поставити під загрозу функціональність усієї критичної інфраструктури.

Мережевий аналіз відмінно справляється з представленням складних систем і їхніх взаємозалежностей, виявляючи критичні вузли, гальмівні точки або шляхи в мережі, які сприяють поширенню та посиленню каскадних впливів. Сферами застосування є моделювання розвитку каскадних подій в електричних, транспортних та комп'ютерних мережах, також вважається за доцільне застосування методу для моделювання поширення дезінформації на платформах соціальних мереж та інших сферах.

Метод мережевого аналізу оцінки каскадних впливів є потужним інструментом, який найкраще використовувати в поєднанні з іншими аналітичними методами. Поєднання його з такими методами як оцінка ризику, моделювання та аналіз даних, забезпечує повне розуміння каскадних впливів.

Метод агентного моделювання

Agent-Based Modeling (ABM) [36] є цінним методом для дослідження каскадних ефектів у складних системах. Він дозволяє моделювати поведінку окремих агентів у відповідь на зміни, що робить його корисним для прогнозування ефектів різних стратегій і моніторингу поведінки агентів. Головними етапами моделювання каскадних подій є наступні.

I. Розробка моделі каскадного процесу

1. Визначення ключових компонентів КІ, які зазнають каскадного ефекту, а також визначення агентів, які їх представляють (наприклад, електростанції у мережі, особи у спалаху хвороби).

2. Встановлення правил, що регулюють поведінку окремих агентів і їхню взаємодію один з одним і середовищем (наприклад, правила прийняття рішень, використання ресурсів, протоколи зв'язку).

3. Інтеграція даних про індивідуальну поведінку агентів і поведінку на рівні системи для калібрування та перевірки моделі.

4. Формування моделі каскадного процесу шляхом задання системи рівнянь.

II. Моделювання та аналіз результатів

1. Визначення та класифікація початкових подій, які потенційно можуть порушити функціонування КІ (наприклад, класифікація подій, що призводять до порушення подачі електроенергії, поширення захворювання).

2. Запуск процесу моделювання за різних початкових умов з метою дослідження, як імовірні початкові події поширюються в КІ, створюючи каскадні ефекти.

3. Аналіз результатів моделювання для відстеження стану ключових показників і факторів, які формують різні сценарії розвитку. До таких факторів можуть належати виснаження ресурсів, збої в роботі послуг або поширення хвороби серед змодельованої популяції.

III. Розуміння процесів і знаходження шляхів пом'якшення наслідків

1. Визначення критичних агентів і розуміння, як поведінка та взаємодія конкретних агентів впливає на розвиток каскадного ефекту, точно визначаючи критичні суб'єкти та шляхи.

2. Моделювання різних стратегій пом'якшення наслідків каскадних подій у КІ з метою оцінки різних сценаріїв управлінських рішень для запобігання або мінімізації ефекту каскаду.

3. Отримання уявлення про складну динаміку розвитку каскадних ефектів.

Переваги дослідження каскадного впливу на основі агентного моделювання полягають у тому, що метод дозволяє моделювати поведінку окремих об'єктів (агентів) у системі, забезпечуючи більш реалістичне розуміння каскадних ефектів порівняно з традиційними підходами моделювання зверху вниз. Сферами застосування АВМ при дослідженні каскадних ефектів можуть бути міське планування та управління інфраструктурою при розподілі ресурсів і надання послуг у міському середовищі, моделювання поширення соціальних рухів, культурних тенденцій або кампаній дезінформації, моделюючи індивідуальні взаємодії і обмін інформацією в соціальних мережах, поширення інфекційних захворювань та інших.

Метод Geographic Information Systems (GIS)

Метод Geographic Information Systems (GIS) і технології, які його підтримують, дозволяють виконувати моделювання каскадних ефектів, досліджувати динаміку сценарію та визначати залежності й різні класи взаємодій у розрізі географічних областей. GIS враховує такі геопросторові дані як моделі місцевості, розташування елементів КІ, відстані між об'єктами, характеристики рельєфу та гідрографії, державні і адміністративні кордони, транспортні мережі та комунікаційні мережі й інше.

У роботі [50] автори використовують геоінформаційну систему для аналізу каскадних ефектів, які виникають у взаємозалежних мережах критичної інфраструктури (водопостачання, зв'язку, електроенергії, транспорту тощо) під час повені. При цьому інтерфейс на основі географічної інформаційної системи інтегрований з імітаційною моделлю для візуалізації динамічної поведінки взаємозалежної імітаційної моделі у просторово-часовому середовищі. Це дозволяє визначити каскадні сценарії відмови КІ, щоб візуалізувати поширення відмови одного об'єкта КІ на інший КІ, що може вплинути на великі географічні області.

В іншій роботі група науковців [51] запропонувала нову методологію аналізу каскадних ефектів з побудовою БЗ і використанням GIS-технологій, яку представлено на рис. 6.

На рис. 7 показано фрагмент відображення результатів аналізу каскадних ефектів КІ на моделюючому комплексі ІПРІ НАН України [69].

Отже, дослідження сценаріїв поширення каскадних ефектів у просторі зумовлює необхідність обробки геопросторових даних і відповідно використання технологій GIS для кращого розуміння та передбачення взаємозалежності, які існують між об'єктами КІ іноді в прихованому виді. Це може допомогти визначити потенційні зони ризику, розташування пов'язаних об'єктів КІ та маршрути евакуації. Також GIS дозволяє швидко аналізувати та візуалізувати дані під час аварій для ефективнішого управління кризовими ситуаціями.

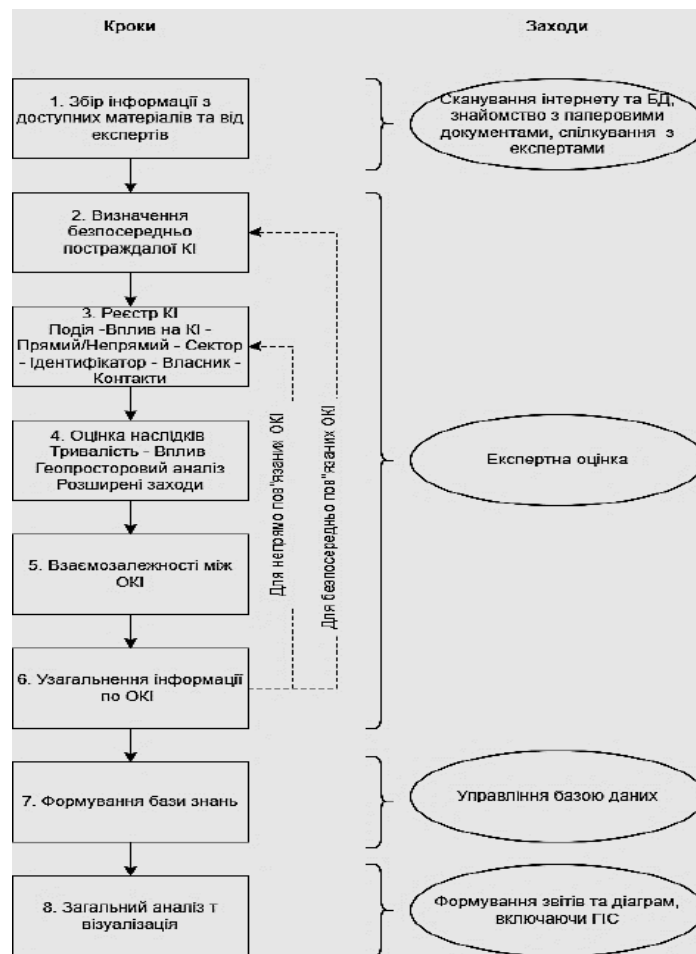


Рис. 6. Кроки аналізу каскадних ефектів у КІ

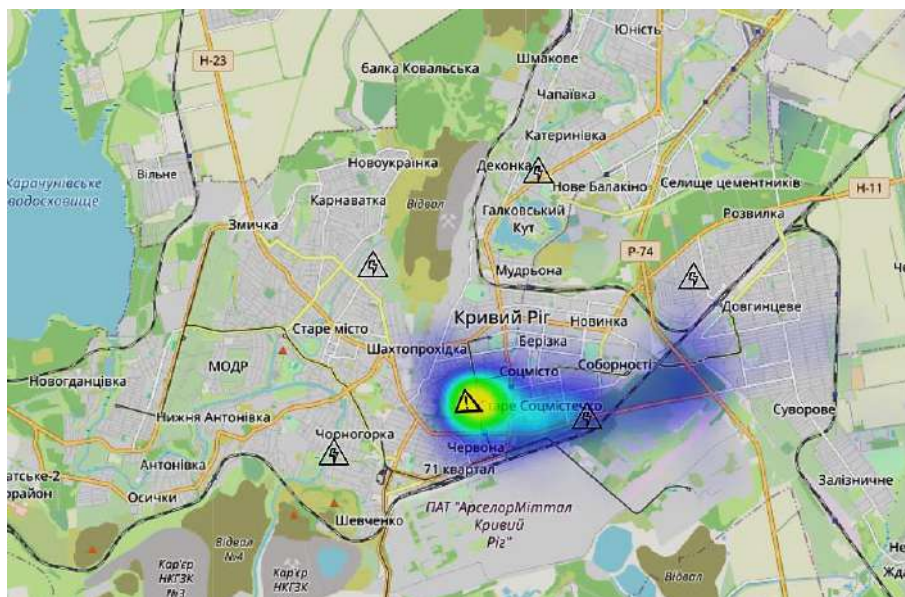


Рис. 7. Приклад візуалізації геопросторових даних

Метод Data Analytics and Machine Learning та Risk assessment methodologies

Як правило, на каскадні ефекти взаємодіючих КІ впливає велика кількість компонентів, факторів і різних умов виникнення тригерних подій. Завдяки прогресу в інформаційних технологіях і доступності великого обсягу даних, останнім часом у дослідженнях каскадних відмов усе більшу увагу приділяють методам Data Analytics and Machine Learning [50, 56, 57]. У контексті сценарного аналізу ці методи дозволяють доповнити модель процесів знаннями, що отримані шляхом систематизації та обробки історичних даних (накопиченого досвіду) [17]. Знання, що отримані внаслідок застосування методів Data Analytics, та результати змодельованих сценаріїв розвитку сприяють більш глибокому розумінню каскадних ефектів і їхніх впливів на стан пов'язаних КІ. Тому в нашому дослідженні розглянуто кілька робіт, які присвячено цьому перспективному підходу.

Так, у роботі [56] описано просторово-розподілену динамічну модель ризиків на основі подій для об'єктів критичної інфраструктури в енергетичній сфері. Ризик для об'єкта в момент часу визначається як сукупність компонентів: стан об'єкта, загроза катастрофи, вразливість об'єкта та потенційні збитки. У роботі [57] теж наведено приклад застосування методів машинного навчання для аналізу каскадних відмов і підвищення резильєнтності в енергетичних системах [14, 19, 31]. Для покращення функціональної стійкості енергетичних мереж до складу КІ включено програмні засоби моніторингу, оцінки стану структури, діагностики, прогнозування навантаження, прогнозування несправностей, безпеки енергосистеми, управління енергією та оптимізації. Автори, на основі аналізу накопиченого досвіду каскадних відмов, визначили три фази зміни стану каскадних ефектів в енергетичних системах, а саме:

1) Precursor phase — повільний прогрес помилок. Для пом'якшення впливу каскаду на цій фазі можуть бути використані такі методи як диспетчеризація, розвантаження та контрольоване відключення;

2) Escalation phase — швидке поширення збоїв у системі. Ця фаза розвитку вважається дуже стрімкою, тому запобігання відключень стає значно складнішим;

3) Phase-out — фаза, яка розглядає стан системи, коли значна кількість компонентів КІ внаслідок розповсюдження каскаду вже не працює. Тому природно, що швидкість поширення відмов знижується.

Для аналізу каскадних відмов за допомогою методів машинного навчання автори [57] запропонували таксономію, яка описує різні фази каскадних відмов, напрями досліджень і задачі моделювання та дослідження їхнього розвитку. Структуру цієї таксономії наведено в табл. 4.

Слід зазначити, що чітко визначена таксономія відіграє вирішальну роль у побудові моделі знань для конкретної предметної області. Таксономія при визначенні каскадних подій може встановлювати ієрархічну організацію понять і термінів у досліджуваній предметній області. Вона визначає зв'язки між різними поняттями, роблячи явними їхні узагальнення, спеціалізацію і асоціації. Встановлюючи загальний словниковий запас і набір визначень, таксономія сприяє узгодженості представлення інформації і зменшує неоднозначність і неправильне тлумачення всередині моделі знань.

Таблиця 4

Фаза каскаду	Напрями досліджень	Задачі дослідження та моделювання
Нормальна фаза	Аналіз вразливостей	Підходи на основі пошуку
		Підходи на основі класифікації
		Підходи на основі регресії
	Зміцнення мережі	
	Моделювання й імітація	Розрахунок потоку потужності та поширення відмов
		Моделювання та характеристика взаємодій у каскадному процесі
Моделювання тригерів каскадного збою		
Фаза перед виникненням каскаду	Аналіз початкової помилки	Виявлення причино-наслідкових зв'язків між тригерними подіями
	Передбачення каскадів	Прогнозування розміру каскаду
		Прогноз еволюції каскаду та часові аспекти
		Прогнозування шляху каскаду та зон ризику
	Каскадні коригувальні заходи	Диспетчеризація як каскадний коригувальний захід
		Скидання навантаження як каскадний коригувальний захід
Оптимізація як каскадний коригувальний захід		
Фаза ескалації каскаду та завершення		Розвиток подій каскаду для подальшого формування управлінських рішень
Фаза відновлення після каскаду	Відновлення КІ після збою	Оцінка варіантів реалізації оптимальних управлінських рішень
	Аналіз причин виникнення	Мінімізація наслідків

Використання моделі знань (накопиченого досвіду) при аналізі початкових (тригерних) умов каскадних ефектів може бути дуже корисним, тому що:

1) модель знань дозволяє системно описувати та виділяти ключові характеристики та причинно-наслідкові умови для виникнення каскадних ефектів, які сформовані на основі наявних емпіричних даних (накопиченого досвіду), включати офіційні звіти, розслідування, дослідження або повідомлення ЗМІ;

2) допомагає зрозуміти, як каскадні ефекти поширюються між різними КІ та впливають на стан і резильєнтність суспільства в цілому. Це може мати вирішальне значення для покращення стратегії екстреного реагування на каскадні події;

3) емпіричні знання сприяють виробленню більш обґрунтованих управлінських рішень, що забезпечують безпеку життя, зменшують негативні каскадні наслідки розширення інцидентів;

4) знання, які зібрані за допомогою методів Data Analytics and Machine Learning, надзвичайно корисні для формування більш реалістичної моделі каскадного ефекту, що, в свою чергу, дозволяє задавати детерміновані умови для моделювання більш реалістичних сценаріїв розвитку каскадів. Крім того, на підставі аналізу накопиченого досвіду (прецедентів) можна сформувані більш реалістичні вхідні дані для моделювання наслідків прийняття управлінських рішень і дій у напрямку захисту критичної інфраструктури та підвищення її резильєнтності.

Отже, не викликає сумнів, що ефективність моделі знань і методів Data Analytics and Machine Learning при аналізі початкових умов каскадних ефектів залежить від якості, повноти та відповідності даних Про. Тому важливо постійно оновлювати та вдосконалювати модель знань методами Machine Learning в міру появи нових даних.

Data Analytics and Machine Learning є взаємопов'язаними сферами, які використовують різні методи і алгоритми для витягання розуміння та знань із даних. Так, найбільш відомими алгоритмами Machine Learning є regression, decision trees, support vector machines (SVMs), and k-nearest neighbors (kNN). Вибір методу або алгоритму залежить від кількох факторів, зокрема: типу проблеми, характеру даних (позначені чи не позначені), розміру та складності даних тощо.

Метод Monte Carlo Simulation

Метод моделювання Монте-Карло використовується для моделювання нелінійних складних систем, які мають діапазон невизначених параметрів [70]. За допомогою використання випадкових значень, які базуються на розподілі ймовірностей у межах заданого діапазону, здійснюється стохастичне моделювання детермінованої моделі для дослідження впливу події на систему.

CI3 (Critical Infrastructures Interdependencies Integrator) — це програмне забезпечення, розроблене Argonne National Laboratories, моделювання за допомогою методу Монте-Карло для оцінки кількості часу, витрат для відновлення певного компонента/системи інфраструктури або взаємозалежного набору критичних інфраструктур до робочого стану.

Типовими програмними інструментами є Microsoft Excel (з Monte Carlo addins) і @RISK для ймовірностей розрахунків варіантів розвитку КЕ.

Порівняння методів сценарного аналізу

Загалом, методи аналізу сценаріїв є цінним інструментом для розуміння, прогнозування та пом'якшення наслідків каскадних ефектів. Вивчаючи різноманітні сценарії і їхні потенційні наслідки, дослідник отримує цінну інформацію для управління складними ризиками та підвищення готовності до майбутніх викликів.

Застосування методів і технологій дозволяє досліджувати різні сценарії, окрім найбільш імовірного результату, враховуючи потенційні тригери, альтернативні шляхи та несподівані наслідки каскадних ефектів, виявляти вразливості та критичні фактори, допомагаючи виявити потенційні слабкі місця в системах, які, швидше за все, можуть спровокувати або посилити каскадні ефекти.

Порівняння методів сценарного аналізу та моделювання каскадних ефектів, а також їхніх особливостей наведено в табл. 5. Різні методи сценарного аналізу каскадних ефектів мають певні переваги та недоліки, що робить процес вибору конкретного методу моделювання доволі складним.

Слід нагадати, що ефективність сценарного аналізу при моделюванні каскадних ефектів напряму залежить не тільки від обраного методу або комбінації методів, а й від якості і актуальності припущень і даних, які використовуються для побудови різних сценаріїв розвитку події.

Таблиця 5

Метод аналізу	Стислий опис методу дослідження	Технології та інструментальні засоби підтримки методів	Переваги методу	Недоліки	Особливості застосування
1. Cross-Impact Analysis (CIA) [22, 25]	Структурний підхід до аналізу пов'язаних подій, які впливають одна на одну в складній системі при виникненні каскадних ефектів, а також моделюванні стратегії управління ризиками при заданих обмеженнях. Може уточнювати сценарії та розкривати ключові чинники та невизначеності, полегшуючи їхню класифікацію за кластерами чи темами	ScenarioWizard — для аналізу перехресних впливів на події (free download) [40]. Cross Impact Matrix — інструмент для визначення впливу зв'язків на майбутні події [41]. SMIC Method Software — генерує послідовність можливих сценаріїв розвитку подій (downloaded free) [35] CIB-Lab — дослідження структурованих процесів для виведення ймовірних подій. CLASS Software — аналіз і створення сценаріїв із застосуванням аналізу перехресного впливу для підтримки прийняття рішень в умовах високої невизначеності [42]. NLTK (Natural Language Toolkit) Python бібліотека для обробки природною мовою настроїв, вилучення інформації, збагачення CIA текстовими даними [43].	Цілісне уявлення каскаду через взаємозв'язок з вторинними та третинними впливами, які інакше можна було б проігнорувати. Розробка комплексної стратегії управління ризиками на різних рівнях глибокого розуміння процесів. Пріоритизація критичних ресурсів для пом'якшення найбільш значних потенційних каскадів. Планування різних сценаріїв з урахуванням потенційних каскадних ефектів, що сприяє кращій готовності. Наглядна візуалізація, яка сприяє сприйняттю процесів сторонами з різними поглядами на потенційні ризики та наслідки.	Аналіз каскадних ефектів може бути складним і вимагає глибокого розуміння KI та її взаємозалежності. Точна оцінка вимагає даних, які не завжди можуть бути доступними або надійними. Передбачити повний масштаб і характер каскадних ефектів складно через невизначеність і непередбачені фактори. Моделі та інструменти можуть не повністю відобразити реальні складності каскадних ефектів.	Метод перехресного впливу при аналізі каскадних подій допомагає досліджувати та розуміти складність взаємозалежних факторів і подій, до яких факторів і особам, які приймають рішення, передбачати потенційні наслідки каскадних ефектів, визначати ризики та планувати їхнє усунення. Метод часто використовується при аналізі сценаріїв і досліджує структуровані процеси для виведення ймовірних подій у майбутньому в формі різних сценаріїв розвитку.
2. Interpretive Structuring Modeling (ISM) [24, 26]	Метод для аналізу та розуміння зв'язків між складними наборами факторів або елементів у системі. Надає цінну інформацію про причинно-наслідкові зв'язки, критичні чинники та потенційні точки впливу для втручання в KI.	MICMAC — створення, аналіз і візуалізація моделей ISM, автоматичні перевірки узгодженості, обчислення матриці досяжності та ідентифікація залежностей (open-source) [46]. Visual ISM — візуалізація сценаріїв або шляхів моделі через зміни факторів та поширення на інші фактори (open-source). Decision Explorer — пропонує функції, корисні для аналізу ISM матричну візуалізацію, дослідження сценаріїв та аналіз впливу.	Цілісний погляд, який фіксує взаємозв'язки елементів KI, забезпечуючи розуміння впливів один на одного. Структурований підхід для визначення, оцінки та візуалізації стосунків, сприяючи чіткій комунікації і співпраці. Ідентифікація ключових елементів допомагає точно визначити критичні зв'язки та залежні елементи в KI. ISM Аналіз останнє експертне судження з кількісними	Суб'єктивність в оцінці якості моделювання взаємодії суб'єктивності суджень та упередженості експертів Дані про парні зв'язки не завжди можуть бути достатніми або надійними Складність керування та інтерпретації моделей ISM великої розмірності Статистичний аналіз часто припускає лише фіксований набір елементів і	Основа для прийняття рішень відображуючи реальну картину подій та факторів, що впливають на каскадні процеси Комплексний системний аналіз для візуалізації структури складних процесів, що робить його цінним для розуміння взаємозв'язків між подіями Інтеграція з іншими методами, такими як мережевий аналіз для виявлення зв'язків між різними

Метод аналізу	Стислий опис методу дослідження	Технології та інструментальні засоби підтримки методів	Переваги методу	Недоліки	Особливості застосування
3. Cross-Impact Analysis and Interpretative Structural Modeling (CIA-ISM) [22, 25]	Комбінований метод CIA-ISM використовується для дослідження та планування сценаріїв розвитку каскадних ефектів з урахуванням різних тригерних подій і факторів ризику, а також у системному аналізі складних систем.	MICMAC — створення, аналіз і візуалізація моделей ISM, автоматичні перевірки узгодженості, обчислення матриці залежності та ідентифікація залежностей (open-source) [46] Visual ISM — візуалізація сценаріїв або шляхів моделі каскадних ефектів через зміни факторів і поширення на інші фактори (open-source) [47] NetLogo — платформа моделювання взаємодії елементів KI на основі агентів, адаптована для імітації каскадних ефектів методом CIA [38] R with ggplot2 — статистичний аналіз та обробка даних, які описують перехресний вплив подій методом CIA та візуалізації результатів ISM і CIA для формування загального розуміння сценаріїв розвитку каскадних процесів [39]	даними про парні відносини, пропонуючи баланс. Структурована основа для аналізу складних взаємодій і потенційних каскадних ефектів Отримання знань про зв'язки між різними факторами ризиків та прямими і непрямыми наслідками каскадних ефектів Послідання причинно-наслідкових зв'язків від ISM з оцінками впливу від CIA для визначення, які елементи, найімовірніше спровокують каскадні збої і визначити пріоритетність заходів з пом'якшення ризиків Повна карта ризиків і прогнозів розвитку каскадного ефекту з метою пом'якшити наслідків	зв'язків, що не відображає реальну динаміку Обидва методи CIA-ISM мають обмеження, такі як суб'єктивність і потенційні упередження в експертних оцінках Аналіз масштабних сценаріїв із великою кількістю подій може бути складним і трудомістким	критеріями, оцінки їхнього впливу та наслідків CIA-ISM використовується при: Формування стратегій Оцінки ефективності зниження ризиків Розумінні каскадних наслідків стихійних лих або кібератак Дослідженні точок впливу на втручання та альтернативних сценаріїв та їх наслідків ISM для виявлення причинно-наслідкових зв'язків між факторами, а CIA для оцінки впливів різних політичних подій.
4. Delphi Method [23, 28]	Метод збирання думки експертів за допомогою кількох раундів опитувань. Застосовується на попередніх етапах аналізу каскадних ефектів шляхом виявлення та синтезу експертних думок для розуміння складних або невизначених проблем та формування попереднього бачення ймовірних сценаріїв розвитку каскадів для пов'язаних KI	Mesydel — комп'ютерний інструмент підтримки функцій та методології опитування Delphi: збір даних, анкетування, обробка та аналіз якісних і кількісних питань, а також інструменти для формування та документального оформлення ймовірних сценаріїв розвитку каскадних подій [44] Web-Based Statistics Software for Delphi Method — веб-додаток для розробки протоколу дослідження під керівництвом експертів, відстеження відповіддей експертів для формування ймовірних сценаріїв розвитку каскадних подій [45]	Дослідження методом Delphi зазвичай включають два-три раунди з ретельно відібраною групою експертів. Ітераційність дозволяє експертам висвітлювати області розбіжності і невизначеності, визначаючи пріоритетні знання, які потребують подальшого дослідження каскадних ефектів Анонімний та ітеративний принцип дослідження допомагає пом'якшити індивідуальні упередження та спонукає експертів уточнювати свої	Методи Delphi забезпечують найнижчий рівень доказів для причинно-наслідкових висновків порівняно з методом мета-аналізу або дослідженнями кореляції. Якщо групові дискусії не проводили ретельно, вони можуть призвести до передчасного зближення домінуючої думки, нехтування різними точками зору та потенційного пропуску критичних міркувань.	Метод використовується для вирішення питань, де наявні знання недостатні або невизначені. Метод Delphi найкраще працює в поєднанні з іншими методами аналізу, такими як методи моделювання або аналіз даних, щоб забезпечити більш повне розуміння каскадних ефектів.

Метод аналізу	Стислий опис методу дослідження	Технології та інструментальні засоби підтримки методів	Переваги методу	Недоліки	Особливості застосування
5. Dynamic Modeling [12, 14, 19, 20]	Метод забезпечує створення динамічних моделей каскадних подій, які відображають взаємодію між різними факторами, подіями та елементами КІ в часі та просторі	Stella Online — веб-інструмент для динамічного моделювання, аналізу складних систем, вироблення політики та розробки сценаріїв розвитку процесів, а також вироблення стратегій пом'якшення негативних наслідків [48] Powersim Software — надає сімейство бізнес-інструментів, призначених для прогнозування та аналізу складних динамічних проблем, включаючи формування різноманітних сценаріїв розвитку[49]	Дозволяє моделювати складні КІ та каскадні процеси в часовому інтервалі, фіксуючи цикли зворотного зв'язку та нелінійні зв'язки між факторами. Забезпечує детальне причинно-наслідкове розуміння того, як різні фактори впливають один на одного, дозволяючи детально досліджувати сценарії. Допомагає зрозуміти поведінкові аспекти КІ і те, як вони реагують на зміни	Висновки можуть бути специфічними для вибраної групи експертів	Корисно для моделювання епідемій, фінансових потоків або розподілу ресурсів у каскадних подіях. Поєднання методу моделювання динаміки системи з агентним моделюванням дозволяє запропонувати як системне, так і індивідуальне розуміння каскадних подій
6. Cascading Effects in Risk Consequences Assessment (CERCA) [16]	CERCA пропонує структурований підхід для оцінки каскадних ефектів у межах оцінки ризиків. Метод використовується для розуміння непрямих наслідків каскадних ефектів. Використання методу дозволяє аналізу та ГПС забезпечує розуміння ступеню ризику не лише для господарської діяльності регіону, але й впливу наслідків на соціальній сфері на основі	Metod Delphi — виявлення та синтез експертних думок для розуміння процесів та причинно-наслідкових залежностей або неявних зв'язків між подіями [44, 45] Інструменти планування та моделювання сценарію на основі агентів (ABM): NetLogo — платформа моделювання взаємозалежності подій на основі агентів [38] Repast Simphony — платформа для моделювання взаємодій язаних процесів на основі агентів [37] R with ggplot2 — статистичний аналіз та обробка даних для CIA,	Цілісний погляд на взаємозв'язок КІ з визначенням вторинних і третинних впливів. Покращене управління ризиками шляхом удосконалення стратегії управління ризиками. Визначення вразливості КІ для пом'якшення наслідків. Планування різних сценаріїв розвитку	Якість моделювання дуже залежить від повноти даних. Низька якість даних перешкоджає точності та повноті оцінювання ризиків в конкретному регіоні. Метод покладатиметься на експертну оцінку, що може призвести до упрежденості та непослідовності в оцінці, особливо, якщо немає ретельного відбору експертів. Метод зосереджується на виявленні та оцінці прямих і безпосередніх	Тематичне дослідження для оцінки каскадних наслідків природних катастроф у густонаселених районах. Метод особливо корисний у контексті управління ризиками стихійних лих.

Метод аналізу	Стислий опис методу дослідження	Технології та інструментальні засоби підтримки методів	Переваги методу	Недоліки	Особливості застосування
7. Network Analysis of Cascading Impacts [29, 33]	Мережевий аналіз є підходом для оцінки каскадних впливів у складних системах. Цей метод передбачає представлення системи як мережі взаємозв'язаних вузлів і ребер, де вузли представляють стани або компоненти КІ, а ребра представляють відносини або зв'язки між подіями	визуалізація результатів ISM і CIA [39] GIS-технології — просторова візуалізація розповсюдження каскадних подій ArcGIS та QGIS [64] Natural Language Processing (NLP) Tools — збір та обробка текстових даних для виявлення приznak потенціальних каскадних подій на підставі історичних даних [55] Open-source Tools: Gephi — універсальний інструмент для аналізу та візуалізації мережі. Пропонують різні алгоритми, виявлення спільноти та можливості фільтрації [58] NetworkX: бібліотека Python для аналізу мережі. Підходить для програмних завдань та інтеграції аналізу мережі у великі робочі процеси [52] igraph: бібліотека Python для аналізу мережі, яка пропонує різноманітні функції, такі як виявлення спільноти, вимірювання центральності, комплексного аналізу мережі та створення випадкового графа для дослідження користувачів і [53]. NetLogo — агентно-орієнтована мова та інтегроване середовище розробки моделей сценаріїв [38]	Цілісне розуміння кожного впливу на мережевий розвиток каскадного ефекту Мережевий аналіз складних систем і їхніх взаємозалежностей, виявляючи критичні вузли, гальмівні точки або шляхи в мережі, які сприяють поширенню та посиленню каскадних впливів. Визначення критичних елементів, які мають значний вплив на розвиток мережевих процесів	наслідків початкової події. Може не повністю фіксувати довгострокові наслідки, вторинні каскадні події, викликані початковими впливами, або цикли зворотного зв'язку.	Підхід спрямований на створення візуальної моделі оцінки ризику мережі, яка відображає ієрархічний і структурований зв'язок між різними подіями, та шляхами передачі. Застосовується для вивчення загальної структури та визначення ключових вузлів мережі. Рекомендується поєднувати мережевий аналіз з аналізом даних, динамічним моделюванням, Делфі для розуміння впливів каскадних ефектів
8. Agent-Based Modeling (ABM) [36]	Агентне моделювання — це обчислювальний метод для моделювання дій і взаємодій автономних агентів (як окремих, так і колективних організацій, таких як	NetLogo — агентно-орієнтована мова програмування та інтегроване середовище розробки [38] GAMA — платформа для розробки ABM, яка надає інструменти для візуалізації, аналізу, оптимізації	Розуміння динаміки систем шляхом моделювання одночасних операцій та взаємодій кількох агентів, відтворюючи та прогнозуючи виникнення складних взаємозв'язків	Вимагає застосування обширних даних (які не завжди можуть бути достатніми) для коректного опису каскадних подій	Дослідження поширення інфекційних захворювань Фінансових каскадних подій Оцінка стійкості КІ при виникненні стихійних лих або кібератак на

Метод аналізу	Стислий опис методу дослідження	Технології та інструментальні засоби підтримки методів	Переваги методу	Недоліки	Особливості застосування
	<p>організації чи групи), щоб зрозуміти поведінку системи та те, що керує її результатами</p> <p>Метод дозволяє моделювати поведінку окремих агентів у відповідь на зміни стану системи. Використовується для прогнозування та оцінки різних стратегій розвитку каскадних ефектів</p>	<p>Технології та інструментальні засоби підтримки методів</p> <p>Repast Simphony — Java-платформа для розробки АБМ з підтримкою різноманітних методів моделювання [37]</p> <p>Python-agentspeak - інтерпретатор на основі Python для агентно-орієнтованої мови JASON [54]</p> <p>JASPY — Python-платформа для розробки АБМ, яка інтегрується з іншими бібліотеками Python [59]</p>	<p>Кожен агент в моделі має окремий стан, поведінку та цілі</p> <p>Адаптація методу до умов дослідження каскадних ефектів у різних областях</p> <p>Моделювання складної взаємодії між подіями КІ на основі моделі агента</p> <p>Розуміння поведінки каскаду шляхом деталізації взаємодії між подіями</p> <p>Тестування різних сценаріїв розвитку засобами моделювання</p>	<p>Дуже чутливий до початкових умов, що по-требує ретельного збалансування моделі між точністю та складністю, що не завжди можливо досягти</p> <p>Створення надійної АБМ-моделі вимагає особливої уваги до структури моделі, поведінки агента та параметризації</p>	<p>електромережі та транспортні мережі.</p> <p>Дослідження динаміки соціальних заворушень, моделювання ескаляції соціальних рухів</p> <p>Моделювання бойових дій у військовій науці для розуміння поведінки та результатів застосування різних стратегій</p>
<p>9. Geographic Information Systems (GIS) [64]</p>	<p>Моделювання каскадних ефектів і дослідження динаміки сценарію з визначенням залежності різних класів взаємодій у розрізі географічних областей. Метод враховує такі геопросторові дані як моделі місцевості, розташування елементів КІ, відстані між об'єктами, характеристики рельєфу та гідрографії, державні та адміністративні кордони, транспортні мережі та комунікаційні мережі та інші об'єкти</p>	<p>1. Платформи дистанційного зондування: — Landsat, Sentinel [61], MODIS [62] супутникові зображення для аналізу ґрунтового покриття, екологічного моніторингу та оцінки катастроф; — LiDAR [63] дані про висоту з високою роздільною здатністю для ризиків повеней, аналізу рельєфу та картографування інфраструктури.</p> <p>2. Відоображення та візуалізація каскадних ефектів Просторові бази даних QGIS [64] накладаючи карти початкової події (наприклад, зони затоплення) на шари, що представляють уразливі групи населення, інфраструктуру, критичні елементи)</p> <p>3. Аналіз даних і моделювання: — аналіз просторових даних, статистика та моделювання Python (GeoPandas [65]).</p>	<p>ГПС зображує каскадні ефекти у просторі, показуючи їхній вплив на конкретні місця, населення та інфраструктуру.</p> <p>ГПС поєднує різні дані (зокрема, безпечні зони, уразливі групи населення, інфраструктурні мережі) дозволяючи визначити зони ризику каскадних впливів і спрогнозувати їхнє потенційне поширення.</p> <p>Просторові моделі у поєднанні з мережним аналізом забезпечують розуміння динаміки розвитку каскадних подій з прив'язкою до місцевості. Наприклад, як знищений медичний заклад третинного рівня, вплине не лише на мешканців регіону, але й на функціональну стійкість системи охорони здоров'я.</p>	<p>Використання функцій ГПС часто вимагає спеціальних навичок і навчання, що потенційно обмежує доступність для деяких користувачів.</p> <p>Аналіз великих наборів даних і складних моделей вимагає значної обчислювальної потужності, що потенційно створює проблеми для користувачів з обмеженими ресурсами.</p> <p>Обмежена увага та розуміння сукупності наслідків безпеки, взаємозв'язку наслідків між катастрофами та небезпек нерозв'язання критичних можливостей, необхідних для швидкого управління наслідками!</p>	<p>Виявлення і дослідження широкого спектру загроз і небезпек для просторового моделювання наслідків каскадних подій</p> <p>Просторові моделі сценаріїв розвитку каскадних подій допомагають керівникам при плануванні дій при щодо пом'якшення наслідків НС</p> <p>Вивчення поширення лісових пожеж та їхнього впливу на громади та екологічні системи.</p> <p>Аналіз каскадного впливу стихійних лих, таких як повені, землетруси чи урагани, на інфраструктуру, населення та економічну діяльність.</p>

Метод аналізу	Стислий опис методу дослідження	Технології та інструментальні засоби підтримки методів	Переваги методу	Недоліки	Особливості застосування
10. Data Analytics and Machine Learning та Risk assessment methodologies [56, 57]	У контексті сценарного аналізу метод Data Analytics and Machine Learning та Risk assessment methodologies доповнюють розуміння причин та наслідків завдяки систематизації та обробці історичних даних (накопиченого досвіду) та змодельованих сценаріїв розвитку каскадних ефектів, які отримані на попередніх етапах.	<p>— моделювання на основі агентів NetLogo [38], Kerast Simphony [37] в просторовому контексті.</p> <p>— інструменти гідрологічного та екологічного моделювання HEC-RAS, SWMM [66].</p> <p>1. Аналіз даних:</p> <p>NLTK (Natural Language Toolkit) — Python-бібліотека для обробки природною мовою настроїв, вилучення інформації, збагачення CIA текстовими даними [43]</p> <p>TensorFlow — безкоштовна бібліотека програмного забезпечення з відкритим кодом для машинного навчання та штучного інтелекту [67].</p> <p>PyTorch — відкрита бібліотека машинного навчання на основі бібліотеки Torch, що застосовується для задач комп'ютерного бачення та обробки природної мови [68]</p> <p>RiskWatch — хмарна платформа для моделювання ризиків, планування сценаріїв і звітування</p>	Виявлення закономірностей та тенденцій в історичних даних для визначення тригерних подій та дослідження залежностей, що сприяють каскадним ефектам Покращене передбачення та розуміння завдяки машинному навчанню на історичних даних візуалізація складних каскадних ефектів і ризиків за допомогою аналізу даних Виявлення причинно-наслідкових зв'язків із використанням ймовірнісних Байєсовських мереж.	Ефективність методів напряму залежить від наявності високоякісних і релевантних даних.	Сценарна методологія для кількісної оцінки ризику каскадних катастроф, що викликані сейсмічними подіями або природними факторами Оцінка інженерних ризиків розвитку каскадних подій в КІ Аналіз вразливості елементів електромереж на підставі дослідження великої кількості факторів та подій, які впливають на розвиток каскадних подій.

Висновки

Представлено результати огляду методів і комп'ютерних технологій сценарного аналізу, що використовуються в інших галузях дослідження складних систем. Метою такого огляду є оцінка можливості адаптації існуючих методів до задач сценарного аналізу функціонування КІ під впливом каскадного ефекту.

Хоча дослідження продемонстрували подібність цих процесів у різних системах, сприяючі фактори та основні механізми взаємодії у каскадах відрізняються між системами.

Сценарний аналіз каскадних ефектів, незалежно від обраного методу моделювання або технології, дозволяє отримати цінні знання щодо розвитку самого каскадного процесу, тригерних подій, потенційних наслідків, імовірних впливів на взаємопов'язані критичні інфраструктури. Цей аналіз може допомогти визначити потенційні ризики та вразливі місця, а також надавати необхідні знання щодо розвитку процесів для прийняття збалансованих рішень, які можуть пом'якшити негативні наслідки каскадних подій.

Слід пам'ятати, що критичне мислення та експертне судження залишаються вирішальними факторами ефективності будь-яких методів і технологій сценарного аналізу каскадних ефектів, оскільки саме ці фактори створюють умови для забезпечення достовірності моделей і коректної інтерпретації результатів моделювання.

Дійсне дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи «Розроблення та дослідження методів і комп'ютерних технологій сценарного аналізу каскадних ефектів пов'язаних критичних інфраструктур» (шифр «SACE-24»).

1. EU Matrix PROTECT D3.1 Description of Best practices and Technologies. URL: https://protect-cities.eu/wp-content/uploads/2020/07/PROTECT_D3.1_Description-of-Best-practices-and-Technologies-v1.0.pdf

2. Додонов О.Г., Горбачик О.С., Кузнецова М.Г. Підвищення безпеки критичних інфраструктур засобами автоматизованих систем організаційного управління. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2022. Т. 24, № 1. С. 74–81. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2022.24.1.262817>.

3. Додонов О.Г., Сенченко В.Р., Путятін В.Г., Бойченко А.В., Коваль О.В. Методологічні та технологічні аспекти комп'ютерного моделювання сценаріїв прийняття рішень. *Математичні машини і системи*. 2023. № 3. С. 65–88.

4. Мурасов Р., Мельник Я., Марко В. Порівняння існуючих методик оцінювання загроз і ризиків для потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури в зоні ведення бойових дій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2022. **45**(3). С. 32–36.

5. Argyroudis S.A., Mitouli S.A., Chatzi, E., Baker J.W., Brilakis I., Gkoumas K., Linkov I. Digital technologies can enhance climate resilience of critical infrastructure. *Climate Risk Management*. 2022. **35**, 100387.

6. Miguel Ramirez de la Hueraga, Victor A. Bañuls Silvera, Murray Turoff. A CIA–ISM scenario approach for analyzing complex cascading effects in Operational Risk Management. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197615001633>

7. Henrik Hassel, Jonas Johansson, Alexander Cedergren, Linn Svegrup, Björn Arvidsson1, Method to study cascading effects Anders Lönnermark at SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (SP Technical Research Institute of Sweden) 2014. URL: https://casceff.eu/media2/2016/02/D2.1-Deliverable_Final_Ver2_PU.pdf

8. Linkov I., Trump B., Trump D., Pescaroli J., Hynes G., Mavrodieva W., Panda A. Resilience stress testing for critical infrastructure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2022. 103323.

9. Große C. (2020). Towards systemic governance of critical infrastructure protection: State and relevance of a Swedish case (Doctoral dissertation, Mid Sweden University). URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1439568/FULLTEXT01.pdf>

10. Renlong Wang, Endong Wang, Lingzhi Li, Wei Li Evaluating the Effectiveness of the COVID-19 Emergency Outbreak Prevention and Control Based on CIA-ISM. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/12/7146>
11. Lee A.B. A Quantitative Research Study on Probability Risk Assessments in Critical Infrastructure and Homeland Security. 2022.
12. Jiajia Song, Eduardo Cotilla Sanchez, Goodarz Ghanavati, Paul D.H. Hines. Dynamic Modeling of Cascading Failure in Power Systems. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7127056/authors#authors>
13. Daponte P., & Paladi F. (Eds.). Monitoring and Protection of Critical Infrastructure by Unmanned Systems. 2023. Vol. 63. IOS Press.
14. Yitian Dai, Matthias Noebels, Mathaios Panteli, Robin Preece. Evaluating the Effect of Dynamic and Static Modelling on Cascading Failure Analysis in Power Systems. 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9495001>
15. Maltezos E., Skitsas M., Charalambous E., Koutras N., Bliziotis D., & Themistocleous K. (2016, August). Critical infrastructure monitoring using UAV imagery. In Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2016) (Vol. 9688. P. 220–226). SPIE.
16. Daniela Biondi, Graziella Emanuela Scarcella, Pasquale Versace CERCA (Cascading Effects in Risk Consequences Assessment): An operational tool for geo-hydrological scenario risk assessment and cascading effects evaluation. URL: <https://iwaponline.com/hr/article/54/2/189/93397/CERCA-Cascading-Effects-in-Risk-Consequences>
17. Kootala A., Mousa A., Pong P.W. Drones are Endangering Energy Critical Infrastructure, and How We Can Deal with This. *Energies*. 2023. **16**(14). 5521.
18. Di Pietro R., Raponi S., Caprolu M., Cresci S., Di Pietro R., Raponi S., Cresci S. Critical infrastructure. *New Dimensions of Information Warfare*. 2021. P. 157–196.
19. Yitian Dai, Robin Preece, and Mathaios Panteli. Benefits and Challenges of Dynamic Modelling of Cascading Failures in Power Systems. 2022. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2207/2207.03389.pdf>
20. Giulio Zuccaro, Daniela De Gregorio, Mattia F. Leone. Theoretical model for cascading effects analyses. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420918305041>
21. Noel A.B., Abdaoui A., Elfouly T., Ahmed M.H., Badawy A., & Shehata M.S. Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. **19**(3). P. 1403–1423.
22. Cascade effect. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cascade_effect
23. Víctor A. Bañuls, Murray Turoff. Scenario construction via Delphi and cross-impact analysis. URL: http://www.huaxuejia.cn/ism/cia_aism/paper/files/CIA-ISM-1.pdf
24. Rajesh Attri, Nikhil Dev and Vivek Sharma. Interpretive Structural Modelling (ISM) approach. *An Overview Research Journal of Management Sciences*. Feb. 2013. Vol. 2(2). P. 3–8. ISSN 2319–1171.
25. Cross-Impact Analysis. URL: <http://foresight-platform.eu/community/forlearn/how-to-do-foresight/methods/analysis/cross-impact-analysis/>
26. Ahmad N., Qahmash A. SmartISM: Implementation and Assessment of Interpretive Structural Modeling. *Sustainability* 2021. **13**. 8801. URL: <https://doi.org/10.3390/su13168801>. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/8801>
27. Rajesh Attri, Nikhil Dev, Vivek Sharma Interpretive Structural Modelling (ISM) approach: An Overview. URL: <https://www.isca.in/IJMS/Archive/v2/i2/2.ISCA-RJMS-2012-054.php>
28. Harold A. Linstone and Murray Turoff. The Delphi Method Techniques and Applications. URL: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/29694542/delphibook.pdf>
29. Wetterwald Jeremy, Yaroslav Smirnov. (2018) Using Network Analysis to Evaluate the Cascading Impacts of Crises on Service and Market Systems. URL: https://www.preventionweb.net/files/65950_f45finalwetterwaldjeremyusingnetwor.pdf
30. Закон України «Про критичну інфраструктуру». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>
31. Fan Yang, Ji Qiao, Mengjie Shi, Zixuan Zhao, Rui Liu Cascading Event Analysis in Distribution Networks Based on High-Dimensional Factor Models (2023) 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/10135545/proceeding>
32. Cross-Impact Analysis — European Foresight Platform — AIT. URL: <http://foresight-platform.eu/community/forlearn/how-to-do-foresight/methods/analysis/cross-impact-analysis/>
33. Додонов О.Г., Кузьмичов А.І. Мережеві організаційні структури управління. Моделювання та візуалізація засобами Excel. Київ: Вид-во «Ліра-К», 2021. 264 с. ISBN 978-617-520-049-0.
34. Miguel Ramirez de la Huerca, Víctor A. Bañuls, Murray Turoff. A Scenario — based approach

for analyzing complex cascading effects in Operational Risk Management. URL: https://www.researchgate.net/publication/277330793_A_Scenario_-_based_approach_for_analyzing_complex_cascading_effects_in_Operational_Risk_Management

35. Cross-Impact Analysis. URL: <http://foresight-platform.eu/community/forlearn/how-to-do-foresight/methods/analysis/cross-impact-analysis/>

36. Michael John North, Eric Tatara, Nicholson Collier, J. Ozik. Visual agent-based model development with repast symphony. URL: https://www.researchgate.net/publication/236555809_Visual_agent-based_model_development_with_repast_symphony/1

37. Repast Symphony. URL: https://repast.github.io/repast_symphony.html

38. NetLogo. URL: <https://github.com/NetLogo/NetLogo>

39. Graphics with ggplot2. URL: <https://www.statmethods.net/advgraphs/ggplot2.html>

40. Scenario Wizard 6.0. URL: <https://scenario-wizard.software.informer.com/>

41. Cross Impact Matrix. URL: https://discoveryoursolutions.com/toolkit/cross_impact_matrix.html

42. CIASS Software. URL: https://www.researchgate.net/figure/CIASS-wwwciassorg_fig5_307476122

43. NLTK (Natural Language Toolkit). URL: <https://github.com/nltk/nltk>

44. Mesydel <https://github.com/mesydel>

45. Web-Based Statistics Software for Delphi Method. URL: <https://www.stat59.com/about/delphi-method-software>

46. micmacIGN/micmacPublic. URL: <https://github.com/micmacIGN/micmac>

47. Interpretative Structural Modeling. URL: <https://exsimpro.com/software/>

48. Powerful modeling and diagramming capabilities on any web browser. URL: <https://www.iseesystems.com/store/products/stella-online.aspx>

49. Powersim Software. URL: <https://powersim.com/>

50. Nukavarapu N., & Durbha S. Interdependent healthcare critical infrastructure analysis in a spatiotemporal environment: A case study. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. **9**(6). 387.

51. Rajarajan S.R. (2021). Risk assessment dashboard to visualize the cascading effects of critical infrastructure service failure due to natural hazards (Master's thesis, University of Twente).

52. NetworkX Software for Complex Networks <https://github.com/networkx>

53. Igraph. URL: <https://github.com/search?q=igraph&type=repositories>

54. python-agentspeak <https://github.com/niklasf/python-agentspeak/blob/master/setup.py>

55. Top 10 Natural Language Processing tools and platforms. URL: <https://aimagazine.com/top10/top-10-natural-language-processing-tools-and-platforms>

56. Maryna Zharikova, Volodymyr Sherstjuk, Oleg Boskin, Irina Dorovska. Event-Based Approach to Multi-Hazard Risk Assessment. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2805/paper19.pdf>

57. Naeem Md Sami, Mia Naeini. Machine Learning Applications in Cascading Failure Analysis in Power Systems: A Review <https://arxiv.org/pdf/2305.19390.pdf>

58. The Open Graph Viz Platform. URL: <https://gephi.org/>

59. jasy2. URL: <https://github.com/jasy2/jasy2>

60. Miguel Ramirez de la Huerga, Víctor A. Bañuls, Murray Turoff. A Scenario - based approach for analyzing complex cascading effects in Operational Risk Management. https://www.researchgate.net/publication/277330793_A_Scenario_based_approach_for_analyzing_complex_cascading_effects_in_Operational_Risk_Management

61. Sentinel. URL: <https://www.sentinel-hub.com/pricing/>

62. MODIS Web. URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>

63. LiDAR-сканування. URL: <https://mirnychyj.com.ua/lidar/>

64. A Free and Open Source Geographic Information System. URL: <https://qgis.org/en/site/>

65. GeoPandas. URL: <https://geopandas.org/en/stable/>

66. Storm Water Management Model (SWMM). URL: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

67. TensorFlow. URL: <https://www.tensorflow.org/>

68. Pytorch. URL: <https://pytorch.org/>

69. Бойченко А.В., Сенченко В.Р. Підхід до моделювання геопросторових каскадних ефектів критичних інфраструктур. *Інформаційні технології та безпека*. 2023. **56**(7). С. 35–38.

70. Joongyeub Yeo and George Papanicolaou. Random matrix approach to estimation of high-dimensional factor models. <https://arxiv.org/abs/1611.05571>

Надійшла до редакції 27.03.2024