

ДЕЯКІ АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ФОРМАЛІЗАЦІЇ КОГНІТИВНОЇ НАУКИ

Прокопчук Ю.О.

Інститут технічної механіки НАН України, д,т,н, доцент, Україна

Анотація. Відомі закони природи у фізичних науках добре виражені мовою математики. Останнім часом значно пожвавилася дискусія з приводу меж застосування математики для моделювання біологічних систем. Біологічні системи принципово опираються математичній формалізації. Автори роботи *"The Reasonable Ineffectiveness of Mathematics in the Biological Sciences"* (Seymour Garte, Perry Marshall, Stuart Kauffman) вважають, що творчість природи виходить за рамки математичного формалізму і необхідний пошук нових нередуктивних формалізмів. Мова йде навіть про необхідність «Третього великого парадигмального переходу» після Ньютона і квантової механіки. Для рішення проблеми автори пропонують концепцію біоматематики. Ситуація з формалізацією значно ускладнюється для біологічних когнітивних систем високого рівня. Автор дослідження за допомогою власних моделей демонструє границі математичного моделювання агентивної поведінки. Обговорюються деякі базові елементи інтелектуальної математики.

Ключові слова: Біоматематика, Математика автономії, Інтелектуальна математика, Простір можливостей, Живі «розумні» структури, Парадигма граничних узагальнень

Вступ. Відомі закони природи у фізичних науках добре виражені мовою математики, що змусило Нобелівського лауреата Юджина Вігнера в 1960 році задуматися про «необґрунтовану ефективність» математичних концепцій пояснення фізичних явищ [1]. Останнім часом значно пожвавилася дискусія з приводу меж застосування математики для моделювання біологічних систем. Біологічні системи принципово опираються математичній формалізації. Автори роботи [2] вважають, що загальна неефективність математики в біології ("The Reasonable Ineffectiveness") - це запрошення розширити межі науки і побачити, що творчість природи виходить за рамки математичного формалізму. На їхню думку, необхідний пошук нових нередуктивних формалізмів для опису біологічної реальності з використанням або без використання строго математичних підходів. Ця ситуація нагадує фундаментальну кризу математики на початку XX століття [3].

Теореми про неповноту Курта Геделя виявили фундаментальні обмеження у формальних математичних системах, продемонструвавши, що деякі істини залишаються недоведеними (Self-Reference, Incompleteness) [3]. Неповнота - це не помилка, а властивість формальної логіки - неминучий результат дозволу самореферентності всередині структурованої системи. Багато проблем теорії інформації ґрунтуються на рекурсивних, самореферентних структурах, наприклад: межі стиснення (Chaitin's incompleteness in algorithmic information theory); логічні парадокси у самореферентних обчисленнях (Turing's halting problem).

Першою науковою парадигмою була ньютонівська парадигма – механістичний «Всесвіт, як годинниковий механізм». Друга прийшла з квантовою механікою та її імовірнісною природою. Суть третьої парадигмальної революції (Science's Third Great Transition: biomathematics concept [4]) у визнанні принципової неформалізованості біології в математичних термінах [2]: організми безупинно вибирають з безлічі можливостей, виявляючи агентність – творчу непередбачуваність життя – та когнітивні здібності. Біологія не працює у рівновазі, як фізика; вона постійно створює, адаптує та винаходить нові можливості, які не могли б закодувати жодне рівняння. Біоматематика оперує не рівностями, а можливостями, не передбаченнями, а потенціалами.

Когнітивні системи є біологічними системами (поки що). Автори дослідження [5] стверджують, що вся біологія пов'язана з когнітивною обробкою інформації. Ми значно звузимо «діапазон» - будемо мати на увазі лише людиноподібних агентів та і то переважно феноменологічний рівень розгляду (приклад [6]). Однак це ніяк не обмежує застосування світогляду [5].

Багато когнітивних теорій надають обчислювальні описи (приклад – «Обчислювальний Розум»), але прогалини та розриви в нашому розумінні передбачають необхідність постійного обговорення між дослідниками з різних дисциплін. Біоматематика і теорія обчислюваності включають пошук природних прикладів необчислюваних об'єктів, пов'язаних з пізнанням [3].

Джон фон Нейман, який стояв біля основ кібернетики та обчислювальних машин, з 60-х років минулого століття вже передбачав, що «не виключена можливість того, що для розуміння центральної нервової системи логіка змушена буде зазнати метаморфози і перетворитися на неврологію набагато більшою мірою, чим неврологія - у розділ логіки» (Нейман Дж. Теорія самовідтворювальних автоматів, 1971). У 1957 р. Дж. фон Нейман висунув гіпотезу про існування Первинної мови людського мозку (The Primary Language). Він припустив, що зовнішня мова (включаючи безліч природних і штучних мов), яку ми використовуємо у спілкуванні один з одним, може сильно відрізнитися від внутрішньої мови, яка використовується для обчислень людським мозком. Він стверджував, що ми досі не знаємо про природу Первинної мови мисленних обчислень (“What is the structure of thought?” is as central a question as any in cognitive science). Автори [2] вважають, що біоматематика являє собою ту саму первинну, базову, «первісну мову» (біологія не просто підпорядковується математиці; вона створює математику).

Якщо ми не можемо звести біологію до рівнянь, як досягнемо прогресу? Третя парадигма пропонує відповідь [4] і вона не в більшій кількості даних, а в постановці складніших питань та виборі більш елегантних моделей.

Основний матеріал. Прикладом пошуку подібного за цілями концептуально-метафоричного начерку формалізму може бути Парадигма граничних узагальнень (ПГУ) [7]. Всі сутності ПГУ – це «живі розумні структури» (Mathematics Becomes a Living Structure). Загалом, будь який образ або розвинена теорія – це відкрита сукупність начерків – мережа начерків (точних, грубих, емпіричних спостережень, інтерпретацій тощо). Мережі начерків об'єднуються в мережу мереж начерків (Unity through Diversity; A universal knowledge model). ПГУ поєднує в ціле багатоедність, нескінченність, конкурентність, комплементарність (мультифізичність), багатомасштабність, динамічність, самоорганізацію, емоційність, цілеспрямованість. Одні з важливих знахідок – це розширена компліментарність та узагальнена заплутаність мереж начерків, яка забезпечує сильну зв'язність або цілісність ментальної сфери (на базі суб'єктивного досвіду; Meaning as Wholeness

Experienced; Wholeness and the implicate order; Cognitive Consistency). ПГУ пропонує можливі схеми вибору «більш елегантних моделей», зокрема, «критичних начерків».

Відомий вислів: «Все геніальне – просто. Але зробити просто – дуже складно» Найпотужніші наукові інструменти – це не великі набори даних, а геніальні евристики, які вимагають, щоб ми мудро вибирали дуже маленькі набори даних та добре поставлені питання для вирішення конкретних проблем [2], [4]. Саме так виникають евристики у задачах розрізнення ПГУ (завдяки інкубації) [7].

За словами Ейнштейна: «Теорія має бути простою настільки, наскільки це можливо, але не простіше». Критичність виступає як один із фундаментальних природних механізмів універсального творчого процесу – прагнення до краси, досконалості (ПГУ концепти «критичних начерків», «стріл пізнання», «цілісності»). Критерій краси: Модель краще, якщо вона може пояснити більше з меншими витратами (Chaitin's 'compression is comprehension'). В ПГУ за це «відповідають» критичні начерки в мережах начерків образів (Optimal complexity: the "edge of chaos").

Еволюція сильно обмежує область потенційних принципів проектування. Під «тиском складності» передовий ШІ дозволяє подолати фундаментальні обмеження "логіки живих систем" (Space of Minds; "Going Beyond").

Ось лише деякі проблеми необчислюваності / невиводимості / невизначеності в когнітивних системах (з точки зору формалізму ПГУ): в загальному випадку, невизначені і необчислювані начерки чогось; неможливо побудувати (обчислити) повну мережу нарисів образу; необчислювані «когнітивні числа» і багатомасштабні фазові простори когнітивних динамічних систем, що розширюються; у загальному випадку, неможливо обчислити критичні нариси (вимагає визначення алгоритмічної складності); необчислювані та невизначені повні простори можливостей у патернах/мислedah, зокрема, у завданнях розрізнення; невчислимі емоції в подіях і, отже, «духовних мережах начерків». Необчислима задача побудови повної мережі мереж начерків (ментальної сфери, суб'єктивної дійсності).

Необчислима задача виміру/декогеренції квантово-подібних станів мережі мереж начерків (проблема усвідомлення). Однак саме ці проблеми дозволяють сформулювати дуже глибокі інтуїції стосовно Розуму, свідомості, обдарованості тощо.

Відкритий простір можливостей Pos-Space у кожного патерна та кожній задачі розрізнення та оператор Creative Max. "Можливі варіанти використання X для досягнення Y" - це "можливості". Кількість варіантів використання X невизначена (або невідома), різні варіанти використання не впорядковані, не перераховуються та не виводяться один з одного. Агент / організм діє у своєму світі і знаходить можливості використання X для досягнення Y. Можливості, що надаються можливостями, потім актуалізуються як нові адаптації. Ключову роль в розширенні просторів можливостей грає суб'єктивний досвід агента/соціуму [7]. Проблема полягає в тому, що повністю формалізувати дію агентивного оператора Creative Max неможливо (Limits of Mathematical Modeling of Affordances).

На думку фон Фёрстера, наша автономія передбачає, що справжня свобода приймати рішення проявляється тоді, коли питання є «не вирішуваним». Імператив фон Фёрстера: «Дій так, щоб множити кількість можливостей для вибору!» Агентивна поведінка включає безперервний творчий акт створення потенціалів / можливостей у рамках будь-якого патерну f (Ineffable Creativity of Life: Spontaneous innovation; the dynamics of the system “brain-body-landscape of affordances”):

$$\forall t, f \mid \text{Pos-Space}|_t \rightarrow \text{Creative Max.}$$

Під час реалізації патернів і розв'язання задач розрізнення агенти проявляють активність, роблячи вибір із невизначеного набору можливостей. Цей вибір не може бути зведений до алгоритмів. Когнітивна система, що еволюціонує, витягує нові прояви з невизначеності. Взаємодіючі моделі готовності до дії в різних просторово-часових масштабах сприяють вибірковій відкритості організму відповідним можливостям.

Для всіх компонентів досвіду та для ‘Space of Thought Flows’ (досвід рішення задач розрізнення), зокрема, ключовим з точки зору розвитку інтелекту, інтуїції є механізм виявлення шаблонів або дистилляції (General

Theory of Intelligence: The principle of exaptation). Цей процес відбувається шарами зростаючої складності шляхом виділення шаблонів разом з механізмами виконання (Pattern Discovery or 'Distillation' Mechanism: distilling patterns-of-patterns and then patterns of those patterns; Layering of Pattern Matching; radical expansion of the transfer of the scheme to new situations). Механізм вилучення та нашарування шаблонів є одним із стовпів розвитку розуму.

Схема розрізнення «континуум задач» з когнітивною пенетрацією [7] реалізує динамічний конкурентний механізм миттєвого ухвалення рішень, завдання якого - забезпечити виживання в агресивному та невизначеному середовищі (Dynamic Competition Mechanism of Instant Decision; Instant Decision Based on Speed Competition). Саме використання втілених евристик «тонкого зрізу» (автоматизмів-радикалів) суттєво впливає на швидкість ухвалення рішення та економність самого процесу прийняття рішення. Такі рішення актуальні, наприклад, у медицині та на транспорті з підтримкою ШІ.

Висновки. Фрактальна, багатомасштабна природа фізіологічних сигналів робить традиційну оптимізацію математично безглуздою - немає чітко визначених мінімумів чи максимумів у фрактальних ландшафтах (приклад – рішення задач розрізнення; мережі потоків думок) [7]. Формалізм потрібен, щоб виявити загальні принципи розвитку розумової діяльності, які потрібні для освіти та формування успішних команд. ПГУ може слугувати прикладом системно-цілісного формалізму.

В прикладних застосуваннях ПГУ може служити основою деяких начерків математики автономії [8], інтелектуальної математики [9], або математики распливчатості.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Wigner, E. (1960). The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. Commun. Pure Appl. Math. 13, 1–14.
2. Garte, S., Marshall, P., Kauffman, S. (2025). The Reasonable Ineffectiveness of Mathematics in the Biological Sciences. Entropy. 27. 280. 10.3390/e27030280.
3. Robic, B. (2020). The Foundations of Computability Theory, Second Edition. Berlin: Springer.

4. Kauffman, S.A., Roli, A. (2023). A third transition in science? Interface Focus, 13, 20220063.
5. Miller WB, Jr., Baluska F, Reber AS. (2023). A revised central dogma for the 21st century: all biology is cognitive information processing. Prog Biophys Mol Biol.182:34-48
6. Prentner, R. (2025). Mathematized phenomenology and the science of consciousness. Phenom Cogn Sci <https://doi.org/10.1007/s11097-025-10060-z>
7. Prokopchuk Y. (2022). Intuition: The Experience of Formal Research. Dnepr, Ukraine : PSACEA Press. 724 p. (in RU)
8. Ivancevic V.G., Reid D.J., Pilling M.J. (2017). Mathematics of autonomy: Mathematical methods for cyber-physical-cognitive systems. World Scientific Publishing.
9. Prokopchuk Y., Nosov P., Ben A. (2024). Problems of Meaning, Understanding, Computability and Adaptability in Artificial Cognitive Systems. Proceedings of the 16th Conference «Modern Information and Innovative Technologies in Transport» (May 29-30, 2024, Odesa). Odesa, Ukraine: Kherson State Maritime Academy. P. 19 – 25.

SOME TOPICAL ISSUES OF OF FORMALIZATION OF COGNITIVE SCIENCE

Prokopchuk Yurii

Abstract. *The known laws of nature in the physical sciences are well expressed in the language of mathematics. Recently, the discussion on the limits of application of mathematics for modeling biological systems has been considerably revived. Biological systems principally resist mathematical formalization. The authors of the work "The Reasonable Ineffectiveness of Mathematics in the Biological Sciences" (Seymour Garte, Perry Marshall, Stuart Kauffman) believe that the creativity of nature goes beyond the framework of mathematical formalism and that a search for new non-reductive formalisms is necessary. Scientists even talk about the need for a "third great paradigmatic transition" after Newton and quantum mechanics. To solve the problem, the authors propose the concept of biomathematics. The problem of formalization is significantly more complicated for high-level biological cognitive systems. The author of the study, using his own models, demonstrates the limits of agentive behavior modeling. Some basic elements of intelligent mathematics are discussed.*

Keywords: *Biomathematics, Mathematics of Autonomy, Intelligent Mathematics, Possibility Spaces, Living Smart/Cog-Structure, Paradigm of Limiting Generalizations*