

#### ГОЛОВАЧ

**Юрій Васильович** —

член-кореспондент

НАН України, завідувач відділу

статистичної теорії

конденсованих систем Інституту

фізики конденсованих систем

НАН України

## СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА СКЛАДНИХ СИСТЕМ – НОВИЙ НАПРЯМ МІЖДИСЦИПЛІНАРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Стенограма наукової доповіді на засіданні  
Президії НАН України 23 жовтня 2019 року**

*У доповіді проаналізовано сучасний стан і шляхи розвитку такого напрямку міждисциплінарних досліджень, як статистична фізика складних систем. Виокремившись відносно недавно, цей напрям має широку сферу застосування — від моделювання та прогнозування взаємодії частинок у конденсованому середовищі, вивчення поведінки фізичних, хімічних і біологічних систем до нового узагальненого підходу до досліджень соціальних явищ, процесів та проблем суспільства.*

Шановний Борисе Євгеновичу!

Шановні учасники засідання!

У своїй доповіді я ставлю два завдання. По-перше, розповісти про статистичну фізику складних систем як окремий науковий напрям та поінформувати про дослідження, які проводяться в цій галузі в Інституті фізики конденсованих систем НАН України. Друге завдання є менш очевидним, але, на мою думку, воно навіть важливіше за перше — я спробую переконати вас, що статистична фізика складних систем має стосунок майже до кожної наукової галузі з тих, що представлені в нашій Академії. Тому до сьогоднішньої доповіді можна запропонувати й альтернативну назву, яка більшою мірою відображує саме друге завдання, — «Складні системи — фізика поза фізикою» [1]\*.

Моя доповідь складатиметься з трьох частин. У першій я спробую дати означення самого поняття «складні системи», у другій — розповім про два наріжні камені цього напрямку: науку про складні мережі та статистичну фізику, а в третьому розділі ми розглянемо

\* Для детальнішого ознайомлення з проблематикою див., наприклад, список літератури до огляду [1]. Далі у тексті доповіді наводитимуться посилання лише на окремі роботи, безпосередньо пов'язані з обговорюваними прикладами практичних застосувань науки про складні системи.

конкретні приклади застосування фізики складних систем у різних галузях знань.

Якщо звернутися до енциклопедичних джерел, можна натрапити на велику кількість означень поняття «складні системи». Така розмаїтість пов'язана з тим, що складні системи є об'єктами вивчення в багатьох традиційних наукових дисциплінах, кожна з яких робить наголос на найбільш специфічних для неї ознаках. А тому загальне охоплення цим терміном дуже різномірних сутностей і призводить до труднощів з його точним визначенням.

Усе ж, можливо, найбільш усталеним є таке означення: складні системи — це системи, які складаються з багатьох взаємопов'язаних між собою частин (агентів), що, взаємодіючи одна з одною, виявляють колективну поведінку, яка не є простою сумою поведінки і властивостей окремих компонентів. Відповідно, наука про складні системи вивчає, як саме ці складові частини породжують колективну поведінку системи в цілому. Прикладами складних систем можуть бути конденсована речовина, живі організми, фондові ринки, економічні системи, людське суспільство тощо.

В одному з інтерв'ю в січні 2000 р. відомий фізик-теоретик і космолог Стівен Гокінг, відповідаючи на запитання, як він вважає, чи стане XXI ст. епохою біології подібно до того, як XX ст. було століттям фізики, сказав: «Я думаю, що наступне століття буде століттям складності». Він вказував на постійно зростаючу значущість наукових ідей, які дозволяють знаходити порядок у дуже складних взаємопов'язаних системах, таких як погода, клімат, рух транспорту, фондовий ринок, екосистеми тощо. І чим далі розгортаються події XXI ст., тим все більш реалістичними стають передбачення С. Гокінга.

Складні системи, попри широке їх розмаїття, мають певні спільні характеристики, такі як:

- самоорганізація — утворення повторюваних структур, патернів, прикладами чого можуть бути формування зграї птахів, коли з поведінки окремої особини не можна передбачити поведінку зграї, або періодичність спалахів інфекційних захворювань;

- емерджентність (emergence), або виникнення, — поява нових функціональних можливостей системи, наприклад виникнення свідомості як функції мозку або поява стійкості в мережі;

- чутливість — невеликі зміни в початкових умовах спричиняють у подальшому великі зміни в системі; це так званий ефект метелика — змах крил метелика в Аргентині призводить до урагану в Карибському басейні;

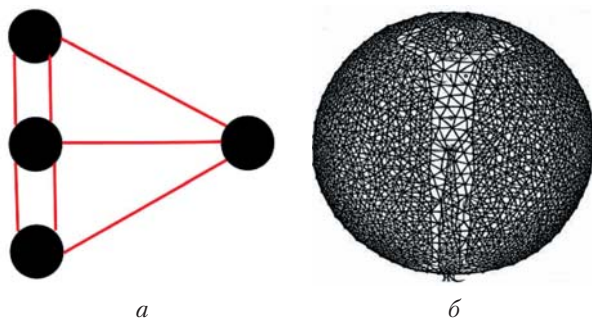
- «товсті хвосты» (“fat-tails”) у статистичних розподілах — рідкісні події трапляються набагато частіше, ніж можна було б передбачити за нормальним розподілом, оскільки описуються не гаусовим, а степеневими розподілами; наприклад так званий ефект чорного лебедя;

- адаптивна взаємодія — коли агенти, що взаємодіють один з одним, змінюють стратегії своєї поведінки у різний спосіб залежно від попереднього досвіду та еволюції системи.

В основі дослідження складних систем лежить поєднання методів і концептуального апарату різних наук, проте найголовнішими з них є наука про складні мережі і статистична фізика. Обидва ці напрями активно розвиваються в Інституті фізики конденсованих систем НАН України представниками наукової школи академіка НАН України Ігоря Рафаїловича Юхновського.

Наука про складні мережі є, так би мовити, *lingua franca* для науки про складні системи, тобто вона є загальною мовою, якою описуються різні складні системи. Основним її структурним елементом є мережа, або граф — абстрактний математичний об'єкт, який є впорядкованою парою з множини вершин, або, як їх іноді називають, вузлів, та множини ребер — зв'язків між парами вершин (рис. 1а).

Для опису складних систем агентів, що взаємодіють один з одним, кожному з цих агентів ставлять у відповідність вершину, а кожній взаємодії між ними — ребро. Причому кожен вузол мережі може бути пов'язаний з іншими вузлами певним числом ребер, що визначає так званий ступінь вузла. Зв'язки між вузлами можуть мати напрямок, а можуть бути неспрямованими, вони можуть бути зваженими чи



**Рис. 1.** Приклади графів. Чотири вершини  $N = 4$ , пов'язані між собою сімома ребрами — цей граф досліджував ще Леонард Ейлер, розв'язуючи знамениту задачу про чотири мости в Кенігсберзі (а). На деревориті Якова Гніздовського «Конструктор» зображено граф (мережу) з великою кількістю вершин  $N$  (б). У реальних мережах  $N$  може коливатися від  $10^3$  до  $10^{10}$

незважаючи на те, можуть змінюватися в часі або бути сталими. Можна задати неперервні стани агентів, а можна — дискретні. Такий широкий спектр можливостей представлення будь-яких об'єктів у вигляді мереж, а також сучасні методи аналізу та комп'ютерні технології, які дозволяють вивчати не просто властивості окремих графів, а статистичну поведінку великих мереж з мільярдами зв'язків (рис. 1б), зумовили продуктивність концепції складних мереж для опису складних систем і її застосовність до найрізноманітніших галузей науки. Наприклад, мережа Інтернет — складна мережа, в якій вузлами є IP-адреси кожного комп'ютера чи гаджета, а зв'язки між ними — неспрямовані і симетричні. З іншого боку, веб-простір (www), як система доступу до пов'язаних між собою документів на різних серверах, є спрямованою складною мережею, в якій окремі веб-сторінки можна розглядати як вузли, а ребрами є гіперлінки, які задають напрям переходу від одного документа до іншого.

Зв'язок науки про складні мережі з наукою про складні системи є настільки тісним, що часто навіть важко визначити межу між ними. Мені здається, що в цьому аспекті можна провести аналогію з розмежуванням математики і теоретичної фізики — перша дисципліна слугує мовою, а друга за її допомогою описує конкретні явища.

Статистична фізика — це розділ фізики, що вивчає зв'язок між станом одного агента (мікростаном) і станом системи як єдиного цілого (макростаном). Концептуальний апарат статистичної фізики успішно використовується в інших наукових напрямках.

Однією з найпоширеніших моделей статистичної системи є модель Ізінга, в якій агенти розташовані у вузлах регулярної ґратки і можуть перебувати в одному з двох станів (рис. 2а). Така бінарна опозиція дозволяє застосовувати цю модель у дуже широкому контексті, наприклад для визначення розподілу думок у певній групі людей (opinion formation), що відповідає станам «за» чи «проти» і дає змогу вивчати, як цей розподіл змінюється у часі. Якщо ж ми розглянемо не просту ґратку, а складнішу структуру, яка відображує якусь реальну складну мережу, де кожен агент має лише два стани — скажімо, дивиться «вгору» чи «вниз» (рис. 2б), то постає питання: чи можемо ми визначити загальні характеристики, властиві сукупності агентів, розташованих на такій мережі. Виявляється, що можемо і що таким системам властиві розподіли з «товстими хвостами», універсальність, емерджентність, самоорганізація, чутливість, тобто всі ті самі властивості, якими характеризуються складні системи.

Отже, наука про складні системи охоплює широке коло міждисциплінарних досліджень, однак центральне місце у ній посідають теорії, методи, концепції статистичної фізики, науки про складні мережі та комп'ютерного моделювання систем багатьох частинок, що взаємодіють між собою, оскільки ці методи виявилися особливо ефективними при дослідженні складних систем різної природи.

В Україні останнім часом методи статистичної фізики складних систем успішно розвивають наукові колективи Інституту фізики конденсованих систем НАН України, Інституту фізики НАН України, Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Інституту прикладної фізики НАН України, Інституту біологічної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», Київського національного університету імені

Тараса Шевченка, Львівського національного університету імені Івана Франка, Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова, Сумського державного університету.

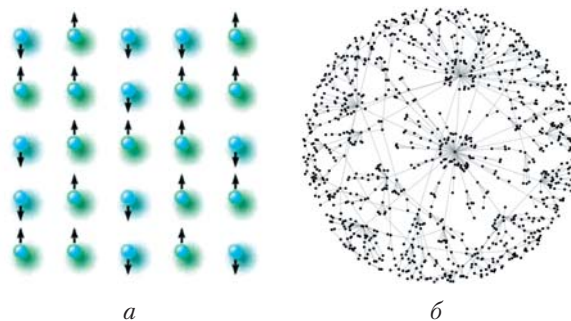
Вище я дуже стисло і загально окреслив властивості складних систем і застосовні до їх опису методи. Тепер на конкретних прикладах я розповім про напрями, в яких працює Інститут фізики конденсованих систем НАН України — визнаний у світі центр досліджень з фізики складних систем.

Класичним прикладом складної системи, яку можна описати методами статистичної фізики, є структурно неупорядковані магнетики, зокрема так зване спінове скло.

Інший показовий приклад — складні полімерні макромолекули, конформаційні властивості їх полімерних ланцюгів, а також складні за топологією і хімічним складом макромолекулярні утворення, такі як полімерні і кополімерні сітки. Або ще як приклад — великомасштабна структура Всесвіту. Однак усі ці напрями наших досліджень стосуються природничих дисциплін, а я хотів би детальніше зупинитися на прикладах застосування методів фізики складних систем до розв'язання задач, які виникають у сфері суспільних і гуманітарних наук.

Як я вже говорив, застосування науки про складні мережі дає змогу за допомогою кількісного аналізу знаходити спільні ознаки в поведінці складних систем різної природи. Сучасне місто — це яскравий приклад складної системи, якій притаманні всі перелічені вище властивості: самоорганізація, універсальність, емерджентність, розподіли з «товстими хвостами», чутливість. Зокрема, організація життєдіяльності міста підпорядковується універсальним законам людської мобільності. Розуміння закономірностей і напрямів переміщення людей має величезне значення для планування транспортних потоків, уникнення заторів, підвищення безпеки руху, а також для забезпечення ефективності заходів під час стихійних лих, епідемій вірусних захворювань тощо.

В Африці є країна Кот-д'Івуар, у якій мешкає близько 24 млн людей, але це дуже приблизна оцінка, оскільки на час проведення

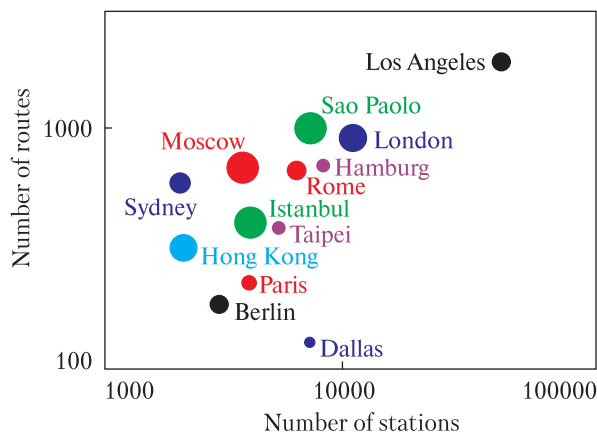


**Рис. 2.** Модель Ізінга на квадратній ґратці (а) і приклад складної мережі, на якій розглядається модель Ізінга та інші моделі статистичної фізики з метою опису складних систем (б)

наших досліджень перепису населення там не було вже майже 30 років. Моделі ж для опису мобільності людей потребують точних даних про кількість населення в тому чи іншому місці. Втім, майже 90% кот-д'івуарців мають мобільні телефони. Тому найбільший у країні оператор мобільного зв'язку Orange звернувся до світової наукової спільноти з питанням, чи можна на основі агрегованих даних про інтенсивність дзвінків оцінити інтенсивність і шляхи переміщення людей. Співробітники нашої наукової групи взяли участь у цьому міжнародному проекті, для якого компанія Orange відкрила анонімізовані дані про виклики своїх абонентів за 5 місяців та про переміщення 50 тис. випадковим чином вибраних користувачів протягом двох тижнів.

Ми припустили, що інтенсивність переміщення людей підлягає закону гравітації (gravity law):  $x_{ij} \sim N_i N_j / (d_{ij})^\alpha$ , де  $x_{ij}$  — інтенсивність взаємодій (переміщень) між місцезнаходженням  $i$  та місцезнаходженням  $j$ , які розділяє відстань  $d_{ij}$  і в яких одночасно перебуває  $N_i$  та  $N_j$  людей відповідно. Тобто інтенсивність переміщення прямо пропорційна кількості людей і обернено пропорційна відстані між їхнім місцезнаходженням. Друге наше припущення полягало в тому, що такою самою гравітаційною моделлю можна описати й інтенсивність з'єднань через мобільного оператора. В результаті наша гіпотеза справдилася [2]. Ми виявили, що і переміщення людей, і кількість дзвінків описуються





**Рис. 3.** Характерні розміри (кількість зупинок і кількість маршрутів) мереж громадського транспорту деяких міст, проаналізованих у наших дослідженнях [3]

степеневим законом, а звідси впливає, що з інтенсивності комунікацій між людьми можна робити висновки щодо інтенсивності їх переміщень. Більше того, виявилось, що цей степеневий закон є універсальним для різних міст, а ось переміщення між містами описуються також степеневим законом, але іншим (з іншим значенням показника  $\alpha$ ).

Отже, ця модель може бути ефективною, оскільки вона, по-перше, проста, а по-друге, використовує лише агреговані дані мобільного оператора про дзвінки, що дає змогу уникнути потенційних проблем з конфіденційністю.

Інший проект, який стосується науки про міста і який виконувала наша група, пов'язаний з вивченням стійкості транспортних мереж. Так, ми проаналізували властивості мереж громадського транспорту 14 великих міст світу (рис. 3) — різних за своєю історією, культурними традиціями, географічним розташуванням, однак усі вони мали транспортні мережі, достатньо великі для статистичного аналізу. Транспортна мережа Лос-Анджелеса, наприклад, складається з більш як 40 тис. станцій.

Одним із завдань цього проекту було дослідження стійкості мереж громадського транспорту до випадкових збоїв і спрямованих атак. Якщо виходить з ладу, скажімо, одна станція, мережа продовжує стабільно працювати і залишається зв'язаною як єдине ціле, якщо дві —

також, але в якийсь момент ця мережа розпадеться на окремі частини. Це приклад задачі, розв'язок якої ґрунтується на теорії перколяції. Використовуючи апарат статистичної фізики, ми дослідили зміну розміру  $S$  транспортної мережі в разі випадкового вилучення з неї  $s$  станцій за різними сценаріями і виявили, що в деяких містах, наприклад у Парижі, мережа громадського транспорту є доволі стійкою, а в деяких, як, скажімо, у Далласі, — майже одразу перестає функціонувати як цілісна система [3]. За результатами проведеного аналізу ми можемо визначити причину, чому так відбувається, встановити взаємозв'язок між стійкістю і топологією системи, можемо апріорі, не застосовуючи симуляцій, сказати, мережа громадського транспорту якого міста є стійкішою до випадкових вилучень окремих станцій.

Загалом для таких складних систем, як транспортні мережі, характерним є те, що вони стійкіші до випадкових вилучень, ніж до спрямованих атак, в яких послідовно усуваються найважливіші складові частини. Здавалося б, найважливішими в цьому плані мали б бути великі транспортні вузли, так звані хаби, але виявилось, що це далеко не завжди так. Ми запропонували критерії визначення ступеня важливості окремих вузлів та способи передбачення стійкості мережі до різних типів атак.

У ще одному проекті, пов'язаному з міським транспортом, ми досліджували топологічні та просторові особливості транспортних мереж Великої Британії (як національних, так і міських), провели аналіз їх стійкості та динаміки навантаження, запропонували характеристики, за якими можна оцінити ефективність розташування окремих станцій. Отримані результати можна використовувати не лише як ключові показники продуктивності існуючих мереж громадського транспорту, а й для подальшого планування їх розвитку та будівництва [4].

Тепер я коротко зупинюся на роботах, що виконувалися в нашому Інституті і були пов'язані з вивченням універсальних законів соціальної динаміки. Дослідження поведінки людей у віртуальному середовищі відкриває широкі можливості для кількісного аналізу соціальних

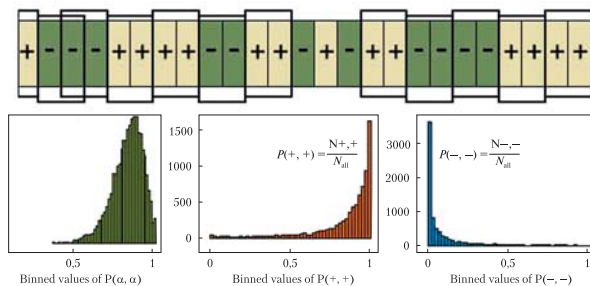
явищ з рівнями точності, наближеними до тих, що прийняті в експериментах, пов'язаних з науками природничого профілю.

У проекті, в якому ми брали участь спільно з науковцями Віденського медичного університету та Массачусетського технологічного інституту, досліджувалися мережеві структури і активність користувачів в онлайн-грі Pardus, яка належить до класу масових багатокористувацьких онлайн-ігор, так званих MMOG (Massively Multiplayer Online Game). На сьогодні ігри цього класу стали однією з наймасовіших колективних форм людської діяльності і зазвичай налічують від десятків тисяч до сотень мільйонів учасників.

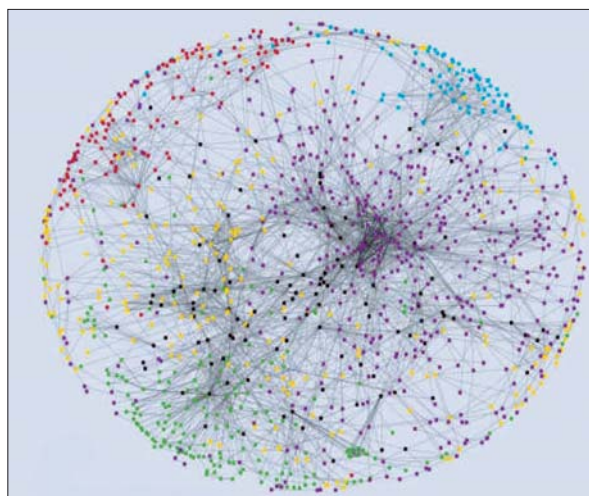
Усі події в Pardus відбуваються у футуристичному всесвіті, де функціонує відкрита, керована учасниками гри економіка, а самі гравці взаємодіють між собою, подорожуючи в космосі, займаються будівництвом, торгівлею, виробництвом товарів, змагаються один з одним та борються з іншими персонажами гри. Ми мали базу даних дій усіх гравців, накопичену за 10 років, з роздільною здатністю 1 с. І хоча цей віртуальний світ є, скоріше, карикатурою на реальне суспільство, він тим не менш є чудовою моделлю для вивчення багатьох аспектів соціальної психології, які практично неможливо дослідити в експериментах або за допомогою опитування.

Аналіз дій гравців Pardus дав змогу з високою точністю здійснити кількісний опис їх соціальної активності, визначити характерні особливості розподілу часу, який минає між тією чи іншою дією гравця, підтвердити його універсальність та відповідність степеневому розподілу, з'ясувати гендерні та вікові відмінності у швидкості прийняття рішень тощо [5].

Крім того, дії гравців умовно можна розподілити на дві групи — «хороші» та «погані». І перед нами стояло завдання визначити, якщо гравець зробив, скажімо, «хорошу» дію, з якою ймовірністю його наступна дія буде також «хорошою» чи, навпаки, «поганою». Інакше кажучи, ми мали знайти кореляційну довжину дій гравця. В результаті маємо обнадійливу новину з віртуального світу — добро живе довше за зло,



**Рис. 4.** Кореляційна довжина «хороших» (+) і «поганих» (-) дій гравців в онлайн-грі Pardus. Імовірність здійснення кількох позитивних дій поспіль набагато більша за ймовірність такої самої серії негативних дій [5]



**Рис. 5.** Складна мережа, що зображає структуру соціальних зв'язків між героями ісландських саг [7]

тобто серія дій одного знака для «поганих» дій загасає швидше, ніж для «хороших» (рис. 4).

І на завершення наведу останній приклад «фізики поза фізикою», тобто застосування концепцій і методів статистичної фізики та науки про складні мережі до дослідження систем взаємодіючих агентів нефізичної природи.

Спільно з дослідниками з Університету Ковентрі та Оксфордського університету ми працювали над виконанням проекту, в якому кількісні методи теорії складних систем було застосовано до аналізу таких визначних європейських епічних наративів, як стародавній англосаксонський героїчний епос «Беовульф», антична грецька епічна поема «Іліада», ірланд-

ські та ісландські саги, героїчний епос східних слов'ян — билини [6, 7].

Цей напрям досліджень почав розвиватися лише кілька років тому і викликає велике зацікавлення як у науковому світі, так і в мас-медіа. Сам проект має промовисту назву — Maths Meets Myths (математика зустрічається з міфами). Особливістю цього дослідження є те, що аналізуються соціальні зв'язки між героями епічного нарративу. Традиційно аналіз нарративів як твору людського духу був прерогативою гуманітарних наук, а аналіз соціальних структур — предметом вивчення соціальних наук. А отже, фізики запропонували зовсім новий підхід: дослідили стосунки між головними персонажами в епічних текстах і сагах, розглядаючи їх як складні системи і використовуючи методи статистичної фізики та науки про складні мережі для візуалізації і кількісного опису цих відносин (рис. 5). Кожному окремому герою відповідає вузол, а кожній взаємодії героїв у текстах — окремий зв'язок (ребро). Причому в наведеному прикладі ці стосунки відображено в бінарному представленні — ворожі та дружні.

Результати такого аналізу, з одного боку, відкривають нові можливості для систем класифікації текстів на зразок широко застосованої міжнародної системи класифікації казок Ларне–Томпсона. З іншого боку, кількісно описуючи наративи за допомогою методів статистичної фізики, їх можна виміряти і порівняти зі справжніми соціальними структурами, які мають чіткі ознаки. Якщо ці закономірності трапляються в наративах, це може свідчити про реальну соціальну структуру, описану в тексті, та реальність прототипів персонажів. Звісно, такі методи не можуть дати однозначного висновку, але є корисним доповненням до даних історичних та археологічних досліджень.

Отже, застосування науки про складні системи, кількісних методів і концепцій статистичної фізики до аналізу об'єктів не лише природничих наук, а й суто гуманітарних і соціальних сфер знання є, на мою думку, характерною рисою сьогодення.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання  
підготувала О.О. Мележик*

## REFERENCES

- Holovatch Yu., Kenna R., Thurner S. Complex systems: physics beyond physics. *Eur. Journ. Phys.* 2017. **38**(2): 023002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa5a87>
- Palchykov V., Mitrovic M., Jo H. et al. Inferring human mobility using communication patterns. *Sci. Rep.* 2015. **4**: 6174. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep06174>
- Berche B., von Ferber C., Holovatch T., Holovatch Y. Transportation network stability: a case study of city transit. *Advances in Complex Systems*. 2012. **15**(1): 1250063. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219525912500634>
- de Regt R., von Ferber C., Holovatch Y., Lebovka M. Public transportation in Great Britain viewed as a complex network. *Transportmetrica A: Transport Science*. 2019. **15**(2): 722. DOI: <https://doi.org/10.1080/23249935.2018.1529837>
- Mryglod O., Fuchs B., Szell M., Holovatch Yu., Thurner S. Interevent time distributions of human multi-level activity in a virtual world. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2015. **419**(2): 681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.09.056>
- Kenna R., Mac Carron M., Mac Carron P. (Eds) Maths Meets Myths: Complexity-science approaches to folktales, myths, sagas, and histories. Springer, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39445-9>
- Kenna R., Mac Carron P. Feature: complex networks. Maths meets myths. *Physics World*. 2016. **29**(6): 22. [http://live.iop-pp01.agh.sleek.net/physicsworld/reader/#!edition/editions\\_Jun-2016/](http://live.iop-pp01.agh.sleek.net/physicsworld/reader/#!edition/editions_Jun-2016/)