

ПЕРЕКЛАДИ

Дірк Хелбінг, проф.
Федеральна вища технічна школа, Цюрих (ETH Zurich), Швейцарія

ПЛЮРАЛІСТИЧНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ¹

Моделювання складних систем, таких як соціологічні або соціально-економічні – може бути дуже важким завданням. Хоча існують різноманітні підходи до моделювання, вони, як правило, не сумісні і неузгоджені між собою, а емпіричні дані часто не дозволяють визначити, яка модель буде правильною, найкращою чи найбільш відповідною в конкретному випадку. Більше того, нещодавня фінансова та економічна криза показали, що покладаються лише на єдину ідеалізовану модель може бути дуже дорогим рішенням.

Дана стаття намагається «пролити нове світло» на проблеми, які виникають при моделюванні складних систем. В той час як певні рішення можуть бути використані в різних системах, відповідні наукові проблеми проілюстровані для соціальних, економічних та транспортних систем. В статті зроблено огляд спроб подолати деякі непорозуміння та суперечки минулого. В той же час, огляд висвітлює давні наукові питання, які можуть бути розв'язані з врахуванням нелінійних моделей багатofакторних агентів з просторово-часовою взаємодією. В результаті аналізу можна зробити висновок, що зміна парадигми на плюралістичну або підхід ймовірного моделювання, який об'єднує кілька світоглядів, є дещо запізнілим. В зв'язку з цим доводиться, що буде корисним поєднання різних підходів, які забезпечать хороше відображення реальності, хоча вони і можуть бути несумісними. Нарешті, визначається, що може бути зоною для конструктивної співпраці між соціально-економічними, природничими та технічними науками.

Ключові слова: моделювання, складні системи, нелінійні моделі.

Вступ

Коли "батько соціології", Огюст Конт, висунув ідею "соціальної фізики", він сподівався, що задачі соціальних систем можуть бути розв'язані методами, які використовують природничі науки [1]. Проте, рух цьому напрямку був дуже складним і повільним. Сьогодні більшість соціологів більше не вірять в його позитивістський підхід. Питання в тому, чи це доводить хибність позитивістського підходу, чи просто демонструє, що соціологи досі не використовували правильні методи. Зрештою, соціологи нечасто мають досвід роботи в природничих науках, в той час як позитивістський підхід був найбільш успішним в таких областях, як фізика, хімія та біологія.

Річ у тім, що останнім часом швидко розвиваються та поширюються різні наукові товариства. Самі себе вони називають соціальними фізиками, математичними соціологами, фахівцями з соціальних обчислень, спеціалістами з багатоагентного моделювання, комплексності або мереж. Дослідники соціальних, комп'ютерних наук, фізики, біології, математики та штучного інтелекту вирішують задачі соціальних та економічних систем з використанням математичного та комп'ютерного моделювання, лабораторних і веб-експериментів. Чи буде логічним завершенням їх досліджень зміна поглядів, зважаючи на складність соціальних та економічних систем, або вони намагатимуться "просунути" наші знання та уявлення про соціальні системи набагато далі, ніж це здавалось можливим ще десятиріччя тому? Чи стане реальністю бажання Огюста Конта зробити соціологію "королевою наук" [2]?

На мій власний погляд, розвивати математичні моделі соціальних систем справа менш безнадійна, ніж зазвичай думають більшість соціологів, але це складніше, ніж уявляють більшість фахівців з природничих наук. Критичним є питання – як може бути досягнутий суттєвий прогрес в такій складній і багатогранній сфері, як суспільні науки, та як можуть бути подолані поточні перепони? Зрештою, які вони, ці перепони? Дана стаття намагається зробити суперечливі питання більш зрозумілими для наукових спільнот з різними підходами та походженнями. Хоча кожен з акцентів може бути добре відомий окремим вченим, деякі з них, ймовірно, не такі очевидні для інших. Поєднуючи їх різними чином, ця стаття намагається створити міст між різними дисциплінами, що зацікавлені в схожих темах, та зробити думки зрозумілими для наукових спільнот з різними точками зору.

Діалог між соціальними, природничими та економічними науками є бажаним не лише для інтелектуального

обміну в області фундаментальних наукових питань. Він також потрібен тоді, коли наука не встигає за темпами розвитку соціоекономічних проблем, що виникають, і фахівцям потрібно стати більш ефективними для вирішення практичних задач [3]. Президент авторитетного у Нью-Йорку Колумбійського університету Лі С. Боллінджер сформулював проблему таким чином:

"Сили, що впливають на спільноти в усьому світі... є потужними і новими. Поширення глобальних ринкових систем...які... змінюють наш світ... , піднімають серйозні питання. Ці питання вимагають певних видів аналізу і розуміння, яке однозначно здатні забезпечити академічні інститути. Занадто багато невдач політики є принциповими невдачами у рівні знань" [4].

Фундаментальні та практичні наукові проблеми вимагають від нас робити все можливе, щоб знайти рішення, і не здаватися аж до того моменту, коли помилковість або межі можливостей наукового підходу стають очевидні. Як буде показано в цьому огляді і, різні методи слід розглядати як доповнення один одного і, навіть коли вони суперечливі, використання їх разом може дати краще уявлення про явище, ніж будь-який одиничний метод, яким би потужним він не здавався.

Конкретні труднощі в моделюванні соціоекономічних систем

Говорячи про соціально-економічні системи, ми можемо мати на увазі що завгодно – від сімей, великих соціальних груп або компаній, до країн, ринків, або світової економіки, включаючи фінансову систему та ринок праці. Системоутворюючими компонентами будуть особи, групи, або, наприклад, компанії – вибір залежить від системи, що розглядається, та рівня опису, який цікавить дослідника.

На макроскопічному (системному) рівні соціально-економічні системи мають деякі особливості, які здаються схожими на властивості певних фізичних або біологічних системи. Одним із прикладів є ієрархічна організація. В соціальній системі індивідууми формують групи, які утворюють організації, компанії, і т.д., які, в свою чергу, складають держави, а ці держави об'єднуються у співтовариства держав (як США або Європейський Союз, наприклад). У фізиці елементарні частинки формують атоми, які створюють молекули, котрі можуть утворювати тверді тіла, рідини або гази, які разом складають нашу планету, яка, в свою чергу, належить до Сонячної системи і Галактики. У біології, клітини складаються з органел, вони утворюють тканини і органи,

які є складовими частинами живих істот, які, в свою чергу, складають екосистеми.

Такі аналогії безперечно цікаві і вже розглядалися, наприклад, Гербертом Спенсером [5], та пізніше у теорії систем [6]. Проте, не так очевидно, наскільки багато ми можемо дізнатись, досліджуючи їх. Тоді як фізичні системи зазвичай добре зрозумілі завдяки математичним моделям, з біологічними та соціально-економічними ситуація зазвичай зворотня. Це часто надихає фізиків переводити їх моделі у площину біологічних та соціоекономічних задач (детальніше можна ознайомитись в розділі "Моделі з деякими особливостями"...), у той час як біологи, соціологи та економісти часто вважають такі спроби "фізикалістичними" та неадекватними. Насправді, соціальні та економічні системи мають ряд властивостей, які відрізняють їх від більшості фізичних:

1) число змінних, як правило, (набагато) більше (враховуючи, що кожен людський мозок містить близько 1000 мільярдів нейронів);

2) відповідні змінні і параметри часто невідомі і важко вимірювані (існування "невдомих неведомих" є типовим);

3) шкали часу, на яких змінні еволюціонують, часто не повністю відокремлені одна від одної;

4) статистична варіація вимірювань значна і прихована законами соціальної поведінки там, де вони існують (якщо вони взагалі існують);

5) часто відсутній набір еквівалентних систем, а є лише одна реалізація (історія однієї людини);

6) емпіричні дослідження обмежені технічними, фінансовими та етичними питаннями;

7) важко або навіть неможливо розділити систему на прості, невзаємодіючі підсистеми, які можуть бути вивчені окремо;

8) спостерігач бере участь в системі і цим змінює соціальну реальність;

9) нелінійна і/або мережева залежність багатьох змінних призводить до складної динаміки структур, а іноді і до парадоксальних ефектів;

10) ефекти взаємодії часто сильні, а явища, які виникають, зустрічаються одразу в багатьох різних елементах системи (наслідок – складно зрозуміти, як шляхом вимірювань і аналізу виділити окремі елементи системи);

11) такі фактори, як велика міра випадковості і неоднорідність, пам'ять, очікування, прийняття рішень, спілкування, свідомість, актуальність намірів і особисті інтерпретації суттєво ускладнюють аналіз і моделювання;

12) те ж саме відноситься до людських функцій – таких як емоції, творчість і інновації;

13) вплив інформації часто є більш вирішальним для поведінки соціально-економічної системи, ніж фізичні аспекти (енергія, матерія) або наша біологічна спадщина;

14) "правила гри" і взаємодії в соціальній чи економічній системі можуть змінюватися з плином часу, на відміну від властивостей фундаментальних законів і сил у фізиці;

15) зокрема, соціальні системи знаходяться під впливом нормативів та моральних питань, які є змінними.

З цих причин, соціальні системи є, зазвичай, складнішими ніж фізичні системи. Вони є найбільш складними системами серед тих, які ми знаємо. Як наслідок, значна частина соціологів вважає, що математичні моделі для соціальних систем приречені на поразку, а більшість економістів і кількісно орієнтованих соціологів, здається, що вірять в моделі з багатьма змінними. Обидва підходи суттєво відрізняються від простих моделей, що містять лише кілька змінних, які, зазвичай, пропонують фізики. Отже, хто ж правий?

Я вважаю, що це неправильне питання. Тому ми будемо аналізувати, чому різні вчені, які мають справу з одним і тим же предметом дослідження, приходять до таких драматично різних висновків.

Зрозуміло, що ця ситуація має деякі небажані побічні ефекти: вчені, які застосовують різні підходи, часто не спілкуються один з одним, не навчаються один у одного, і, ймовірно, часто відхиляють документи та проекти один одного. Тому так важливо зробити підхід кожної школи зрозумілим для інших.

Підходи в моделюванні

Якісний опис: багато фахівців суспільних наук вважають, що п'ятнадцять задач, які були перераховані вище, настільки серйозні, що безнадійно підходити з математичними моделями до соціальних систем. Поширеним є погляд, що всі моделі хибні. В результаті, поширення отримав підхід "створити оповідання", тобто дати якісний (не математичний і не алгоритмічний) опис реальності, котрий є деталізованим настільки, наскільки можливо. Це можна порівняти з живописом натуралістів. Розповіді важливі, оскільки вони збирають емпіричні докази та створюють базу знань, яка рано чи пізно необхідна для моделювання. Для створення хорошої моделі, потрібно неодноразово повертатись до осмислення досліджуваної системи. І першим та дуже суттєвим кроком на цьому шляху є створення опису, який дозволить розібратися у тому, що відбувається в системі. Цей крок очевидно є незмінним. Тим не менш, цей підхід іноді критикують з таких причин:

- Спостереження, опис та інтерпретацію важко відокремити один від одного, бо вони, як правило, здійснюються однією і тою ж головою (одного вченого). Оскільки ці процеси сильно пов'язані, спостерігачу важко або навіть неможливо дати об'єктивний опис системи на цьому рівні деталізації. Тому, різні вчені можуть аналізувати та інтерпретувати систему різними суб'єктивними способами. Те, що є важливим аспектом для одного спостерігача, інший може вважати несуттєвою деталлю, або навіть не помітити. У німецькій мові є приказка: "за деревами не видно лісу", тобто дані можуть приховувати ширшу картину або основні механізми. У природничих науках ця проблема була частково подолана шляхом розділення спостережень, опису та інтерпретації на різні процеси: вимірювання, статистичний аналіз та спроби моделювання. Багато з цих кроків здійснюються за підтримки технічних інструментів, комп'ютерів та програмних засобів для скорочення окремих елементів і зниження суб'єктивного впливу. Очевидно, цей метод нелегко застосувати у вивченні соціальної системи, бо окремі особи і суб'єктивні інтерпретації сильно впливають на загальну систему.

- Незважаючи на рівень деталізації, розповідь найчастіше не підходить для перекладу в ту комп'ютерну програму, яка б відтворила явища, зображені в ній. Коли вчені намагаються зробити так, у багатьох випадках виявляється, що описи неоднозначні, тобто недостатньо докладні, щоб створити унікальну комп'ютерну модель, яка б відтворювала спостережуваний феномен. В результаті різні програмісти створюють різні комп'ютерні моделі і отримують різні результати. Таким чином, Джошуа Епштейн стверджує: "Якщо ви не "виросували", то не можете пояснити" [7] (де "виросувати" вживається у значенні "змодельовати за допомогою комп'ютера"). Наприклад, якщо елементи системи взаємодіють нелінійним чином, тобто ефекти не пов'язані з причиною, є багато різних можливостей для специфікування нелінійності: це парабола, експонентна залежність, квадратний корінь, логарифм, степінь...? А коли система показує частково випадкову поведінку, це краще описати адити-

вними чи мультиплікативним шумом, внутрішнім чи зовнішнім? Це поведінка хаотична, турбулентна чи елементи системи просто гетерогенні? Це може бути навіть поєднання декількох варіантів. Які відмінності в поведінці моделі спричиняють ці різні можливості?

Деталізовані моделі: у деяких областях обчислювальних соціальних наук та економіки поширеною практикою є розробка комп'ютерних моделей, які охоплюють настільки багато деталей, наскільки це можливо. Такі моделі намагаються реалізувати всі відомі властивості досліджуваної системи. В ідеальному випадку, це властивості, які неодноразово спостерігалися в незалежних дослідженнях цієї системи, переважно в різних частинах світу. Вони у певному сенсі, відповідають спільним елементам багатьох "оповідань". І дослідники припускають, що ці властивості взагалі є характерними для таких системи, а не тільки спостерігалися в одному, потенційно дуже специфічному, випадку окремої системи.

Незважаючи на логічність такого переходу, існує і критика цього підходу:

- У випадку багатьох змінних, важко вказати їх взаємозалежність в правильному напрямку. (тільки згадайте, як багато різних можливостей для визначення нелінійної взаємодії та випадковості в системі)

- Деякі моделі, що містять багато змінних, можуть мати велике різноманіття різних розв'язків, які сильно залежать від початкових та граничних умов, або від історії системи. Це особливо стосується моделей, що проявляють нелінійні взаємодії, які мають кілька стаціонарних або нестационарних (наприклад, періодичні або неперіодичні коливання) розв'язків, або можуть навіть проявляти хаотичну поведінку. Таким чином, в залежності від вибору параметрів і початкових умов, така модель може показати будь-яку поведінку. Можна подумати, що така модель буде гнучкою моделлю світу, проте насправді це буде лише "адаптована" модель (тут мається на увазі, що ця модель буде демонструвати відомі властивості системи певним чином, але не буде відтворювати всі властивості системи – примітки перекладача). Більше того, вона, ймовірно, буде не дуже корисною для дослідження і розуміння механізмів, що лежать в основі поведінки системи. Як зазначив Джон фон Нейман: "Знаючи чотири параметри, я можу змодельювати слона, а знаючи п'ять, я можу змусити його махати хоботом", маючи на увазі, що модель з багатьма параметрами може змодельювати багато чого, але нічого не зможе пояснити.

- Коли є багато змінних, то важливо визначити, які з них незалежні одна від одної, а які ні. Якщо змінні взаємно залежні, то вплив одного ефекту легко може враховуватися двічі в одній моделі, що може призвести до упереджених результатів. Залежність між змінними може також спричинити серйозні проблеми в процесі вибору параметрів. Ця проблема відома, наприклад, для систем лінійних рівнянь, що містять колінеарні змінні.

- Модель з багатьма змінними, особливо нелінійна, може бути чутливою до конкретних уточнень параметрів, початкових або крайових умов, або до незначного впливу випадковості. Явища, подібні до гістерезису (залежність від історії) [9], фазових переходів [10] або "катастроф" [11], хаосу [12] та індуктованих шумом переходів [13] чітко це ілюструють.

- Параметри, початкові і граничні умови моделі з багатьма змінними важко калібрувати. Якщо доступний набір даних малий (або відсутній), то модель буде визначена занадто жорстко. А інші дані будуть оцінюватися на основі "експертних знань", інтуїції або емпіричних правил, але через чутливість моделі до цих даних, результати можуть бути вельми оманливим. Моделю-

вання багатьох сценаріїв, залежно від різних значень параметрів, може частково подолати проблему. Зокрема, такий підхід дає уявлення про можливі мінливості системної поведінки. Проте, в результаті, мінливість може бути досить великою. Крім того, коли модель містить безліч параметрів, повне дослідження простору їх допустимих значень, зазвичай, не можливе навіть з суперкомп'ютером.

- У моделях з багатьма змінними, часто важко визначити конкретний механізм, що зумовлює певне явище чи поведінку системи. Більшість змінних можуть не мати до нього ніякого відношення. Проте, для того, щоб зрозуміти явище, важливо визначити і змінні, і суттєві взаємодії (тобто взаємозалежності між змінними).

Прості моделі: прості моделі намагаються уникати (деяких) проблем детальних моделей, обмежуючи себе мінімальним числом змінних, необхідних для відтворення певного ефекту, явища чи поведінки системи. Вони націлені на краще розуміння так званих "стилізованих фактів", тобто спрощені, більш абстрактні або наближені до "ідеального типу" спостереження ("сутності"). Наприклад, у той час як докладний опис вимагає приділяти багато уваги конкретному змісту соціальним нормам або думкам і тому, як саме вони змінюються з часом, відповідно до культурного середовища, прості моделі абстрагуються від змісту соціальних норм і думок. Вони намагаються сформулювати загальні правила про те, як соціальні норми склалися і як змінилися думки, незалежно від їх змісту, з метою зрозуміти, чому ці процеси є історико-залежними ("гістерезис"), і яким чином вони залежать від мікроскопічних і макроскопічних впливів.

Очевидно, що прості моделі не описують (і навіть не намагаються описувати) всі деталі системи, що розглядається, тому іноді їх називають мінімальними або ігноруючими моделями. Підхід може бути представлений кількома цитатами. "Принцип KISS" – при побудові моделі вимагає "зберегти її простою і прямолінійною" [14]. Цей підхід також відомий як Бритва Оккама, або принцип ощадливості. Як казав Альберт Ейнштейн: "Зробіть все так просто, як це можливо, але не простіше" [15].

Явна перевага простих моделей в тому, що вони можуть полегшити аналітичну обробку і привести до кращого розуміння явища. Крім того, можна легко розширити прості моделі таким чином, щоб можна було зважати на гетерогенність компонентів системи. Це підтримує дослідження впливу особистості і створення простих "екологічних моделей" для соціально-економічних систем. Проте, Джордж Бокс висловився: "По суті, всі моделі є неправильними, хоча деякі з них корисні" [16].

Останній абзац стосується важливого моменту. Вибір моделі і ступінь її деталізації повинні залежати від мети моделі, тобто спектру застосування. Наприклад, є широкий вибір моделей для симуляції та моделювання руху автошляхів. Найбільш помітні класи моделей: "мікроскопічні" моделі з автомобілями, які прямують один за одним, з акцентом на взаємодію поодиноких транспортних засобів; "мезоскопічні" газокінетичні моделі, що описують зміну розподілу швидкостей автомобілів в просторі та часі; "макроскопічні" рідинно-динамічні моделі, що обмежують самі зміни середньої швидкості і щільності транспортних засобів; клітинні автомати, які спрощують мікроскопічні моделі з урахуванням швидкості симуляції. Кожен тип моделі має деякі області застосування. "Макроскопічні" моделі і моделі з використанням клітинних автоматів, наприклад, застосовують для великомасштабного моделювання трафіку, щоб визначати ситуацію з рухом на автостраді і виконувати короткострокові прогнози, в той час як "мікроскопічні"

використовуються для вивчення взаємодії транспортних засобів та розробки систем допомоги водієві. Для деяких з цих моделей також відомо як вони математично пов'язані одна з одною, тобто макроскопічні моделі можуть бути отримані з мікроскопічних певними видами спрощень (наближень) [17-18].

Основна мета моделі полягає в спрямуванні людської думки. Таким чином, моделі можна порівняти з міськими картами. Очевидно, що карти спрощують факти, в іншому випадку вони були б досить заплутаними. Ми не хочемо побачити кожну деталь (наприклад, кожне дерево) на карті, скоріше ми очікуємо, що карта покаже ті факти, в яких ми зацікавлені. І, залежно від мети, є абсолютно різні карти (що показують вулиці, цікаві місця, рельєф, мережі водопостачання, промислове виробництво, видобуток природних ресурсів, тощо)

Одне з поширених застосувань моделей – прогнозування, яке в основному (помилково) розуміють як "прогноз", хоча як правило це "виявлення наслідків того, що у системі, за певних умов, є очікувана поведінка". Зрозуміло, що на відміну від руху планети навколо Сонця, поведінку індивіда навряд чи можна спрогнозувати. Тим не менш, є певні тенденції або ймовірності робити певні речі, і ми, як правило, маємо свої гіпотези про те, що саме друзі, колеги, або наші члени родини будуть робити в певних ситуаціях.

Більше того, виявляється, що коли багато людей взаємодіють, їх сукупна поведінка іноді може бути цілком передбачуваною. Наприклад, "мудрість натовпу" заснована на статистичному законі великих чисел [19], згідно з яким індивідуальні варіації (тут: незалежна оцінка фактів) усереднюються.

Крім того, взаємодія між багатьма особами, як правило, обмежує ступінь свободи щодо того, що кожна людина може або буде робити. Це те, чому концепція "соціальні норми" є настільки важливою. Іншим прикладом є поведінка водія, яка визначається оточуючими транспортними засобами. В цьому випадку, динаміка руху потоку може бути математично дуже добре зрозуміла [18, 20]. Тим не менше, ніхто не може точно спрогнозувати той момент, у який вільний рух транспорту перетвориться на затори, а отже, не можна прогнозувати час, який буде затрачений на поїздку, достатньо добре. Причиною цього є залежна від історії динаміка, яка робить результат залежним від випадкових ефектів, а саме від розміру збурень у потоці руху. Однак є те, що може бути передбачене – це можливі стани руху і умови, за яких вони можуть виникнути. Можна також визначити ймовірність зупинки транспортних потоків, за певних умов, і це може допомогти оцінити час подорожі вільному чи переповненому потоці, за рахунок вимірювання впливів. Деталь, яка не може бути прогнозована точно – це момент, в який відбудеться переключення режиму з вільного на перевантажений режим у транспортному потоці, але ця деталь спричиняє значний вплив на систему. Вона може визначити, триватиме подорож 5 хвилин чи 40.

Тим не менш, важливо підкреслити, що на відміну від частих заяв, мета розробки моделей – це не тільки прогнозування. Джошуа Епштейн, наприклад, обговорює 16 інших причини для створення моделей, у тому числі пояснення, які будуть направляти збір даних, виявлення динамічних аналогій, відкриття нових питань, висвітлення ядра невизначеності, демонстрацію компромісів, навчання практиків та підтримка прийняття рішень, особливо в кризових ситуаціях [21].

Звичайно, не всі ставляться прихильно до простих моделей, і типова критика така:

- Як правило, легко знайти емпіричний доказ, що не є сумісним з простою моделлю (хоча, для справедливої

оцінки, треба розглянути ціль, з якою дану модель було створено). Тобто можна сказати, що прості моделі, зазвичай, сильно спрощують систему і залишають поза увагою більш-менш важливі факти. З цієї причини, вони можуть розглядатися як недостатні для опису системи, що розглядається.

- Саме через це спрощення, може бути небезпечно приймати рішення, ґрунтуючись на застосуванні простої моделі.

- Може бути важко виділити саме ті кілька відповідних змінних і параметрів, які повинна враховувати проста модель. Думки вчених можуть розходитись навіть стосовно формулювання фактів, що використовуються в моделі

- Прості моделі, як правило, відтворюють тільки кілька стилізованих фактів і часто не в змозі послідовно відтворювати велику кількість спостережень. Більша картина і системний погляд може загубитися. Створення простих моделей, сумісних з довгим списком стилізованих фактів, часто вимагає поліпшити або розширити модель додатковими елементами або залежностями між ними. Зрештою, цей процес поліпшення закінчується деталізацією моделей, залишаючи дослідника з проблемами, зазначеними у відповідному розділі.

- Деякі властивості і поведінка соціально-економічних систем не може бути зрозуміла при використанні методів, які були успішні в фізиці: розгляд системи як сукупності підсистем, аналіз і моделювання цих підсистем, а потім зведення їх разом можуть не призвести до правильного опису системи в цілому. Наприклад, кілька ефектів можуть діяти паралельно і мати таку відповідність і значимість впливу, які неможливо розділити. Це робить важким або навіть неможливим починати з нульового або першого порядку наближення і покращувати модель, додаючи нові члени (як це зроблено, наприклад, при падінні тіла – воно описується ефектом гравітаційного прискорення плюс ефект опору повітря). Узгальнюючі математичні терміни, що описують різні ефекти, можуть не сходитись. Також не ясно, чи можна складні системи зрозуміти за допомогою простих принципів, як це передбачається при використанні інструментів науки про комплексність. Деякі складні системи можуть вимагати складних моделей для їх пояснення, і ці моделі можуть включати в себе явища, складніших яких не піддається спрощенню. Прикладом такого випадку є турбулентність [22]. Це вже давно описана і нерозв'язана наукова проблема, що розглядалась видатними вченими, але їй досі не була пояснена до кінця.

Слід однак додати, що ми не знаємо сьогодні, чи є останній пункт актуальним, а також наскільки він актуальний і у яких випадках. Це поточна проблема, яку потрібно мати на увазі. Дане питання обмежує сферу, в якій класичне моделювання буде успішним, але ми, звичайно, ще не досягли цих меж.

Моделювання складних систем: моделювання соціально-економічних систем менш безнадійна справа, ніж думають [23] більшість фахівців з суспільних. В останні роки був досягнутий значний прогрес в різних областях, що стосуються цієї царини:

- Експериментальні дослідження [24-26]
- Інтелектуальний аналіз даних [27]
- Мережева наука [28]
- Агентно-орієнтоване моделювання [7, 29]
- Теорія складних систем (включаючи поняття подібності, феномен самоорганізації та хаос) [31]
- Теорія фазових переходів [10] ("катастрофи") [11], надкритичні стани [32], екстремальні події [33], та
- Проектування інтелектуальних систем [34-35]

Досягнення в цих галузях значно розширили наше розуміння складних систем. В зв'язку з цим ми повинні знати,

що термін "складність" використовується в різних значеннях. Тому ми будемо розрізняти три види складності:

- Структурну
- Динамічну, та
- Функціональну складність

Можна також додати алгоритмічну складність, що з'являється при потребі вирішити конкретні задачі за певний час. Наприклад, питання оптимізації логістичних або транспортних операцій сигналу є алгоритмічно складними.

Лінійні моделі не вважаються складними незалежно від того, скільки компонентів в них міститься. Прикладом структурної складності є автомобіль або літак. Вони побудовані таким чином, що динамічно більш-менш визначені і добре керовані, тобто динамічно прості, вони також виконують відносно прості функції (рух від місця розташування А в інше місце Б). Хоча прискорення автомобіля або періодичне коливання складними незалежно простої динаміки, прикладом складної динамічної поведінки є неперіодичні зміни, детермінований хаос, або поведінка системи залежить від історії (передумов/тих подій, які відбулися до досліджуваного моменту). Комплекс динамік вже може бути отриманий з простого набору пов'язаних між собою нелінійних рівнянь. У той час як рух планети, яка обертається навколо Сонця, відповідає простій динаміці, взаємодія трьох небесних тіл може демонструвати вже хаотичну динаміку. Екосистеми людського тіла або мозку – функціонально складні системи. Те ж саме буде правильним і для всесвітньої павутини, фінансових ринків, або діяльності країни чи багатонаціональної компанії.

Хоча взаємозв'язок між функцією, формою і динамікою був і залишається важливою науковою проблемою, у розумінні структурно і динамічно складних систем був досягнутий значний прогрес. Прості моделі на основі агентного підходу з великим числом взаємодіючих елементів системи (наприклад, частинки, автомобілі, пішоходи, особи або компанії) виявляють властивості, які нагадують соціально-економічні системи. Якщо припустити, що такі елементи можуть взаємно адаптуватися один до одного через нелінійну або мережеву взаємодію (тобто елементи знаходяться під впливом їх оточення і змінюють його самі), можна знайти різноманітну, залежну від історії поведінку системи, яка часто є нелогічною, навряд чи передбачуваною, і, здавалося б, некеруваною. Ці моделі кинули виклик звичному нам способу мислення і допомагають зрозуміти поведінку складних систем, яка досі є нічним кошмаром для осіб, що приймають рішення.

Наприклад, складні системи часто не реагують на спроби контролю, хоча у той час, коли система знаходиться поруч з "критичними точками" (також відомими як "переломні пункти"), такі спроби можуть спричинити раптовий (а часто несподіваний) фазовий перехід (так звані "переключення режиму"). Вони пов'язані з розривною зміною поведінки системи. Збій у вільному русі транспортного потоку – це приклад системної кризи без суттєвих наслідків, у той час як системна криза (наприклад, фінансовий крах або революція) може бути більш драматичною. Такі системні кризи часто поширюються каскадно, завдяки мережевій взаємодії [37]. Таким чином, складні адаптивні системи дозволяють зрозуміти екстремальні явища як результат сильних взаємодій в системі (а не як наслідок зовнішніх потрясінь). Крім того, взаємодія багатьох елементів системи може спричинити цікаві феномени самоорганізації та виникнення властивостей, які не можуть бути пояснені поведінкою поодиноких елементів чи їх поєднанням. Типовими прикладами є колективні структури руху в натовпі пішоходів, що іноді називають "інтелекту рою" [38].

Враховуючи це, можна припустити, що багато головоломок в області соціальних наук в один прекрасний день можуть бути пояснені простою моделлю, а саме, як виникають явища в результаті взаємодій багатьох окремих осіб та/або елементів іншої системи. Важливо відзначити, що ці явища не можуть бути пояснені лінійними моделями (які найбільш поширені в багатьох областях кількісних емпіричних досліджень в соціальних науках та економіці).

На жаль, не існує стандартного способу створити моделі системних явищ. З одного боку, є багато можливих видів нелінійних функціональних залежностей ("взаємодії") (див. кінець розділу "якісні описи"). З іншого боку, модельні припущення, що здаються правдоподібними, часто не дають бажаних результатів та очікуваного ефекту.

Незважаючи на ці труднощі і беручи до уваги залежні від часу зміни, нелінійні поєднання змінних, просторові або мережеві взаємодії, випадковість, та/або кореляційність (на ці інструменти в багатьох соціальних та економічних моделях в даний час не зважають в необхідному обсязі) іноді можуть дати неочікувані рішення давніх задач. Наприклад, виявляється, моделі репрезентативного агента (які є поширеними в економіці) можуть бути вельми оманливими, оскільки ті ж самі види взаємодії між компонентами системи можуть мати на увазі абсолютно різні і навіть протилежні висновки, коли взаємодії відбуваються в соціально-економічній мережі, а не з середніми (або випадковими вибраними) партнерами взаємодії [39]. Внаслідок цього, моделі часто продукують нелогічні результати тоді, коли просторово-часові або мережеві взаємодії актуальні. Проста нелінійна модель може пояснити явища, які складні лінійні моделі не в змозі відтворити. Насправді, це зазвичай відноситься до систем, які можуть продемонструвати кілька можливих станів (тобто систем, які не мають лише одну стійку рівновагу). Моделі з можливими рівновагами також необхідні для опису системних криз, наприклад, таких як нинішня фінансова криза [37].

Проблеми соціо-економічного моделювання

Багато людей до і після Поппера думали про логіку наукового відкриття [40]. Досить поширеною є думка, що хороша модель повинна бути застосовною для вимірювання багатьох систем певного виду, зокрема до вимірів в різних частинах світу. Чим більше спостережень модель може пояснити і чим менше параметрів вона містить, тим кращою вона, як правило, вважається.

Моделі з кількома параметрами часто можна простіше калібрувати, і причинно-наслідкові зв'язки можуть бути точніше визначені, але зазвичай не очікується, що ці моделі забезпечують точний опис реальності. Проте, хороша модель повинна робити прогнози щодо деяких можливих, але раніше невиявлених варіантів поведінки системи. У цьому випадку прогнозування не обов'язково означає прогноз певної події в певний момент часу в майбутньому. Це означає певну поведінку системи, що, як очікується, відбудеться (або просто можлива) за певних умов (наприклад, для деякої комбінації параметрів або деяких початкових умов). Коли такі умови виникають і система демонструє очікувану поведінку, то це вважається перевіреною моделлю, і в той же час модель буде вважатися помилковою, сфабрикованою, або викликати серйозні сумніви, якщо прогнозована поведінка не спостерігається. По експериментально складних моделях, які створені на основі прогнозів (наслідків), що можливі в природничих науках, можна оцінити альтернативні моделі залежно від їх якості у відтворенні та прогнозуванні вимірних даних. На жаль, виявляється, що такий підхід менше підходить для ідентифіка-

ції "правильної моделі" досліджуваної соціальної чи економічної системи. Як ми будемо обговорювати далі, це не лише через меншу кількість наявних даних про більшість аспектів соціально-економічної системи, але й у зв'язку з експериментальними обмеженнями через фінансові, технічні та етичні причини.

Обіцянки та складнощі експериментального підходу:

Поки що дуже дорого проводити соціальні і економічні експерименти, наприклад, в лабораторії. Вивчення поведінки людини в контрольованих умовах стало поширеним методом дослідження не тільки в психології, але і в експериментальній економіці і в соціології. Але кількість осіб, які поведінка яких може бути вивчена в таких експериментах, обмежена. Це передбачає велику ступінь статистичних варіацій, що робить досить складним визначення законів поведінки або можливість розрізняти відмінності між різними моделями. Статистичний шум створює щось на зразок туманної ситуації, у якій дуже важко побачити, що відбувається. У фізиці ця проблема може бути, як правило, вирішена кращим методом вимірювання (крім невизначеності, яка є наслідком законів квантової механіки). У соціальних системах, однак, є неприведений ступінь випадковості. Поведінка змінюється не тільки між окремими людьми у зв'язку з їх гетерогенністю (відрізняється "особистість"). Вона також варіюється від одного випадку до іншого, тобто прийняття рішень індивідуумом зазвичай не детерміноване. Це може бути пов'язано з різними причинами: невідомі зовнішні впливи (докладніше привертати увагу до особистості) або внутрішні фактори (дослідницька поведінка, ефекти пам'яті, рішення, прийняті помилково і т.д.).

Високий рівень поведінкової мінливості всередині і між людьми, ймовірно, зумовлений не тільки різною історією індивідуумів, а й тим, що дослідження поведінки і її гетерогенність корисні для навчання людей і для адаптивності людських груп до різних умов навколишнього середовища. Тому, застосовуючи теорію соціальної еволюції, припускають, що випадковість має важливе значення в соціальній та економічній системах, тому що це збільшує продуктивність системи. Крім того, гетерогенність може мати індивідуальні переваги, так як диференціації полегшує спеціалізація. Перевага варіації між індивідуумами також добре відома з екологічних систем [41].

Окрім перешкод у відкритті поведінкових законів, обмежене число учасників в лабораторних експериментах також обмежує число повторень і кількість експериментальних налаштувань або комбінацій параметрів, які можуть бути досліджені. Сканування параметрів простору неможливо й досі, тоді як було б корисно виявити іншу систему поведінки і визначити, за яких умов вона виникає. Може бути досить складно вибрати відповідну систему параметрів (наприклад, вигравні матриці в теоретико-ігровому експерименті).

Комп'ютерне моделювання свідчить, що в основному, можна було б отримати цікаві результати, якщо параметри, вибрані в різних експериментальних установках, передбачають іншу систему поведінки, тобто, якщо вони належать до різних "фаз" в просторі параметрів (див. рис. 1). Щоб визначити такий параметр комбінації, рекомендується виконувати комп'ютерне моделювання *попередньо*, з тим щоб визначити фазову діаграму для розглянутої системи. Проблема, однак, у тому, що базова модель навряд чи буде ідеальною, тобто навіть хороша соціальна чи економічна модель, як очікується, зроби тільки наближені передбачення. Як наслідок, один ефект, який намагаються виявити, може з'являтися при

різних (кількох) значеннях параметрів, або може не проявитися взагалі (враховуючи рівень випадковості) [42].

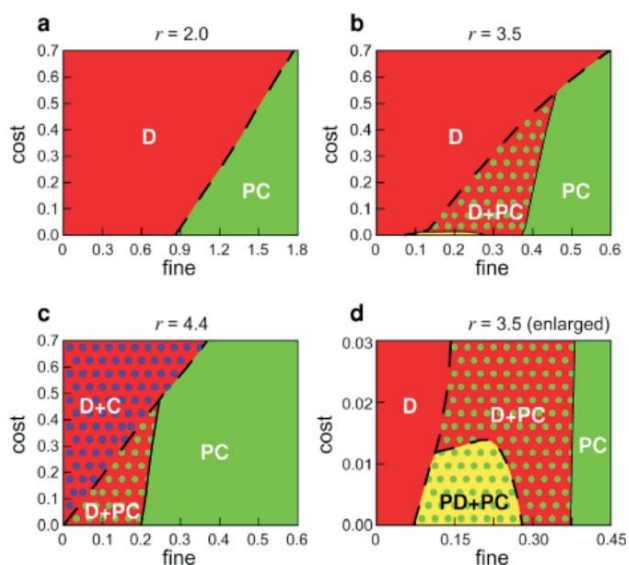


Рис. 1

Рисунок 1: Так звана "фазова діаграма" показує результат стратегії в просторі гри суспільних благ, де є кооператори (C), перебіжчики (D), кооператори, які карають перебіжчиків (ПК) і лицемірні карателі (PD), які карають інших перебіжчиків у той час як втікають самі. Спочатку, кожен з чотирьох стратегів займає 25 % комірок двовимірної решітки, в якій взаємодіють індивіди, а їх розподіл є однорідним в просторі. Проте, у зв'язку з їх еволюційною конкуренцією, два або три стратеги вимирають через деякий час. Нарешті, результуючий стан залежить від вартості покарання, штрафу, і синергії g співробітництва (коефіцієнт, за допомогою якого співпраця збільшує суму інвестицій). Відображені фазові діаграми для: (а) $g = 2,0$, (б) $R = 3,5$, і (в) $R = 4,4$. (Г) Розширена область малих витрат на $g = 3,5$. Суцільні лінії розділу показують, що отримані групи з усіх стратегій постійно змінюються зі зміною вартості покарання і покарання штрафом, а ламані лінії відповідають постійним змінам. Всі діаграми показують, що кооператори і перебіжчики не можуть зупинити поширення дорогих покарань, якщо тільки співвідношення дрібного штрафу і вартості є досить великим (див. зелену зону ПК). Слід зазначити, що за відсутності перебіжчиків, поширення покарання кооператорів вкрай повільне і слід вибрати модель з іншим типом динаміки. Невеликий рівень мутацій стратегії (яка постійно створює невелику кількість стратегій усіх видів, зокрема перебіжчиків) може в значній мірі прискорити їх поширення. Крім того, є параметр регіони, де покарання кооператорів можуть витіснити "безбілетники другого порядку" (що не передбачають покарання кооператорів) у присутності перебіжчиків (D + PC). Нарешті, для низьких витрат на покарання, але помірних покарань штрафами, може трапитися, що "моралісти", які співпрацюють і карають за некооперативну поведінку, можуть вижити, тільки утворивши "безбожний союз" з "аморальними", лицемірними карателями (PD+PC).

Деякі моделі вірні: вище зазначені властивості соціо-економічних систем означають, що важко визначити "правильну" модель серед кількох альтернативних. Для ілюстрації давайте візьмемо модель руху автомобілів, яка використовується для симуляції вільного руху транспорту у мегаполісі. Завдяки радіолокаційним датчикам стало можливим вимірювати прискорення автомобілів як

функцію типових змінних для моделей автомобілів, яка складається з відстані до машини, що рухається попереду, власної швидкості, і різниці у швидкості. При заміні параметрів різних моделей автомобілів, що рухаються один за одним, даними реальних вимірів, виявлено те, що залишкова помилка між комп'ютерним моделюванням і вимірюванням приблизно така ж, як і для більшості інших моделей. Помилка калібрування коливається між 12 і 17 відсотками, і на думку авторів, "жодна модель не може бути визнана як найкраща" [43]. Коли помилка різних моделей (тобто відхилення між моделлю та реальними даними) визначається як набір даних (використовувані параметри моделі визначаються з попереднього набору даних), результат перевірки помилки, як правило, варіюється від 17 до 22 відсотків (більші помилки перевірки трапляються, переважно, у випадках, коли набір даних для калібрування дуже обмежений) [43]. Знову ж, продуктивність різних моделей така схожа, що було б цілком невиправданим вибрати одну з них в якості "правильної" моделі і виключити всі інші. Більш детальний аналіз показує, що не тільки динаміка руху автомобіля відрізняється в залежності від водіїв, але й поведінка конкретних водіїв також може змінюватися з часом [44]. Ми повинні припустити, що те ж саме відноситься практично до всіх видів поведінки, а не тільки у випадку керування автомобілем. Більш того, цілком імовірно, що багато видів поведінки (наприклад, прийняття рішень) змінюватимуться навіть більше, ніж поведінка автомобілів, що рухаються один за одним. Як наслідок, ще більш складно розрізняти різні моделі між собою за допомогою емпіричних чи експериментальних даних, що буде означати, що ми, можливо, повинні прийняти кілька моделей, щоб бути (можливо) "правими", навіть якщо вони не узгоджуються одна з одною. Іншими словами, відповідь на питання "Що таке краща модель?" або "Як правильно вибрати модель?" не може бути дана в розумних межах, крім того, вона запропонована в наступному розділі. Ця ситуація трохи нагадує нерозв'язаність теореми Гьоделя [45], яка стосується повноти деяких систем аксіом.

Може бути привабливою, ідея визначити в якості найкращої моделі ту, яка є найуспішнішою, наприклад, в плані кількості цитувань, які вона отримує. Проте, успіх не обов'язково є показником гарної моделі. Візьмемо, в якості прикладу, моделі, що використовуються для торгівлі акціями. Очевидно, що навіть якщо ціни на акції варіюватимуться абсолютно випадковим чином і, якщо середній успіх кожної моделі такий же за нескінченний період часу; коли різні трейдери будуть застосовувати різні торгові моделі, вони будуть по-різному успішними у будь-якій обраній точці в часі. Таким чином, можна було б розглянути деякі моделі як більш успішніші, ніж інші, в той час як це було б тільки питанням удачі. В інших точках в часі, інші моделі будуть успішніші за інші.

Звісно, якщо поведінка не просто випадкова, деякі моделі повинні бути кращі, ніж інші, і це в кінцевому випадку має давати можливість відокремити "хороші" моделі від "поганих" через ефект "мудрості натовпу". Проте, "мудрість натовпу" передбачає незалежні судження, в той час як вчені лише повторювали взаємодії. Було експериментально показано, що це, як правило, створює консенсус, але цей консенсус буде часто відхилятися від істини [46]. Проблема виникає в результаті суспільного впливу, що створює ефект випасу, який може підірвати вплив "мудрості натовпу". Звичайно, це в основному застосовується, коли факти не є достатньо очевидними, проте ситуація в області соціальних наук пов'язана з високою мінливістю спостережень, в той час як така ж проблема менш актуальна в природничих науках завдяки високій точності вимірю-

вання. Проте, фізик Макс Планк, відомий завдяки цитаті: "Наука прогресує похороном за похороном" [47]. Дослідження Куна в темі наукових революцій [48] показує, як добре, що науково-технічний прогрес не є безперервним, а містить раптові зміни парадигми. Це демонструє проблему, що виникає як наслідок ефекту випасу. Навіть колективний договір не є гарантією правильності моделі, як це показує заміна класичної механіки на релятивістську квантову теорію. Іншими словами, успіх не обов'язково є показником хороших моделей. Це може бути просто показником того, що модель є найбільш модною в даний момент часу. Проблема загострюється в процесі навчальному відборі, який вирішує, які вчені роблять кар'єру, а які ні. Це створює значну інерцію в адаптації до нових знань, тобто наукові напрямки, ймовірно, зберігаються довше, ніж це обгрунтовано фактами.

Жодна модель не є вірною: Типовий підхід у природничих науках полягає в підтвердженні або спростуванні раніше неперевіраних прогнозів (наслідків) альтернативних моделей, використовуючи іноді досить складні експерименти. Тільки в рідкісних випадках, дві альтернативні теорії виявляються такими ж близькими, як і хвили частинки в квантовій механіці. У більшості випадків, однак, дві теорії А і В не є ідентичними і є суперечливими, що означає, що вони повинні робити різні прогнози в залежності від типу ситуацій. Експерименти проводяться, щоб з'ясувати, чи є теорія А або теорія В правильною, або ж вони обидві відрізняються від результатів вимірювань. Якщо експериментальні дані підтверджують теорію А, і не сумісні з теорією В (тобто істотно відрізняються від неї), то можна відкинути теорію В назавжди. Таким чином, експерименти використовуються, щоб звузити кількість альтернативних теорій, поки не залишається одна теорія, яка вважається "істинною".

Коли моделюються соціальні чи економічні системи, наступна ситуація навряд чи відбудеться: вчені визначають несумісність передбачення теорій А і В, і виявляється, що експеримент підтримує теорію А, але не підтримує теорію В. Та наступного разу, інший учений виявляє інший набір несумісних прогнозів, і ще один експеримент підтримує теорію В, але не підтримує теорію А. У зв'язку з властивим соціально-економічним моделям спрощенням, для будь-якої моделі має бути легко знайти емпіричні докази, що суперечать їй. Що робити в таких випадках? Відмова від моделювання, ймовірно, не найкраща ідея. Узагальнювати модель завжди можна, але це, як правило, в кінцевому випадку деталізує модель, що спричиняє ряд проблем, які були викладені у відповідному розділі. Можна було б також залишити багато конкретних моделей і визначити їх відповідні діапазони дії. Однак це не буде приводити до цілісної або системної моделі. Можливим виходом буде плюралістичний підхід до моделювання, що наведений у заключному розділі цього огляду.

Моделювання в сучасній фізиці, здається, має аналогічні проблеми. У той час, як можна було б очікувати, що кожен експеримент зменшує кількість непідтверджених моделей, на практиці виходить, що після кожного експерименту вчені придумують ряд нових моделей. Як кажуть: "кожен, хто відповів на одне питання, задає десять нових." Насправді, є безліч моделей елементарних частинок, те ж саме стосується і космологічних моделей. Багато моделей вимагають припустити існування факторів, які ніколи не були виміряні і, можливо, ніколи не будуть виміряні, таких як бозони Хіггса, темна матерія або темна енергія. Нам, ймовірно, доведеться жити з тим, що моделі просто ніколи не охоплюють всі деталі реальності.

Крім того, як уже зазначалося, розуміння елементарних частинок і фундаментальних сил у фізиці ще не

пояснює, що відбувається у світі навколо нас [49, 50]. Виникає багато явищ, які ми спостерігаємо в біологічному, економічному і соціальному світі, які ніколи не будуть виведені як наслідок властивостей елементарних частинок, бо властивості систем, які виникають, не можуть бути зрозумілі з властивостей їх компонентів поодиночки. Ці явища, зазвичай, взаємодіють одразу з великою кількістю компонентів системи. Давайте будемо чесними: наші підручники не пояснюють навіть прості особливі властивості води, хоча сама молекула H_2O не є найскладнішою. (Звичайно, це не означає, що ця ситуація залишиться такою назавжди – див. відповідну роботу, наприклад, Г. Юджина Стенлі.)

Загалом, як і раніше, існує серйозна прогалина в розумінні зв'язку між функцією, динамікою і формою. Поява чого-небудь (феномену) часто є несподіваною. Лікувальний ефект нового хімічного препарату не може бути зрозумілим за допомогою лише комп'ютерного моделювання. До цих пір ми також не розуміємо емоції і свідомість, і ми не можемо розрахувати біологічну придатність того чи іншого виду на комп'ютері. Найбільш захоплюючі рішення головоломок в науці стосуються таких неочікуваних феноменів. Було б цікаво дослідити як соціальні та економічні явища, такі як довіра, солідарність та економічна цінність можуть бути пояснені в якості системних явищ (emergent phenomena) [3].

Модель описує деякі особливості, але може бути неадекватною: Вчені часто пропонують передати свої методи в інші області застосування, ґрунтуючись на аналогіях, які вони бачать в поведінці різних систем. Дослідження систем, як наукова галузь (systems science), базується на таких аналогіях і фізики також узагальнюють свої методи. Питання в тому, наскільки корисним може бути "фізиколістичний підхід", який "передає" властивості систем багатьох частинок в соціальні чи економічні системи, хоча люди, звичайно, розумніші за частинки і мають ще чимало поведінкових ступенів свободи.

Звичайно, фізики ніколи не стверджували, що моделі частинок можуть забезпечити точний опис соціальних чи економічних систем. Чому ж тоді вони думають, що такі моделі можуть зробити свій внесок у розуміння цих систем? Тому що вони мають досвід роботи з тим, що може статися в системах, які характеризуються нелінійною взаємодією багатьох компонентів системи у просторі та часі, у тих випадках, коли випадковість має важливе значення. Вони знають як колективний феномен самоорганізації на "макроскопічних" (об'єднуючих) рівнях може бути результатом взаємодій на "мікроскопічному" (індивідуальному) рівні. І вони дізналися, як це може призвести до фазових переходів (так званий "режим зрушення" або "катастрофа"), коли параметр системи ("параметр управління") перетинає критичну точку ("переламний момент"). Крім того, вони виявили, що у критичній точці, система, як правило, показує безмасштабну поведінку (степеневу залежність, або інші залежності "з товстими хвостами", і навіть розподіл Гаусса).

Важливо відзначити, що характерні риси системи в критичній точці, як правило, "універсальні", тобто вони в основному не залежать від деталей взаємодії. Це те, чому фізики думають, що можуть абстрагуватися від деталей. Звичайно, деталі прогнозовано будуть важливі тоді, коли система близька до критичної точки. Слід також додати, що існує цілий ряд різних видів універсальної поведінки, так звані класи універсальності. Проте, багаточастинкові моделі дозволяють отримати краще розуміння режиму зрушень, який не так добре пояснюють найбільш авторитетні моделі в економіці чи соціальних науках. Однак, якщо переломний момент знаходиться далеко, корисність багаточастинкових моделей

обмежена і більш докладні описи їхнього об'єднання зроблені економістами і соціологами можна вважати більш адекватним.

Іноді не дуже зрозуміло, як далеко аналогії можуть завести, або ж вони взагалі є хибними. Візьмемо нейромережеві моделі. У певному сенсі, вони можуть бути використані для моделювання навчання, узагальнення та абстракції. Проте, сподівання на те, що вони зможуть пояснити функціонування мозку, значною мірою, не виправдались. Сьогодні ми знаємо, що мозок працює зовсім по-іншому, але теорія нейронних мереж зумовила появу багатьох цікавих інженерних програм, які навіть комерційно використовувалися.

Розглянемо, в якості іншого прикладу, моделі співпраці на основі пов'язаних осциляторів. Поза всяким сумнівом, синхронізація циклічної поведінки є одним з найбільш цікавих колективних явищ, які ми знаємо, і такі моделі дозволяють вивчати, як групи осциляторів взаємодіють один з одним чи розвалюються на підгрупи (які не синхронізовані одна з одною, в той час як осцилятори в кожній з них – синхронізовані) [51]. Незважаючи на цю аналогію з груповою формацією і груповою динамікою, не ясно, що ми можемо дізнатися з таких моделей для соціальних систем.

Аналогічне положення іноді наводять для спінових моделей, які були запропоновані для опису процесів формування громадської думки або виникнення співпраці в ситуаціях, пов'язаних з соціальною необхідністю вибору. У зв'язку з цим було підкреслено, що соціальні взаємодії не завжди можуть бути розбиті на парні взаємодії. Деякі взаємодії включають три або більше осіб в один і той же час, що може змінити характер взаємодії. Тим не менше, подібні явища були вивчені шляхом накладення парних взаємодій, і ще не до кінця зрозуміло, наскільки важливою є відмінність.

Давайте, нарешті, з'ясуємо, чи є нереальні припущення, як правило, ознакою поганих моделей? Обговорення в розділі "Прості моделі" припускає, що це не обов'язково так. Здається, більше питань виникає щодо мети моделі, яка визначає рівень спрощення, і тільки лічені питання стосуються доцільності більшості моделей. Однак слід зазначити, що більш реалістична модель не обов'язково є більш корисною. Наприклад, багато моделей руху автомобілів більш реалістичні, ніж моделі динаміки руху рідини, але вони не підходять для симуляції багаторівневих (large-scale) мереж руху транспорту в режимі реального часу. Для соціальних систем, є цілий ряд різних підходів до моделювання, у тому числі такі:

- *Фізичний (або фізиколістичний) підхід в моделюванні:* соціо та економ-фізики часто розглядають соціальні взаємодії на такому рівні абстракції, що їх моделі зводяться до багаточастинкових (або навіть до спінових моделей з двома можливостями поведінки). Такі моделі фокусуються на ефектах нелінійних взаємодій і є окремим випадком обмеженої моделі раціональності, їх іноді називають моделями з нульовим інтелектом [52]. Тим не менш, вони можуть відображати особливості колективного розуму чи "розуму натовпу" [38]. Крім того, вони підходять для опису режиму зрушення або ситуації шаблонного вибору [53], тобто ситуації, коли окремі особи реагують на середовище більш-менш підсвідомими і автоматичними способами. Пауль Омерод, економіст за фахом, міркує таким чином [54]: "У багатьох соціальних та економічних контекстах, самосвідомість агентів не має особливого значення... Незалежно від того, які саме передові пізнавальні здібності агентів в абстрактному інтелектуальному плані, це так, як ніби вони працюють з відносно низькою пізнавальною спроможністю

у системі. Кориснішою в області соціальних наук є "нуль модель" – моделювання агента з близьким до нуля інтелектом. Тільки тоді, коли це не вдається, слід розглянути більш ускладнені варіанти".

• **Економічний підхід до моделювання:** більшість економістів, схоже, мають абсолютно протилежний підхід. Їх концепція "людина економічна" ("ідеальний егоїст") припускає, що люди приймають стратегічні рішення, вибираючи оптимальний із своїх варіантів поведінки. Це вимагає від людини "нескінченної" пам'яті і таких же обчислювальних потужностей. Бо можна говорити про нескінченно-розвідувальний підхід. Він також відомий як підхід раціонального вибору і має ту перевагу, що очікувана поведінка індивідуумів може бути отримана аксіоматично. Таким чином, можна було б побудувати об'ємну і вражаючу теорію мейнстріму. Знову ж таки, надійність цієї теорії, залежить, звичайно, від реалізму власних припущень.

• **Соціологічний підхід до моделювання:** деякі школи соціологів також використовують моделі раціонального вибору. Проте, на відміну від економістів, вони зазвичай не припускають, що люди радикально оптимізують свою власну вигоду. Їхні моделі швидше розглядають, що в соціальних системах обмін більш диференційований і багатогранний. Наприклад, при виборі своєї поведінки, люди можуть розглядати не тільки свої власні переваги, але й також переваги взаємодії свого партнера (партнерів). В останні роки, "Теорія справедливості" отримала особливу увагу [55] і часто протиставляється теорії раціонального вибору. Ці соціальні аспекти прийняття рішень тепер також вводяться і в економічне мислення [56].

• **Психологічний підхід до моделювання:** психологи, певно, менш аксіоматичні і зазвичай орієнтуються на емпіричні спостереження. Вони визначили поведінкові парадокси, які не відповідають теорії раціонального вибору, принаймні, в її класичному варіанті. Наприклад, виявляється, що поведінка більшості людей не проявляє схильності до ризику. Для пояснення спостережень були розроблені нові концепції, в тому числі теорія перспектив (*prospect theory*) [57], теорія задовільного (*satisficing theory*) [58] і концепції поведінкової мінливості [59]. Зокрема, виявляється, що окремі рішення залежать від відповідних рамок. У своїй Нобелівській лекції з економіки, Деніел Канеман висловився про це так: "Раціональні моделі психологічно нереальні... центральна характеристика агентів – це не те, що вони міркують погано, а те, що вони часто діють інтуїтивно. А поведінка цих агентів не може керуватися тим, що вони в змозі обчислити, а може керуватися тим, що вони, виявляється, бачать в даний момент". Таким чином, сучасні напрямки досліджень пов'язані з пізнанням і нейронаукою. Ці результати в даний час знаходять свій шлях в економіці через галузі експериментальної, поведінкової та нейроеконіміки.

Таким чином, в даний час немає єдиного підходу, який би задовольнив всіх вчених. Деякі з підходів більш стилізовані або більш аксіоматичні. Інші знаходяться, в кращому випадку, у кількісному узгодженні з емпіричними чи експериментальними даними, але математично менш розроблені. Таким чином, вони теоретично менше підходять для отримання наслідків поведінки в ситуаціях, які не були вивчені до цих пір. Отже, всі моделі мають свої сильні і слабкі сторони, незалежно від того, наскільки реальними вони можуть бути. Більше того, жодна з математичних моделей, доступних на сьогодні, є не досить коректною, щоб відобразити всю складність соціальних взаємодій між багатьма людьми.

Різні інтерпретації однієї моделі: Ще одна складність моделювання соціально-економічних систем полягає в тому, що вчені не можуть домовитися щодо

тлумачення моделі. Обговоримо, наприклад, мультиноміальну логіт модель (*multi-nomial logit model*), яка була використана для моделювання процесу прийняття рішень в самих різних контекстах і відзначена Нобелівською премією [60]. Ця модель може бути отримана в фреймі максимізації корисності, припускаючи, що раціональні агенти адекватно приймають рішення в умовах невизначеності. Сама ж модель, однак, може бути отримана і іншими способами. Наприклад, це може бути пов'язано з психологічними законами або розподілами статистичної фізики [61]. У першому випадку, інтерпретація сумісна з підходом нескінченновимірної інтелектуальної розвідки, в той час як в останньому випадку, вона сумісна з підходом нульового інтелекту, який є досить загадковим. Порівняння цих підходів викладено у відповідному посиланні [61].

Обговорення та перспективи

Плюралістичне чи ймовірнісне моделювання і багато точок зору з усього світу: який вихід? Підсумовуючи попередню дискусію, мало ймовірно, що ми коли-небудь матимемо єдину, узгоджену, повну і коректну модель соціоекономічної системи. Може так статися, що ми навіть не знайдемо такої "Великої теорії всього" у фізиці. Останнім часом сумніви в цьому напрямку навіть були підняті деякими вченими, що займаються фізикою частинок [62, 63]. Можливо, вже час попроситися з модельним підходом, який вірить у можливість унікальної, загальної, комплексної та узгодженої моделі. Принаймні, немає ніяких теоретичних або емпіричних даних для такої можливості.

Це вимагає зміни парадигми в модельному підході. Важливо бути чесним, і розуміти, що кожна модель обмежена, але більшість моделей є корисними для чогось конкретного. Іншими словами, ми повинні бути терпимі щодо моделей один одного і бачити, де вони можуть доповнювати один одного. Це не означає, що будуть окремі моделі для окремих частин системи, по одному для кожної підсистеми. Як вже зазначалося, важко вирішити, діє конкретна модель при виборі даної підсистеми, чи ні. Можна припустити, що кожна модель має певний термін дії або корисність, яка може бути виміряна за шкалою від 0 до 1, і далі її валідність залежить від того для якої частини чи аспекта системи вона застосовується. Ця валідність може бути кількісною, наприклад, при використанні критерію узгодженості даної системи або точності опису іншої системи того ж виду.

Існують моделі для кожного компонента або аспекту системи. Можна розглянути їх всі і дати кожній з них статус відповідно до їх дії, що визначена статистично, у порівнянні з емпіричними або експериментальними даними. Аналогічно ефекту "мудрості натовпу" [19], який базується на законі великих чисел, це повинно призвести до кращої кількісної підгонки або передбачення, ніж більшість (або навіть кожна) моделей окремо, незважаючи на ймовірні невідповідності між моделями. Такий підхід можна назвати *плюралістичним* (*pluralistic*) [64], бо він дозволяє об'єднувати кілька точок зору. Він також може бути названий *ймовірнісним* (*possibilistic*) [65] підходом, тому що враховує, що кожна модель має тільки певну ймовірність бути правильною, тобто кожна модель описує можливу істину. Тим не менш, це не повинно бути неправильно зрозуміло – в якості заклику до суб'єктивістського підходу. Плюралістичний підхід до моделювання також припускає, що є деяка основоположна реальність, яку деякі, більшість з нас або навіть всі розділяють (залежно від аспекту того, про що говорить одна людина).

Хоча багатьох вчених і осіб, що приймають рішення, шокує необхідність відмовитися від віри в існування унікальної, вірної моделі, рішення, чи політики, плюралістичний підхід до моделювання вже використовується

ся. Прогнозування ураганів та моделювання клімату є такими прикладами [66]. Навіть сучасні літаки управляються виключно кількома комп'ютерними програмами, що виконуються паралельно. Якщо результати роботи не узгоджені один з одною, рішення приймається більшістю і реалізується. Хоча такий підхід може здатися досить страшним, але він працює на диво добре до цих пір. Більше того, коли краш-тести нещодавно розроблених автомобілів моделюються на комп'ютері, такі розрахунки знову виконуються на основі кількох моделей, кожна з яких базується на різних методах наближення. Тому логічно припустити, що плюралістичний підхід до моделювання буде широко використовуватися в майбутньому, коли потрібно змоделювати складну систему.

Вчені, що працюють в галузях природничих та суспільних наук можуть повчитись одне у одного: вже стверджувалося, що всі методи моделювання мають свої сильні і слабкі сторони, і що вони повинні розглядатися як взаємодоповнюючі, замість того, щоб суперечити один одному. Це також означає, що вчені різних дисциплін можуть отримати користь і повчитись один у одного. Сферами плідної багатопрофільної співпраці можуть бути:

- моделювання саме соціально-економічних систем;
- розуміння тих впливів, які створені системи мають на соціально-економічний світ;
- моделювання соціальних механізмів, які керують еволюцією і розповсюдженням інновацій, норм, технологій, продуктів і т.д.;
- наукові проблеми, пов'язані з питаннями управління складністю або розробкою більш досконалих систем;
- застосування соціального механізму координації та співпраці для створення технічної системи, яка здатна самоорганізуватися (наприклад, децентралізована управління руху або систем "рівний рівному");
- розробка техніко-соціальних систем [67], в яких використовуються технології в поєднанні з соціальною компетентністю і людськими знаннями (наприклад, Wikipedia, ринки прогнозування, рекомендаційні систем, або семантичні мережі).

Враховуючи великі потенціали такої співпраці, прийшов час подолати дисциплінарні кордони. Вони, здається, мають все менше і менше сенсу. Виявляється що багатодисциплінарні, широкомасштабні зусилля потрібні для опису і достатньо доброго зрозуміння соціально-економічних систем та для більш успішного вирішення практичних завдань людства (наприклад, фінансово-економічної кризи).

Подяки

Автор виражає подяку за підтримку ETH Competence Center "Coping with Crises in Complex Socio-Economic Systems" (CCSS) і надання гранту ETH Research Grant CH1-0108-2 і and by the Future and Emerging Technologies programme FP7-COSI-ICT of the European Commission through the project Visioneer (grant no.: 248438).

Примітки

¹ Переклад виконано з дозволу автора за Helbing D. Pluralistic Modeling of Complex Systems. In: Science and Culture, Vol. 76, September-October 2010 : 315 – 329.

Переклад: **Поліна Черній** (аспірант факультету соціології, Київський національний університет імені Тараса Шевченка).

Список використаних джерел

1. Comte A. Social Physics: From the Positive Philosophy (Calvin Blanchard, New York, 1856).
2. Comte A. Course on Positive Philosophy (1830-1842).
3. Helbing D. Grand socio-economic challenges, Working Paper, ETH Zurich (2010).

4. Bollinger L. C. Announcing the Columbia committee on global thought, see <http://www.columbia.edu/cu/president/.../051214-committee-global-thought.html>
5. Spencer H. The Principles of Sociology (Appleton, New York, 1898; the three volumes were originally published in serial form between 1874 and 1896).
6. Bertalanffy L. von. General System Theory: Foundations, Development, Applications (George Braziller, New York, 1968).
7. Epstein J. M. Generative Social Science. Studies in Agent-Based Computational Modeling (Princeton University, 2006), p. 51.
8. Dyson F. A meeting with Enrico Fermi. Nature 427, 297 (2004).
9. Mayergoyz I.D. Mathematical Models of Hysteresis and their Applications (Academic Press, 2003).
10. Stanley H.E. Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena (Oxford University, 1987).
11. Zeeman E.C. ed. Catastrophe Theory (Addison-Wesley, London, 1977).
12. Schuster H.G. and Just W. Deterministic Chaos (Wiley-VCH, Weinheim, 2005).
13. Horsthemke W. and Lefever R. Noise-Induced Transitions: Theory and Applications in Physics, Chemistry, and Biology (Springer, 1983).
14. "KISS principle" at Wikipedia.org, see http://en.wikipedia.org/wiki/KISS_principle
15. Einstein A. "On the Method of Theoretical Physics". The Herbert Spencer Lecture, delivered at Oxford (10 June 1933); also published in Philosophy of Science 1(2), p. 165 (April 1934).
16. Box G.E.P. and Draper N.R. Empirical Model-Building and Response Surfaces (Wiley, 1987), pp. 74+424.
17. Helbing D. Derivation of non-local macroscopic traffic equations and consistent traffic pressures from microscopic car-following models. European Physical Journal B 69(4), 539-548 (2009), see also <http://www.soms.ethz.ch/research/traffictheory>
18. Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems. Reviews of Modern Physics 73, 1067-1141 (2001).
19. Galton F. Vox populi. Nature 75, 450-451 (1907).
20. Helbing D. et al., see collection of publications on analytical traffic flow theory at <http://www.soms.ethz.ch/research/traffictheory>
21. Epstein J.M. Why model? Journal of Artificial Societies and Social Simulation 11(4), 12 (2008), see <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html>
22. Davidson P.A. Turbulence (Cambridge University, Cambridge, 2004).18
23. Weidlich W. Sociodynamics: A Systemic Approach to Mathematical Modelling in the Social Sciences (Dover, 2006).
24. Kagel J.H. and Roth A.E. The Handbook of Experimental Economics (Princeton University, Princeton, NJ, 1995).
25. Guala F. The Methodology of Experimental Economics (Cambridge University Press, 2005).
26. Helbing D. and Yu W. (2010) The future of social experimenting. Proceedings of the National Academy of Sciences USA (PNAS) 107(12), 5265-5266; see also <http://www.soms.ethz.ch/research/socialexperimenting>
27. Maimon O. and Rokach L. The Data Mining and Knowledge Discovery Handbook (Springer, 2005).
28. Jackson M. O. Social and Economic Networks (Princeton University, 2008).
29. Gilbert N. (ed.) Computational Social Science (Sage, 2010).
30. Schweitzer F. (ed.) Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics (CRC, 1997).
31. Miller J.H. and Page S.E. Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life (Princeton University, Princeton, NJ, 2007).
32. Sornette D. Critical Phenomena in Natural Sciences. Chaos, Fractals, Selforganization and Disorder: Concepts and Tools (Springer, Berlin, 2006).
33. Albeverio S., Jentsch V. and Kantz H. (eds.), Extreme Events in Nature and Society (Springer, Berlin, 2005).
34. Floreano D. and Mattiussi C. Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and Technologies (MIT, Cambridge, MA, 2008).
35. Nolfi S. and Floreano D. Evolutionary Robotics : The Biology, Intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines (MIT, Cambridge, MA, 2000).
36. Helbing D., Deutsch A., Diez S., Peters K., Kalaidzidis Y., Padberg K., L'ammer S., Johansson A., Breier G., Schulze F., and Zerial M. Biologistics and the struggle for efficiency: Concepts and perspectives. Advances in Complex Systems 12(6), 533-548 (2009).
37. Helbing D. System risks in society and economics. Sante Fe Institute Working Paper #09-12-044 (2009), see <http://www.santafe.edu/media/workingpapers/09-12-044.pdf>
38. Moussaid M., Garnier S., Theraulaz G. and Helbing D. Collective information processing and pattern formation in swarms, flocks, and crowds. Topics in Cognitive Science 1(3), 469-497 (2009).
39. Helbing D., Szolnoki A., Perc M. and Szabó G. Evolutionary establishment of moral and double moral standards through spatial interactions. PLoS Computational Biology 6(4), e1000758 (2010).
40. Popper K.R. The Logic of Scientific Discovery (Hutchinson, 1959); original German version: Logik der Forschung (Springer, Vienna, 1935).
41. Tilman D., Wedin D. and Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. Nature 379, 718-720 (1996).
42. Traulsen A., Semmann D., Sommerfeld R.D., Krambeck H.-J. and Milinski M. Human strategy updating in evolutionary games. Proceedings of the National Academy of Sciences USA (PNAS) 107(7), 2962-2966 (2010).

43. Brockfeld E., K'uhne R. D. and Wagner P. Calibration and validation of microscopic traffic flow models. Transportation Research Board 1876, 62-70 (2004).
44. Kesting A. and Treiber M. Calibrating car-following models by using trajectory data: Methodological study. Transportation Research Record 2088, 148-156 (2008).
45. G'odel K. On Formally Undecidable Propositions of Principia Mathematica and Related Systems (Basic, New York, 1962).
46. Lorenz J., Rauhut H., Schweitzer F. and Helbing D. How social influence undermines the wisdom of crowds. Submitted (2010).
47. Max Planck: "An important scientific innovation rarely makes its way by gradually winning over and converting its opponents, but rather because its opponents eventually die, and a new generation grows up that is familiar with it."
48. Kuhn T.S. The Structure of Scientific Revolutions (University of Chicago, 1962).
49. Vicsek T. The bigger picture. Nature 418, 131 (2002).
50. Pietronero L. Complexity ideas from condensed matter and statistical physics. Europhysicsnews 39(6), 26-29.
51. Mikhailov A.S. and Calenbuhr V. From Cells to Societies. Models of Complex Coherent Action (Springer, Berlin, 2002).
52. Bentley R. A. and Omerod P. Agents, intelligence, and social atoms. Preprint available at <http://www.paulomerod.com/pdf/BentleyOrmerodSept09.pdf>
53. Gintis H. The Bounds of Reason: Game Theory and the Unification of the Behavioral Sciences (Princeton University, 2009).
54. Omerod P. What can agents know? The feasibility of advanced cognition in social and economic systems. Communication, Interaction and Social Intelligence (2008), see <http://www.paulomerod.com/pdf/AISB08%20Whatcanagentsknow%20Paul%20Ormerod.pdf>
55. Fehr E. and Schmidt K.M. A theory of fairness, competition, and cooperation. The Quarterly Journal of Economics 114(3), 817-868 (1999).
56. Frey B. Economics as a Science of Human Behaviour: Towards a New Social Science Paradigm (Kluwer Academic, Dordrecht, 1999).
57. Kahneman D. and Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk. Econometrica 47(2), 263-291 (1979).
58. Simon H. A. A behavioral model of rational choice. The Quarterly Journal of Economics 69(1), 99-118 (1955).
59. Gigerenzer G., Todd P.M. and the ABC Research Group, Simple Heuristics That Make Us Smart (Oxford University, 2000).
60. McFadden D. Conditional logit analysis of qualitative choice behaviour, in P. Zarembka (ed.) Frontiers of Econometrics (Academic Press, New York, 1974), pp. 105-142.
61. Helbing D. Quantitative Sociodynamics. Stochastic Methods and Models of Social Interaction Processes (Kluwer Academic, Dordrecht, 1995).
62. Woit P. Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law for Unity in Physical Law (Basic, New York, 2006).
63. Smolin L. The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next (Mariner, Boston, 2007).
64. Rotmans J. and van Asselt M. B. A. Uncertainty management in integrated assessment modeling: Towards a pluralistic approach. Environmental Monitoring and Assessment 69(2), 101-130 (2001).
65. Dubois D. and Prade H. Possibilistic logic: a retrospective and prospective view. Fuzzy Sets and Systems 144(1), 3-23 (2004).
66. Lucarini V. Towards a definition of climate science. Int. J. Environment and Pollution 18(5), 413-422 (2002).
67. Vespignani A. Predicting the behavior of techno-social systems. Science 325, 425-428 (2009).
68. Helbing D. The FuturICT knowledge accelerator: Unleashing the power of information for a sustainable future, Project Proposal (2010), see <http://arxiv.org/abs/1004.4969> and <http://www.futurict.eu>

Надійшла до редакції 06.09.14

D. Helbing, Professor

Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETH Zurich), Zurich, Switzerland

PLURALISTIC MODELING OF COMPLEX SYSTEMS

The modeling of complex systems such as ecological or socio-economic systems can be very challenging. Although various modeling approaches exist, they are generally not compatible and mutually consistent, and empirical data often do not allow one to decide what model is the right one, the best one, or most appropriate one. Moreover, as the recent financial and economic crisis shows, relying on a single, idealized model can be very costly. This contribution tries to shed new light on problems that arise when complex systems are modeled. While the arguments can be transferred to many different systems, the related scientific challenges are illustrated for social, economic, and traffic systems. The contribution discusses issues that are sometimes overlooked and tries to overcome some frequent misunderstandings and controversies of the past. At the same time, it is highlighted how some long-standing scientific puzzles may be solved by considering non-linear models of heterogeneous agents with spatio-temporal interactions. As a result of the analysis, it is concluded that a paradigm shift towards a pluralistic or possibilistic modeling approach, which integrates multiple world views, is overdue. In this connection, it is argued that it can be useful to combine many different approaches to obtain a good picture of reality, even though they may be inconsistent. Finally, it is identified what would be profitable areas of collaboration between the socio-economic, natural, and engineering sciences.

Key words: modeling, complex systems, nonlinear models.

Д. Гелбинг, проф.

Швейцарский федеральный институт технологий, Цюрих, Швейцария

ПЛЮРАЛИСТИЧЕСКИЙ ПОХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Моделирование сложных систем, таких как социологические или социально-экономические - может быть очень трудной задачей. Хотя существуют различные подходы к моделированию, они, как правило, не совместимы и не согласованы между собой, а эмпирические данные часто не позволяют определить, какая модель будет правильной, лучшей или наиболее подходящей в конкретном случае. Более того, недавний финансовый и экономический кризис показали, что полагаться только на единую идеализованную модель может быть очень дорогим решением.

Данная статья пытается «пролить новый свет» на проблемы, которые возникают при моделировании сложных систем. В то время как некоторые решения могут быть использованы в различных системах, соответствующие научные проблемы проиллюстрированы для социальных, экономических и транспортных систем. В статье сделан обзор попыток преодолеть некоторые недоразумения и споры прошлого. В то же время, обзор освещает давние научные вопросы, которые могут быть решены с учетом нелинейных моделей многофакторных агентов с пространственно-временным взаимодействием. В результате анализа можно сделать вывод, что изменение парадигмы на плюралистическую или подход вероятностного моделирования, который объединяет несколько мировоззрений, является несколько запоздалыми. В связи с этим обосновывается, что будет полезным сочетание различных подходов, которые обеспечивают хорошее отражение реальности, хотя они и могут быть несовместимы. Наконец, определяется, что может быть зоной для конструктивного сотрудничества между социально-экономическими, научными и техническими науками.

Ключевые слова: моделирование, сложные системы, нелинейные модели.