

МІЖДИСЦИПЛІНАРНІСТЬ І ТЕОРІЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Наукові дослідження та їх впровадження в освітні технології стають ефективними тоді, коли природу подій чи явищ можна розглядати з єдиних позицій, виробити універсальний підхід до них, сформувавши загальні закономірності. Більшість сучасних фундаментальних наукових проблем і високих технологій тісно пов'язані з явищами, які лежать на границях різних рівнів організації. Природничі та деякі з гуманітарних наук (економіка, соціологія, психологія) розробили концепції і методи для кожного із ієрархічних рівнів, але не володіють універсальними підходами для опису того, що відбувається між цими рівнями ієрархії. Неспівпадання ієрархічних рівнів різних наук – одна із головних перешкод для розвитку дійсної міждисциплінарності (синтеза різних наук) і побудови цілісної картини світу. Виникає проблема формування нового світогляду і нової мови.

Теорія складних систем — це одна із вдалих спроб побудови такого синтезу на основі універсальних підходів і нової методології [1]. В російськомовній літературі частіше зустрічається термін “синергетика”, який, на наш погляд, означає більш вузьку теорію самоорганізації в системах різної природи [2].

Мета роботи – привернути увагу до нових можливостей, що виникають при розв'язанні деяких задач, виходячи з уявлень нової науки [3].

На жаль, теорія складності не має до сих пір чіткого математичного визначення [4] і може бути охарактеризована рисами тих систем і типів динаміки, котрі являються предметом її вивчення. Серед них головними є:

- Нестабільність: складні системи прагнуть мати багато можливих мод поведінки, між якими вони блукають в результаті малих змін параметрів, що управляють динамікою.

- Неприводимість: складні системи виступають як єдине ціле і не можуть бути вивчені шляхом їх розбиття на частини, що розглядаються ізольовано. Тобто, поведінка системи зумовлюється взаємодією складових, але редукція системи до її складових спотворює більшість аспектів, які притаманні системній індивідуальності.

- Адаптивність: складні системи часто включають множину агентів, котрі приймають рішення і діють, виходячи із часткової інформації про систему в цілому і її оточення. Більш того, ці агенти можуть змінювати правила своєї поведінки на основі такої часткової інформації. Іншими словами, складні системи мають здібності черпати скриті закономірності із неповної інформації, навчатися на цих закономірностях і змінювати свою поведінку на основі нової поступаючої інформації.

- Емерджентність (від існуючого до виникаючого): складні системи продукують неочікувану поведінку, котру неможливо передбачити на основі знань властивостей їх складових, якщо розглядати їх ізольовано.

Ці та деякі менш важливі характерні риси дозволяють відділити просте від складного, притаманного найбільш фундаментальним процесам, які мають місце як в природничих, так і в гуманітарних науках і створюють тим самим істинний базис міждисциплінарності. За останні 30–40 років в теорії складності було розроблено нові наукові методи, які дозволяють універсально описати складну динаміку, будь то в явищах турбулентності, або в поведінці електорату напередодні виборів [4, 5].

Поява сучасних ЕОМ і створення комп'ютерних моделей дозволило вперше в історії науки проводити експерименти в таких галузях як екологія, соціологія, економіка, політологія та ін. так, як це завжди робилось в природничих науках. Але комп'ютерне моделювання

спричинило розвиток і нових теоретичних підходів: фрактальної геометрії і р-адичної математики, теорії хаосу і самоорганізованої критичності, нейроінформатики і квантових алгоритмів тощо. Теорія складності дозволяє переносити в нові галузі дослідження ідеї і підходи, які стали успішними в інших наукових дисциплінах, і більш рел'єфно виявляти ті проблеми, з якими інші науки не стикалися. Узагальнюючому погляду з позицій теорії складності властиві більша евристична цінність при аналізі таких нетрадиційних явищ, як глобалізація, “економіка, що заснована на знаннях” (knowledge-based economy), національні і світові фінансові кризи, економічні катастрофи і ряд інших.

Однією з інтригуючих проблем теорії є дослідження властивостей комплексних мережеподібних високотехнологічних і інтелектуально важливих систем [3-5]. Окрім суто наукових і технологічних причин підвищеної уваги до них є і суто прагматична. Справа в тому, що такі системи мають системотворчу компоненту, тобто їх структура і динаміка активно впливають на ті процеси, які ними контролюються. В [4] наводиться приклад, коли відмова двох силових ліній системи електромережі в штаті Орегон (США) 10 серпня 1996 року через каскад стимульованих відмов призвели до виходу із ладу електромережі в 11 американських штатах і 2 канадських провінціях і залишили без струму 7 млн. споживачів протягом 16 годин. Вірус Love Bug worm, яких атакував Інтернет 4 травня 2000 року, приніс збитків на мільярди доларів.

До таких систем відносяться Інтернет, як складна мережа роутерів і комп'ютерів, об'єднаних фізичними та радіозв'язками, WWW, як віртуальна мережа Web-сторінок, об'єднаних гіперпосиланнями. Розповсюдження епідемій, чуток та ідей в соціальних мережах, вірусів - в комп'ютерних. Живі клітини, мережі супермаркетів, актори Голівуду – ось далеко не повний перелік мережеподібних структур. Більш того, останнє десятиліття розвитку економіки знань привело до зміни парадигми

структурного, функціонального і стратегічного позиціонування сучасних підприємств. Вертикально інтегровані корпорації повсюдно витісняються розподіленими мережними структурами (так званими бізнес-мережами) [7]. Багато хто з них замість прямого виробництва сьогодні займаються системною інтеграцією. Тому дослідження структури та динаміки мережеподібних систем дозволить оптимізувати бізнес-процеси та створити умови для їх ефективного розвитку і захисту [8].

Для побудови і дослідження моделей складних мережеподібних систем введені нові поняття і означення. Коротко опишемо тільки головні з них. Хай вузол i має k_i кінців (зв'язків) і може приєднати (бути зв'язаним) з іншими вузлами k_i . Відношення між числом E_i зв'язків, які реально існують і їх повним числом $k_i(k_i - 1)/2$ для найближчих сусідів називається коефіцієнтом кластеризації для вузла i

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)}.$$

Загальний коефіцієнт кластеризації знаходиться шляхом осереднення його локальних значень для всієї мережі. Дослідження показують, що він суттєво відрізняється від одержаних для випадкових графів Ердаша-Рені [4]. Ймовірність Π того, що новий вузол буде приєднано до вузла i залежить від k_i вузла i . Величина $\Pi(k_i) = k_i / \sum_j k_j$ називається переважним приєднанням (preferential attachment). Оскільки не всі вузли мають однакову кількість зв'язків, останні характеризуються функцією розподілу $P(k)$, яка дає ймовірність того, що випадково вибраний вузол має k зв'язків. Для складних мереж функція $P(k)$ відрізняється від розподілу Пуасона, який мав би місце для випадкових графів. Для переважної більшості складних мереж спостерігається степенева

залежність $P(k) \propto k^{-\gamma}$, де $\gamma=1-3$ і зумовлено природою мережі. Такі мережі виявляють властивості направленої графа.

Крім цього складні системи виявляють процеси самоорганізації, змінюються з часом, виявляють неабияку стійкість відносно помилок та зовнішніх втручань.

В складних системах мають місце колективні емерджентні процеси, наприклад синхронізації, які схожі на подібні в квантовій оптиці. На мові системи зв'язаних осциляторів це означає, що при деякій критичній силі взаємодії осциляторів невелика їх купка (кластер) мають однакові фази і амплітуди.

В економіці, фінансовій діяльності, підприємстві здійснювати вибір, приймати рішення доводиться в умовах невизначеності, конфлікту та зумовленого ними ризику. З огляду на це управління ризиками є однією з найважливіших технологій сьогодення [9, 10].

До недавніх часів вважалось, що в основі розрахунків, які так чи інакше мають відношення до оцінки ризиків лежить нормальний розподіл. Йому підпорядкована сума незалежних, однаково розподілених випадкових величин. З огляду на це ймовірність помітних відхилень від середнього значення мала. Статистика ж багатьох складних систем – аварій і катастроф, розломів земної кори, фондових ринків, трафіка Інтернету тощо – зумовлена довгим ланцюгом причинно-наслідкових зв'язків. Вона описується, як показано вище, степеневим розподілом, „хвіст” якого спадає значно повільніше від нормального (так званий „розподіл з важкими хвостами”). У випадку ступеневої статистики великими відхиленнями знехтувати вже не можна. З рисунку видно, наскільки добре описуються ступеневою статистикою торнадо (1), повені (2), шквали (3) і землетруси (4) за кількістю жертв в них в США в ХХ столітті [2].

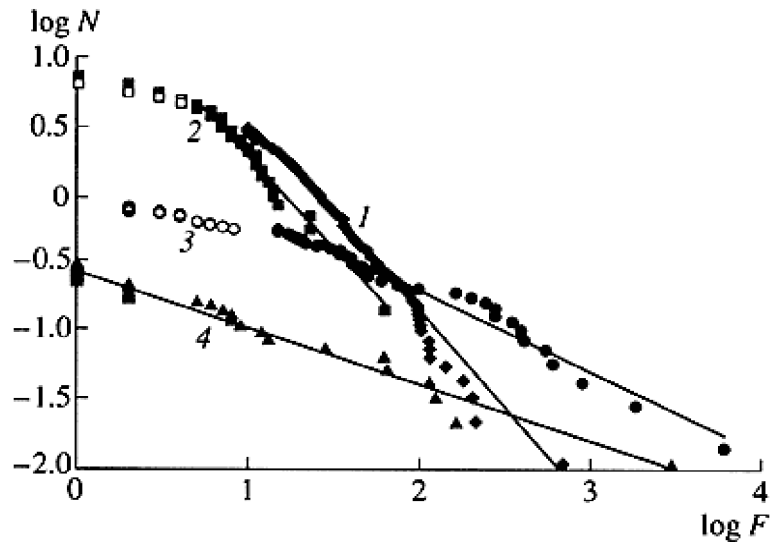


Рис. Універсальність степеневих розподілів жертв різних катастрофічних явищ 20-го сторіччя: торнадо (1), повеней (2), шквалів (3) і землетрусів (4)

Системи, які демонструють самоорганізовану критичність самі по собі прагнуть до критичного стану, в якому можливі зміни будь-якого масштабу.

З точки зору передбачення цікавим є той факт, що різні катастрофічні явища можуть розвиватися за однаковими законами. Незадовго до катастрофи вони демонструють швидкий катастрофічний ріст, на який накладені коливання з прискоренням. Асимптотикою таких процесів перед катастрофою є так званий режим з загостренням, коли одна або декілька величин, що характеризують систему, за скінчений час зростають до нескінченності. Згладжена крива добре описується формулою

$$I(t) = A + B(t_c - t)^\alpha [1 + C \cos(\omega \log(t_c - t) - \varphi)],$$

тобто для таких різних катастрофічних явищ ми маємо один і той же розв'язок рівнянь, котрих, на жаль, поки що не знаємо. Теорія складності дозволяє переглянути деякі з основних положень ризикології та вказати алгоритми прогнозування катастрофічних явищ [10].

Ключові концепції традиційних моделей та аналітичних методів аналізу і управління капіталом все частіше натикаються на проблеми, які не мають ефективних розв'язків в рамках загальноприйнятих парадигм. Причина криється в тому, що класичні підходи розроблені для опису відносно стабільних систем, які знаходяться в положенні відносно стійкої рівноваги. За своєю суттю ці методи і підходи непридатні для опису і моделювання швидких змін, не передбачуваних стрибків і складних взаємодій окремих складових сучасного світового ринкового процесу. Стало ясно, що зміни у фінансовому світі протікають настільки інтенсивно, а їх якісні прояви бувають настільки неочікуваними, що для аналізу і прогнозування фінансових ринків вкрай необхідним став синтез нових аналітичних підходів [11].

Теорія складних систем вводить нові для фінансових аналітиків поняття, такі як фазовий простір, атрактор, експонента Ляпунова, горизонт передбачення, фрактальний розмір тощо. Крім того, все частіше для передбачення складних динамічних рядів використовуються алгоритми нейрокомп'ютинга [12]. Нейронні мережі – це системи штучного інтелекту, які здатні до самонавчання в процесі розв'язку задач. Навчання зводиться до обробки мережею множини прикладів, які подаються на вхід. Для максимізації виходів нейронна мережа модифікує інтенсивність зв'язків між нейронами, з яких вона побудована, і таким чином самонавчається. Сучасні багатошарові нейронні мережі формують своє внутрішнє зображення задачі в так званих внутрішніх шарах. При цьому останні відіграють роль „детекторів вивчених властивостей”, оскільки активність патернів в них є кодування того, що мережа „думає” про властивості, які містяться на вході. Використання нейромереж і генетичних алгоритмів стає конкурентноздатним підходом при розв'язанні задач передбачення, класифікації, моделювання фінансових часових рядів, задач оптимізації в галузі фінансового аналізу та управління ризиком.

Детермінований хаос пропонує пояснення нерегулярної поведінки і аномалій в системах, котрі не є стохастичними за природою. Ця теорія має широкий вибір потужних методів, включаючи відтворення атрактора в лаговому фазовому просторі, обчислення показників Ляпунова, узагальнених розмірностей і ентропій, аналіз рекурентних діаграм, статистичні тести на нелінійність.

Головна ідея застосування методів хаотичної динаміки до аналізу часових рядів полягає в тому, що основна структура хаотичної системи (атрактор динамічної системи) може бути відтворена через вимірювання тільки однієї змінної системи, фіксованої як динамічний ряд. В цьому випадку процедура реконструкції фазового простору і відтворення хаотичного атрактора системи при динамічному аналізі часового ряду зводиться до побудови так званого лагового простору. Реальний атрактор динамічної системи і атрактор, відтворений в лаговому просторі по часовому ряду при деяких умовах мають еквівалентні характеристики [13].

На останок звернемо увагу на дидактичні можливості теорії складності. Розвиток сучасного суспільства і поява нових проблем вказує на те, що треба мати не тільки (і навіть не стільки) експертів по деяким аспектам окремих стадій складних процесів (професіоналів в старому розумінні цього терміну), знадобляться спеціалісти “по розв’язуванню проблем”. А це означає, що істинна міждисциплінарність, яка заснована на теорії складності, набуває особливого значення. З огляду на сказане треба вчити не “предметам”, а “стилям мислення”. Тобто, міждисциплінарність можна розглядати як основу освіти 21-го століття.

1. Yanner Bar-Yam. Dynamics of Complex Systems.- <http://nesci.org/publications/>

2. Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячеление. / Сб.статей под ред. Г.Г.Малинецкого, С.П. Курдюмова - М.: Наука, 2002.-478с.

3. Соловйов В.М. Економічна кібернетика: з досвіду моделювання складних фінансово-економічних систем // Вісник Криворізького економічного інституту.- Кривий Ріг, KEI КНЕУ, 2005.- Вип.2.- С.11-26.
4. Stogatz S.H. Exploring complex networks // Nature, 2001.-V.410.-P.268-276.
5. Albert R., Barabasi A.-L. Statistical Mechanics of Complex Networks.- Rev.Mod.Phys. 74, 47 (2002) (arXiv:cond-mat/0106096)
6. Boccaletti S., Latora V., Moreno Y., Chavez M., Hwang D.-U. Complex networks: Structure and dynamics // Physics Reports, 2006. -V.424.-P.175 – 308.
7. Don Tapscott, David Ticoll, and Alex Lowy, Digital Capital: Harnessing the Power of Business Webs, Harvard Business School Press, 2000.
8. Нечаев В.П., Нагибас А.А., Соловьев В.Н. Мультифрактальность бизнес архитектур и управление риском сетевых предприятий // Труды V Международной Школы «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах».-Санкт-Петербург.-2005.- С.321-327.
9. Вітлінський В.В., Верченко П.І., Сігал А.В., Наконечний Я.С. Економічний ризик: ігрові моделі.-К.: КНЕУ, 2002.-446с.
10. Malevergne Y., Sornette D. General framework for a portfolio theory with non-Gaussian risks and non-linear correlations.-arXiv:cond-mat/0103020
11. Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка. - М.: Мир, 2000.-333с.
12. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Пер. с англ.- М.: Горячая линия – Телеком. 2000.-182с.
13. Marwan N., Romano M.C., Thiel M., Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems // Phys.Rep., 2007. -V.438.-P.237-329.