

От квантовой пены к разуму: математические и физические принципы эволюции сложных систем

В.Ф. Веселов

Аннотация

В работе предлагается междисциплинарная модель, связывающая эволюцию сложности на различных уровнях организации материи — от квантово-космологического до когнитивного. Используя аппарат теории графов (зигзаг-произведение, расширяющие графы), алгоритмической теории информации (теорема Колмогорова) и теоретической биологии, мы показываем, что эмерджентные свойства биологических систем, включая мозг, могут быть описаны как проявление универсальных принципов оптимизации связности и вычислительной эффективности. Модель конкретизирует механизмы перехода между уровнями сложности и критически оценивает пределы своей применимости. Особое внимание уделяется разграничению строгих математических аналогий, правдоподобных биологических гипотез и философских следствий предлагаемого подхода.

Ключевые слова

эмерджентность, зигзаг-произведение, расширяющие графы, алгоритмическая сложность, эволюция сложности, нейронные сети, квантовая космология, междисциплинарная модель

1 Введение: проблема наследования сложных признаков и поиск универсальных принципов

Парадокс низкой наследуемости высокоорганизованных признаков (таких как общий интеллект или креативность), установленный поведенческой генетикой [1], указывает на ограниченность редукционистской трактовки ДНК как линейного чертежа организма. Мы предполагаем, что решение этого парадокса лежит в рассмотрении развития и эволюции через призму *теории сложных систем* и *вычислительной теории*, где геном выступает в роли компактной программы, развертывающейся в процессе динамического взаимодействия со средой.

Настоящая работа представляет собой попытку построения единого концептуального каркаса, связывающего принципы организации на различных уровнях сложности. Важно подчеркнуть, что предлагаемый подход содержит три взаимосвязанных, но методологически различных аспекта: (1) *строгие математические аналогии*, основанные на точных соответствиях между формальными системами; (2) *правдоподобные биологические гипотезы*, допускающие экспериментальную проверку; (3) *философские спекуляции* о преемственности принципов организации. В последующих разделах мы будем явно указывать принадлежность утверждений к одной из этих категорий.

2 Математические основания: теория графов и информации как язык описания сложности

2.1 Зигзаг-произведение и модульная устойчивость: математическая аналогия

Зигзаг-произведение (Zigzag product, $G \odot H$) — это строго определенная комбинаторная операция, конструирующая большой граф $G \odot H$ из малого графа-«затравки» H и большого графа G , выступающего в роли «скелета» [2]. Ключевое свойство: результирующий граф наследует степень H и спектральное затухание (а значит, и свойства связности), пропорциональное произведению свойств исходных графов.

Биологическая интерпретация (гипотеза): Процесс развития (эпигенез) можно *моделировать* как итеративное применение операций, подобных зигзаг-произведению, где локальные клеточные взаимодействия (малый граф H) развертываются согласно глобальным, генетически заданным паттернам (G), формируя устойчивый и связный организм. *Важно отметить*, что прямое соответствие между биологическим процессом и формальной операцией зигзаг-произведения не утверждается; речь идет о качественной аналогии в аспекте наследования свойств связности и масштабируемости.

2.2 Расширяющие графы и их геометрическая упаковка: гипотеза для нейронных сетей

Расширяющие графы (expander graphs) — это разреженные, но высокосвязные графы, обладающие свойством быстрого перемешивания и устойчивости к удалению вершин [3]. Существует глубокая связь между алгебраическими свойствами экспандеров и их оптимальным вложением в геометрические пространства, включая **многомерные торы** T^n , которые минимизируют среднее расстояние между вершинами при заданной связности [4].

Нейробиологическая гипотеза (уточненная): Структурная и функциональная связность коры головного мозга демонстрирует свойства, близкие к расширяющим графам: высокий кластеринг, короткие средние пути (small-world property) и модульность [5]. Мы выдвигаем проверяемую гипотезу, что пространственное расположение корковых колонн и пучков аксонов *эффективно аппроксимирует вложение такого графа в топологию, гомеоморфную искривленному 3-мерному тору* (с учетом замкнутости крупных трактов, таких как поясная извилина). Это вложение не является точным, но представляет собой *эволюционный компромисс*, минимизирующий метаболические затраты на поддержание связей (принцип «экономии проводов» [6]) при максимизации вычислительной параллельности и отказоустойчивости. Данные диффузионной тензорной МРТ, показывающие кольцообразные структуры связности [7], косвенно поддерживают эту модель, хотя для ее строгой проверки потребуется полная реконструкция коннектома высокого разрешения.

2.3 Теорема Колмогорова и ДНК как сжатая вычислительная программа: строгое соответствие

Теорема Колмогорова об инвариантности утверждает, что алгоритмическая (колмогоровская) сложность объекта — длина кратчайшей программы, порождающей его на универсальной машине Тьюринга, — инвариантна с точностью до аддитивной константы [8].

Применение к биологии (интерпретация): Полное микроскопическое описание зрелого организма (например, коннектома) обладает астрономической колмогоровской

сложностью. Геном же содержит на порядки меньше информации. Следовательно, ДНК *не описывает, а определяет* (специфицирует) процесс, результатом которого является организм. Иными словами, ДНК содержит **короткую программу** P , которая в контексте клеточного аппарата и внешней среды E порождает сложный фенотип: $P(E) \rightarrow \text{Фенотип}$. Интеллект как высокоуровневое свойство есть *эмерджентный результат выполнения этой программы* в богатой стимулами среде, что объясняет его низкую прямую наследуемость и высокую пластичность [9]. В отличие от предыдущих аналогий, это утверждение основано на строгом математическом результате, примененном к биологическому объекту.

3 Биологический переход: от химии к сложности через рекомбинацию

3.1 От гиперциклов к половому размножению: усиление связности

Переход к жизни часто моделируется через **гиперциклы Эйгена** и **автокаталитические сети** — множества молекул, способных к взаимной репликации [10]. Эти системы демонстрируют примитивную форму «графовой» связности. Мы рассматриваем возникновение **полового размножения** как качественный скачок, который можно *интерпретировать* как переход от фиксированного графа к применению *операции, аналогичной зигзаг-произведению к геномам*. Слияние гамет (рекомбинация) создает не сумму двух наборов генов, а **новый геномный граф** с переставленными и смешанными «ребрами»-аллельными взаимодействиями. Этот процесс резко увеличивает *внутреннюю вариативность и связность генофонда популяции*, придавая ей свойства, аналогичные свойствам расширяющего графа: устойчивость к генетическому дрейфу и эффективный поиск в адаптивном ландшафте. Пример архаичных форм кооперации у **слизевиков (Dictyostelium)** [11] иллюстрирует промежуточный этап, где индивидуальность приносится в жертву формированию временной многоклеточной структуры — прототипу более сложных интегративных процессов.

3.2 Эволюция нервной системы: оптимизация графа управления

Возникновение специализированных клеток (нейронов) и их объединение в сети стало решением задачи быстрой координации в многоклеточном организме. Эволюция, по-видимому, оптимизировала нейронные ансамбли по критериям: 1) скорость распространения сигнала, 2) энергетическая эффективность, 3) надежность, 4) вычислительная мощность. Полученные в результате коннектомы (как у *C. elegans* [12]) демонстрируют оптимальные для этих требований топологические свойства (small-world, модульность), что согласуется с их интерпретацией как *биологически реализованных расширяющих графов*.

4 Вычислительная мощность мозга: между эвристикой и строгой сложностью

4.1 Мозг как аналоговый вероятностный вычислитель

Мозг принципиально отличается от цифровой машины Тьюринга. Это **массово-параллельная, стохастическая, аналоговая система**, чья динамика определяется не дискретными состояниями, а паттернами возбуждения в популяциях нейронов. Показано, что такие си-

стемы, чья архитектура близка к расширяющим графам, исключительно эффективны в решении определенных классов **вычислительно сложных задач оптимизации и принятия решений в условиях неопределенности** [13].

4.2 Уточнение тезиса о NP-сложности

Утверждение о том, что мозг «решает NP-трудные задачи за полиномиальное время», требует серьезного уточнения. **Строго говоря**, NP-трудность определяется для точных решений в худшем случае на формальной модели вычислений. Мозг:

1. Ищет не точные, а **практически приемлемые (эвристические) решения**.
2. Работает не с худшим, а с типичным случаем, структурированным эволюционным опытом.
3. Использует **физическую динамику** (конкуренцию паттернов, стохастический резонанс) для быстрого исследования пространства возможностей, что можно рассматривать как форму **квантового или термодинамического отжига** [14].

Таким образом, мозг не «нарушает» законы теории сложности, а *обходит их*, используя специализированную физическую архитектуру для эффективного решения конкретных экологически релевантных задач (распознавание образов, принятие социальных решений, генерация осмысленных предложений), которые формально являются NP-трудными.

4.3 Ограничения модели: патологии как сбои в графе

Сила расширяющей связности имеет обратную сторону. Такие состояния, как **эпилептогенез**, можно интерпретировать как переход нейронного графа в режим **избыточной и синхронной связности**, когда свойство быстрого перемешивания экспандера приводит к патологическому глобальному возбуждению [15]. Это указывает на то, что оптимальная вычислительная архитектура существует в узкой области баланса между связностью и подавлением и является конкретным предсказанием модели, доступным для экспериментальной проверки.

5 Космологический исток и принцип эмерджентной сложности: уточненная цепь

Чтобы избежать излишнего «физикализма», мы подчеркиваем не прямую причинность, а преобладание **принципов организации** на разных уровнях. Данная цепь носит в значительной степени *философско-эвристический* характер и призвана задать общий контекст, а не указать конкретные механизмы причинности:

1. **Квантово-гравитационный уровень (физический принцип):** Квантовая пена как проявление фундаментальной нелокальности и неопределенности. **Инфляция** как механизм экспоненциального «расширения» (увеличения сложности) начального состояния. На этом уровне закладываются *принципиальная возможность нелокальных корреляций и существование множества альтернативных состояний*.
2. **Физико-химический уровень (комбинаторный принцип):** Формирование устойчивых структур (атомы, молекулы) через комбинаторные принципы квантовой механики и химической связности. **Автокаталитические сети и гиперциклы** как

прототипы самовоспроизводящихся систем с внутренней связностью — химические предшественники графовых моделей жизни [10]. Здесь проявляется *принцип самосборки сложных структур из простых компонентов по заданным правилам*.

3. **Биологический уровень (эволюционно-оптимизационный принцип):** Возникновение репликации, клетки, а затем — **полового размножения как биологического аналога операций комбинирования графов**, резко ускоряющего эволюционный поиск. Дальнейшая **оптимизация внутренних сетей** (метаболических, регуляторных, нейронных) по критериям эффективности и устойчивости. Ключевой принцип — *оптимизация связности для повышения устойчивости и адаптивности*.
4. **Когнитивный уровень (вычислительно-информационный принцип):** Возникновение мозга как **высокосвязного, физически воплощенного вычислительного устройства**, архитектура которого позволяет эффективно обрабатывать информацию и порождать субъективный опыт. Доминирующий принцип — *эффективная обработка информации и генерация адаптивных моделей среды*.

На каждом уровне новые свойства **эмерджируют** при достижении критической сложности и связности компонентов, но их фундамент составляют комбинаторные и оптимизационные принципы, прослеживаемые от самых основ физики.

6 Заключение и перспективы

Представленная модель предлагает единый концептуальный каркас для понимания эволюции сложности. Её ключевые предсказания:

1. Биологические системы на разных уровнях (геномные сети, нейронные ансамбли) должны демонстрировать измеримые свойства, близкие к расширяющим графам.
2. Эффективность когнитивных процессов должна коррелировать с метриками связности и оптимальности упаковки соответствующих нейронных структур.
3. Патологические состояния должны соответствовать отклонениям от оптимума в этих топологических характеристиках.

Основные направления дальнейших исследований:

- **Количественная проверка гипотез:** Анализ коннектомов различных видов на соответствие математическим моделям экспандеров, вложенных в неевклидовы пространства. Разработка новых методов топологического анализа данных нейровизуализации для проверки гипотезы о тороидальной упаковке.
- **Вычислительное моделирование и симуляция:**
 - а) Создание моделей цифровых организмов с «геномом», представленным в виде графа, и изучение влияния операций, аналогичных зигзаг-произведению, на скорость и устойчивость эволюции в симуляциях.
 - б) Исследование того, как архитектура нейронных сетей, оптимизированная под критерии связности и экономии проводов, влияет на их способность решать задачи обучения с подкреплением и обобщения.
- **Теоретическое развитие:**

- а) Уточнение формальных условий, при которых биологические процессы могут быть строго описаны в терминах операций над графами.
 - б) Исследование связи между алгебраической топологией нейронных ансамблей и их вычислительными функциями.
- **Философское осмысление:** Исследование онтологического статуса эмерджентных свойств в рамках предложенной вычислительно-информационной парадигмы. Обсуждение антропологического аспекта: если разум является закономерным следствием универсальных принципов оптимизации, в какой степени его возникновение можно считать «неизбежным» при наличии подходящих условий во Вселенной?

Таким образом, интеллект и сознание предстают не как случайные приспособления, а как глубоко закономерные, хотя и чрезвычайно сложные, проявления универсальных принципов организации, пронизывающих Вселенную от квантовой пены до мыслящей материи. Предложенная модель не претендует на окончательность, но задает программу междисциплинарных исследований, направленных на поиск единого языка для описания эволюции сложности.

Список литературы

- [1] Plomin, R. (2018). *Blueprint: How DNA makes us who we are*. MIT Press.
- [2] Reingold, O., Vadhan, S., & Wigderson, A. (2002). Entropy waves, the zig-zag graph product, and new constant-degree expanders. *Annals of Mathematics*, 155(1), 157-187.
- [3] Hoory, S., Linial, N., & Wigderson, A. (2006). Expander graphs and their applications. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 43(4), 439-561.
- [4] Lubotzky, A. (2012). Expander graphs in pure and applied mathematics. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 49(1), 113-162.
- [5] Sporns, O. (2013). Network attributes for segregation and integration in the human brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 23(2), 162-171.
- [6] Cherniak, C. (1994). Component placement optimization in the brain. *The Journal of Neuroscience*, 14(4), 2418-2427.
- [7] Mišić, B., et al. (2018). Network-based asymmetry of the human auditory system. *Cerebral Cortex*, 28(7), 2655-2664.
- [8] Kolmogorov, A. N. (1965). Three approaches to the quantitative definition of information. *Problems of Information Transmission*, 1(1), 1-7.
- [9] Gazzaniga, M. S. (2018). *The consciousness instinct: Unraveling the mystery of how the brain makes the mind*. Farrar, Straus and Giroux.
- [10] Kauffman, S. A. (1993). *The origins of order: Self-organization and selection in evolution*. Oxford University Press.
- [11] Bonner, J. T. (2009). *The social amoebae: the biology of cellular slime molds*. Princeton University Press.

- [12] Varshney, L. R., Chen, B. L., Paniagua, E., Hall, D. H., & Chklovskii, D. B. (2011). Structural properties of the *Caenorhabditis elegans* neuronal network. *PLoS Computational Biology*, 7(2), e1001066.
- [13] Hertz, J., Krogh, A., & Palmer, R. G. (1991). *Introduction to the theory of neural computation*. Addison-Wesley.
- [14] Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(8), 2554-2558.
- [15] Netoff, T. I., et al. (2004). Epilepsy in small-world networks. *Journal of Neuroscience*, 24(37), 8075-8083.