

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 51-7

От клеток к экосистемам: математика адаптации

Р.Д. Набиуллина

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

В работе систематизированы существующие подходы к математическому моделированию биологических процессов; показаны ограничения классических детерминистских моделей Лотки–Вольтерра. Поставлен вопрос о применимости принципа свободной энергии Фристона к эволюции за пределами нейробиологии; выдвинута гипотеза, что эволюция направлена на минимизацию энергетических затрат и неопределенности (минимизацию свободной энергии). Проведён обзор литературы и концептуальное сопоставление моделей; предложена схема интеграции ПСЭ со стохастическими методами. Обнаружено, что ПСЭ и вероятностные подходы лучше описывают адаптивное поведение на разных уровнях биологической организации. Сделан вывод о перспективности дальнейшей разработки вычислительных моделей и эмпирической валидации.

Ключевые слова: биоматематика, принцип свободной энергии, эволюция, адаптация, стохастические процессы, дифференциальные уравнения, теория графов, смежные возможности, аффордансы, Дарвин

Для цитирования. Набиуллина Р.Д. От клеток к экосистемам: математика адаптации. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(5):118–121.

From Cells to Ecosystems: Mathematics of Adaptation

Rozaliya D. Nabiullina

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The paper systematises existing approaches to mathematical modeling the biological processes and demonstrates the limitations of classical deterministic Lotka-Volterra models. The applicability of Friston's free energy principle (FEP) to evolution beyond the neurobiology has been investigated, and a hypothesis regarding the evolution being aimed at minimizing energy expenditure and uncertainty (minimizing free energy) has been put forward. A literature review and conceptual comparison of the models have been carried out, and a framework for FEP integration with the stochastic methods has been proposed. It has been found that FEP and probabilistic approaches better describe adaptive behaviour at different levels of biological system. The conclusion about future prospects for further development of computational models and their empirical validation has been made.

Keywords: biomathematics, free energy principle, evolution, adaptation, stochastic processes, differential equations, graph theory, adjacent possibilities, affordances, Darwin

For Citation. Nabiullina RD. From Cells to Ecosystems: Mathematics of Adaptation. *Young Researcher of Don*. 2025;10(5):118–121.

Введение. Биоматематика — область математики, объясняющая биологические процессы с помощью математического аппарата. Часто только классической математики и статистики для понимания биологических явлений недостаточно ввиду высокой энтропии живых структур и ограниченной применимости математических формул. В таких условиях помимо учета очевидных характеристик популяций и организмов необходимо расширить окно возможностей для описания развития организмов, видов и всей биосфера.

Формализация биологии математическими терминами затруднительна по сравнению с физикой, поскольку живые системы — это системы с множественными исключениями. По этой же причине методы искусственного интеллекта пришли в биологию позже, чем в физику. Сам принцип свободной энергии (ПСЭ) [1, 2] описывает взаимодействия в мозге, нейробиологии и когнитивистике. Цель данного исследования — систематизировать существующие подходы к математическому моделированию биологических процессов и обосновать применимость принципа свободной энергии Фристона для описания эволюционных механизмов за пределами нейробиологии.

Задачи исследования: проанализировать ограничения классических моделей типа Лотки-Вольтерра [3, 4], рассмотреть возможности стохастического моделирования биологических систем, оценить перспективы интеграции ПСЭ в эволюционную биологию.

Основная часть. Начиная от бактерий и клеток и заканчивая высокоорганизованными многоклеточными организмами, эволюцию следует рассматривать не только как «выживание сильнейшего» или «наиболее адаптированного» в классическом дарвиновском понимании [5], но и как процесс, в котором важна энергоэффективность. Современная интерпретация дарвиновского отбора должна учитывать не только конкуренцию за ресурсы, но и способность организмов выявлять и использовать смежные возможности среды обитания [6].

Изначально необходимо признать агентность любого живого организма: если поведение организмов требуется математически формализовать, следует допустить, что оно подчиняется определённым закономерностям, которые могут быть описаны математически, даже при наличии элементов «свободы воли».

Развитие живого стоит рассматривать не только как стремление к воспроизведству себе подобных, но и как формирование «ленивого» поведения, направленного на минимизацию неэффективных энергетических затрат на жизнедеятельность. При этом организмы активно исследуют аффордансы — возможности для действий, предоставляемые окружающей средой [7], минимизируя энергетические затраты на поиск оптимальных стратегий выживания. Такой организм действует в рамках теории игр, предугадывая генетической или поведенческой предрасположенностью наиболее вероятные будущие события — изменение количества пищи или условий среды — чтобы выжить и передать свои черты.

Все живые системы самоадаптируются по принципу свободной энергии. Однако первоначальные теории взаимодействия живых организмов, использованные в начале XX века, были основаны на уравнениях Лотки-Вольтерра. Они учитывали главным образом взаимосвязь «хищник — жертва», где снижение живой массы на одном трофическом уровне ведёт к уменьшению популяций на вышележащих. Также предполагалось, что живые системы стремятся к равновесию: при большом увеличении численности кроликов вскоре растёт популяция лисиц, контролирующих численность кроликов, и при недостатке пищи избыточные лисицы вымирают.

Согласно ПСЭ, живые организмы стремятся уменьшить разрыв между ожидаемым — заданным генами и поведением — и окружающей реальностью. В примере с кроликами: при увеличении их численности особи, чьи врождённые модели предсказывают приход хищников, покинут ареал с высокой опасностью и окажутся в более выгодной позиции. Лисы, чьи внутренние модели (поведение и гены) лучше соответствуют условиям среды или предугадывают поведение кроликов, повышают свою численность или адаптируют охотничьи стратегии для минимизации свободной энергии — то есть снижения неопределенности в добывче пищи, обеспечивая более эффективное выживание в изменяющихся условиях.

Уравнения Лотки-Вольтерра воспринимают эволюционно-экологические процессы более плавными, чем они есть на самом деле, и не в состоянии полностью моделировать сложные биологические взаимодействия.

Несмотря на широкое применение уравнений Лотки-Вольтерра в экологическом моделировании [3, 4], ряд исследователей указывает на их существенные ограничения. Мэй [8] отмечает, что детерминистский характер этих уравнений не учитывает стохастическую природу популяционных процессов. Холлинг [9] критикует предположение о линейной зависимости между численностью хищника и жертвы, показывая необходимость введения функциональных откликов. В то же время работы Фристона по принципу свободной энергии [1, 2], изначально разработанные для нейробиологии, демонстрируют потенциал объяснения адаптивного поведения на всех уровнях биологической организации, что согласуется с идеями Николиса о самоорганизации в биологических системах [10].

Для преодоления перечисленных ограничений необходимы более сложные математические подходы. Адаптацию ПСЭ в математических терминах целесообразно реализовывать с помощью стохастических процессов теории вероятностей и стохастических дифференциальных уравнений — они способны более полно описать межвидовые взаимодействия в силу исходно вероятностной природы процессов и лучше работать с явлениями хаоса.

Эволюционные траектории следует изучать не только ретроспективно, чтобы понять, как возникли существующие виды, но и перспективно — для выявления потенциально полезных адаптаций. Например, бактерии начали спонтанно перерабатывать пластик [11, 12] в океанах до более безопасных соединений. Обычными методами эво-

люции в парадигме «хищник — жертва» это было бы трудно предсказать: бактерия, ранее питающаяся иными субстратами, хоть и могла, по логике Лотки-Вольтерра, перейти на смежный источник пищи, но не могла внезапно освоить совершенно иные химические соединения. Этот пример демонстрирует, как организмы исследуют смежные возможности химического пространства, выходя за рамки предсказаний классической дарвиновской теории [5] и обнаруживая новые аффордансы в антропогенно изменённой среде. Иначе говоря, эволюцию стоит рассматривать как процесс самостоятельной оптимизации получения энергии — формирование более энергоэффективного поведения. Согласно ПСЭ, такие адаптации происходят, когда организмы минимизируют неопределенность в новой среде благодаря улучшению внутренних предсказаний и снижению разрыва между внутренним и внешним.

Ввиду недостаточности эмпирических данных для полного анализа эволюционных процессов приходится строить модели на основе имеющейся информации с привлечением мультидисциплинарных специалистов, в том числе философов, которые формируют общую концептуальную рамку.

Принцип свободной энергии находит применение не только в биологических системах, но и в развивающихся технологиях. Он важен для понимания эволюции популяций и для обучения нейронных сетей. Поскольку нейронные сети, начиная с перцептрана [13], моделируют принципы работы биологических нейронов, развитие искусственного интеллекта следует аналогичным принципам. Ожидается, что самооптимизация моделей искусственного интеллекта под условия контекста развивающегося мира произойдет в обозримом будущем.

Заключение. Проведённый литературный обзор позволил систематизировать основные подходы к математическому моделированию биологических процессов и выявить ограничения классических моделей типа Лотки-Вольтерра. Анализ литературы подтверждает перспективность применения принципа свободной энергии Фристиона для описания эволюционных процессов, поскольку ПСЭ может служить объединяющей теоретической основой для понимания адаптивного поведения от клеточного до экосистемного уровня, а стохастические подходы демонстрируют большую адекватность в моделировании биологических систем по сравнению с детерминистскими моделями. Авторский вклад состоит в предложении концептуальной схемы интеграции ПСЭ в эволюционную биологию и демонстрации перспектив использования стохастических методов для моделирования межвидовых взаимодействий. Ограничения исследования связаны с недостатком эмпирических данных для валидации предложенных подходов и необходимостью разработки специализированного математического аппарата для практического применения ПСЭ в популяционной экологии, что определяет направления дальнейших исследований: разработку вычислительных моделей, основанных на ПСЭ, для прогнозирования эволюционных траекторий, и эмпирическую проверку предсказаний теории на модельных биологических системах.

Информация о финансовой поддержке

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ № FZNE-2024-0004.

Список литературы

1. Friston K. The Free-Energy Principle: A Unified Brain Theory? *Nature Reviews Neuroscience*. 2010;11(2):127–138. <https://doi.org/10.1038/nrn2787>
2. Friston K. Life as We Know It. *Journal of the Royal Society Interface*. 2013;10:20130475. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0475>
3. Lotka AJ. *Elements of Physical Biology*. Baltimore: Williams and Wilkins Company; 1925. 495 p. <https://doi.org/10.1038/116461b0>
4. Volterra V. Variations and Fluctuations of the Number of Individuals in Animal Species Living Together. In: Chapman RN (Ed.). *Animal Ecology*. New York: McGraw-Hill; 409–448. <http://dx.doi.org/10.1086/284409>
5. Darwin C. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. London: John Murray; 1859. 502 p. URL: <https://archive.org/details/onoriginofspec00darw/page/502/mode/2up> (accessed: 22.07.2025).
6. Kauffman SA. *Investigations*. Oxford: Oxford University Press; 2000. 272 p. URL: <https://archive.org/details/investigations00kauf> (accessed: 22.07.2025).
7. Gibson JJ. *The Ecological Approach to Visual Perception*. New Jersey, London: Lawrence Erlbaum Associates. 1986. URL: https://books.google.ru/books?id=yv_9hU_26KEC (accessed: 20.07.2025).
8. May RM. *Stability and Complexity in Model Ecosystems*. Princeton: Princeton University Press, 1974. <https://doi.org/10.1515/9780691206912>
9. Holling CS. The Functional Response of Predators to Prey Density and Its Role in Mimicry and Population Regulation. *Memoirs of the Entomological Society of Canada*. 1965; 97(S45):5–60. <https://doi.org/10.4039/entm9745fv>
10. Nicolis G, Prigogine I. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. New York: Wiley-Interscience Publications; 1977. URL: <https://scispace.com/pdf/self-organization-in-nonequilibrium-systems-from-dissipative-470vbgju5n.pdf> (accessed: 25.07.2025).

11. Yoshida S, Hiraga Kazumi, Takehana Toshihiko, Taniguchi Ikuo, Yamaji Hironao, Maeda Yasuhito, et al. A Bacterium that Degrades and Assimilates Poly (Ethylene Terephthalate). *Science*. 2016;351(6278):1196-1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

12. Austin HP, Allen MD, Donohoe BS, Rorrer NA, Kearns FL, Silveira RL, et al. Characterization and Engineering of a Plastic-Degrading Aromatic Polyesterase. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A (PNAS)*. 2018;115 (19) E4350–E4357. <https://doi.org/10.1073/pnas.1718804115>

13. Rosenblatt F. The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*. 1958;65(6):386–408.

Об авторе:

Розалия Дамировна Набиуллина, магистрант кафедры «Биоинженерия» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), nabiullina.study@gmail.com

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Rozaliya D. Nabiullina, Master's Degree Student of the Bioengineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), nabiullina.study@gmail.com

Conflict of Interest Statement: the author declares no conflict of interest.

The author has approved the final manuscript.