

## ДИСКУССИЯ

# Потенциальная вариативность нейронных сетей мозга в контексте идей Л. В. Крушинского

КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ А. Л. КРУШИНСКОГО «ПЛАТА ЗА РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ: БИОФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ВОЗМОЖНЫЕ ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ»

### Александр Каплан

Лаборатория нейрофизиологии и нейро-компьютерных интерфейсов, биологический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

**Аннотация.** Обсуждаются идеи и концепции, изложенные в комментируемой статье А. Л. Крушинского. Делается акцент на идее о том, что каждый информационный акт нервной деятельности приводит к увеличению энтропии в нейронной сети, что требует ее исходной избыточной упорядоченности. Приводятся аргументы в пользу гипотезы Л. В. Крушинского о том, что исходная избыточность в мозгу реализована скорее в исходно большом числе нервных клеток, недифференцированных по своим связям. Однако указывается, что эта избыточность имеет свои нормативные рамки, за которыми могут наблюдаться патологические феномены.

**Контактная информация:** Александр Яковлевич Каплан, [akaplan@mail.ru](mailto:akaplan@mail.ru); Ленинские горы 1/12, Биологический факультет, 119992 Москва, Россия.

**Ключевые слова:** нейроны, мозг, избыточная упорядоченность, энтропия, информация

© 2015 Александр Каплан. Данная статья доступна по лицензии [Creative Commons "Attribution"](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) («Атрибуция») 4.0. всемирная, согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этой статьи на любых носителях при условии указания автора и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

Статья поступила в редакцию 27 марта 2015 г. Принята в печать 29 марта 2015 г.

Замечательный зоопсихолог и эволюционист Леонид Викторович Крушинский в размышлениях о предпосылках элементарной рассудочной деятельности выдвинул гипотезу о том, что «...один из путей эволюции мозга, который мог привести к развитию системы адекватных форм поведения в новой для организма ситуации, — увеличение резерва избыточности нейронов с многообразной системой контактов между ними. Это и создает возможность для образования практически бесконечного числа нейронных ансамблей, которые в каждый данный момент могут выполнять роль своеобразных функциональных нейрональных центров» (Крушинский Л. В., 1986, с. 230).

В комментируемой статье А. Л. Крушинского делается попытка объяснить эту идею в терминах теории информации и термодинамики. Намек на прямую связь между информацией и энтропией содержался еще в знаменитом парадоксе Демона Джеймса Максвелла, якобы способного создавать перепад темпе-

ратур в замкнутой системе всего лишь переключением заслонки между сосудами для сортировки быстрых и медленных молекул. Снижение энтропии в замкнутой системе — явное нарушение второго закона термодинамики! Спустя более полувека легендарный венгерский физик Лео Сциллард разрешил этот парадокс. Он понял, что никакого повышения температуры в замкнутой системе не произойдет, потому что за сведения о скоростях молекул Демон Максвелла должен расплачиваться расходом энергии, то есть увеличением энтропии в системе, эквивалентным ее снижению за счет сортировки молекул. Так, задолго до Клода Шеннона, категория информации получила отражение в терминах термодинамики. Потом биофизики рассчитали, что энергетически информация стоит удивительно дешево. К примеру, чтобы в единственном варианте реализовать сеть нейронных контактов мозга макаки, состоящую примерно из  $10^{13}$  уникальных сигналов, потребуется  $I = \log_2(10^{13}) \approx 10^{13} \log_2 10^{13} = 4 \cdot 10^{14}$  бит

информации. Однако наведение порядка в такой гиперсети приводит к снижению энтропии системы всего на  $10^{-9}$  энтропийных единиц (э. е.). Притом что повышение энтропии системы на 1 э. е. эквивалентно переходу в пар одного грамма воды (Блюменфельд, 1996).

Теоретический анализ проблемы с учетом идей Больцмана и Гиббсона о связи энтропии со статистической концепцией упорядоченности и неупорядоченности системы привел автора статьи А. Л. Крушинского к любопытному выводу по поводу стоимостного выражения информационно-аналитических актов нервной деятельности. Он полагает, что хотя повышение энтропии нейронной сети при каждом элементарном информационном акте незначительно, тем не менее мозгу, по-видимому, всегда необходимо иметь запас упорядоченности, чтобы при какой-нибудь очередной информационной нагрузке не свалиться в хаос. В какой-то мере этот вывод действительно «аналитически» объясняет интуитивную гипотезу Л. В. Крушинского о необходимой избыточности нейронов и контактов между ними для развивающегося и обучающегося мозга. Этот вывод А. Л. Крушинского также созвучен идеям цитируемого в статье Эрвина Шредингера о том, что «организм поддерживает себя постоянно на достаточно высоком уровне упорядоченности (равно на достаточно низком уровне энтропии)» (Шредингер, 1944/2002, с. 78).

Однако апелляция к основаниям термодинамики и теории информации в рассуждениях о механизмах нервной деятельности, хотя и имеет определенную эвристическую ценность, в значительной мере нивелируется тем обстоятельством, что реальный мозг человека и животных относится к категории открытых систем. В этом случае процессы диссипации энергии и динамики упорядоченности систем организма определяются закономерностями и стратегиями его жизнедеятельности без необходимости поддержания баланса расхода энергии. Строго говоря, мозг может «позволить себе» находиться на очень низком уровне упорядоченности без опасности перехода к термодинамическому хаосу. Так собственно и происходит в мозге новорожденного организма, когда нейроны имеются уже в полном комплекте, но остаются практически без связей между собой. Фактически на всем протяжении последующего развития мозг не только не имеет опережающей избыточности «порядка», но сам этот порядок в нейронной сети формируется с каждым новым актом информационной деятельности по мере накопления навыков и развития высших форм нервной деятельности. В этой связи более сильным представляется утверждение Л. В. Крушинского о необходимости для развития мозга «избыточности нейронов с многообразной системой контактов между ними» (Крушинский Л. В., 1986, с. 230), которое по сути дела не требует исходной высокой упорядоченности нейронной сети. Наоборот, именно изначальная неструктурированность или потенциальная многовариантность путей развития нейронной сети позволяет мозгу «лепить» упорядоченные конструкции под конкретные функциональные системы (Арбиб, 2004).

Интересно, что достаточно часто, до 3–5 случаев на 10 тысяч детей, и особенно в последние десятилетия, природа как-то особенно щедро, более чем наполовину

выше среднего (Courchesne et al., 2011), одаривает человека нейронами, в лобных областях коры больших полушарий головного мозга. Однако подобная сверхнормативная избыточность, причем не только нейронов, но и синапсов, почему-то негативно влияет на функции мозга, что фенотипически выражается в тяжелых аутистических расстройствах (Tang et al., 2014). Возможно, этой тенденции способствует широкое распространение антидепрессантов, которые помимо своего известного действия еще стимулируют нейрогенез (Malberg et al., 2000). В любом случае это заставляет задуматься о том, что при очевидной справедливости положений о необходимости изначальной «избыточности нейронов» биологические пределы этой избыточности, по-видимому, не слишком широки и, вероятно, строго определены эволюционной историей организма.

Автору настоящих комментариев к статье А. Л. Крушинского представляется особенно ценным его вывод о том, что «мозг обладает запасом упорядоченности, превосходящим информационную сложность решаемых им задач». Хотелось бы добавить к этой фразе только одно слово — «...потенциальной упорядоченности...», чтобы подчеркнуть приходящую от Л. В. Крушинского и от А. Л. Крушинского мысль о том, что восприятие физического мира и построение его ментальных моделей на основе нейронных сетей может быть настолько полным, насколько велико разнообразие потенциально возможных нейронных конфигураций мозга. Между тем, 86 млрд нейронов головного мозга человека (Herculano-Houzel, 2009) с 5–15 тысячами контактов для каждого нейрона составляют такую высокую комбинаторику вариантов нейронных конфигураций, которая вполне может отразить вариативность значимых для животных и человека параметров и объектов физического макромира.

## Литература

- Арбиб М. Метафорический мозг. М.: Едиториал, 2004.
- Блюменфельд Л. А. Информация, термодинамика и конструкция биологических систем // Соросовский образовательный журнал. 1996. No. 7. P. 88–92.
- Крушинский Л. В. Биологические основы рассудочной деятельности: эволюционные и физиолого-генетические аспекты поведения. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГУ, 1986.
- Шредингер Э. Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки. Москва, Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002.
- Courchesne E., Mouton P. R., Calhoun M. E., Semendeferi K., Ahrens-Barbeau C., Hallet M. J., Barnes C. C., Pierce K. Neuron number and size in prefrontal cortex of children with autism // The Journal of the American Medical Association. 2011. Vol. 306. No. 18. P. 2001–2010. doi:10.1001/jama.2011.1638
- Herculano-Houzel S. The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain // Frontiers in Human Neuroscience. 2009. Vol. 3. P. 31, 1–11. doi:10.3389/neuro.09.031.2009
- Malberg J. E., Eisch A. J., Nestler E. J., Duman R. S. Chronic antidepressant treatment increases neurogenesis in adult rat hippocampus // The Journal of Neuroscience. 2000. Vol. 20. No. 24. P. 9104–9110.
- Tang G., Gudsnuk K., Kuo S.-H., Cotrina M. L., Rosoklija G., Sosunov A., Sonders M. S., Kanter E., Castagna C., Yamamoto A., Yue Z., Arancio O., Peterson B. S., Champagne F., Dwork A. J., Goldman J., Sulzer D. Loss of mTOR-dependent macroautophagy causes autistic-like synaptic pruning deficits // Neuron. 2014. Vol. 83. No. 5. P. 1131–1143. doi:10.1016/j.neuron.2014.09.001

## discussion

# The Potential Variability of Neural Networks in the Context of L. V. Krushinsky's Ideas

COMMENTS ON A. L. KRUSHINSKY'S "THE COST OF PROBLEM SOLVING: BIOPHYSICAL BACKGROUND AND PROBABLE EVOLUTIONARY CONSEQUENCES"

**Alexander Kaplan**

Neuro-Computer Interfaces Laboratory, Faculty of Biology, Moscow State University, Moscow, Russia

**Abstract.** We discuss the concepts contained in the article by A.L. Krushinsky. We specifically focus on the idea that each informational act within a period of nervous activity leads to an increase in the entropy of the neural network, which requires an initial excessive orderliness. We present arguments in favor of the hypothesis proposed by L.V. Krushinsky, that initial redundancy is likely implemented in the brain as an originally large number of nerve cells, as yet undifferentiated by their connections. However, it is suggested that this redundancy has its normative values, the increase of which may lead to pathological phenomena.

**Correspondence:** Alexander Kaplan, [akaplan@mail.ru](mailto:akaplan@mail.ru); Lomonosov Moscow State University, Faculty of biology, Leninskije Gory, 119992 Moscow, Russia

**Keywords:** neurons, brain, excessive orderliness, entropy, information

**Copyright** © 2015. Alexander Kaplan. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (CC BY), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original author is credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

Received 27 March 2015, accepted 29 March 2015.

## References

- Arbib, M. (1972). *The metaphorical brain: an introduction to cybernetics as artificial intelligence and brain theory*. New York: Wiley-Interscience.
- Blumenfeld, L. (1996). Information, thermodynamics, and the structural principles of biological systems. *Soros Educational Journal*, 7, 88–92.
- Courchesne, E., Mouton, P.R., Calhoun, M.E., Semendeferi, K., Ahrens-Barbeau, C., Hallet, M.J., Barnes, C.C., & Pierce, K. (2011). Neuron number and size in prefrontal cortex of children with autism. *The Journal of the American Medical Association*, 306(18), 2001–2010. doi:10.1001/jama.2011.1638
- Herculano-Houzel, S. (2009). The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3, 31, 1–11. doi:10.3389/neuro.09.031.2009
- Krushinsky, L. V. (1986). *[Biological basis of reasoning ability]*. Moscow: Moscow State University. (Russian).
- Malberg, J.E., Eisch, A.J., Nestler, E.J., & Duman, R.S. (2000). Chronic antidepressant treatment increases neurogenesis in adult rat hippocampus. *The Journal of Neuroscience*, 20(24), 9104–9110.
- Schrödinger, E. (1944). *What Is Life? : The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Tang, G., Gudsnuk, K., Kuo, S.-H., Cotrina, M.L., Rosoklija, G., Sosunov, A., Sonders, M.S., Kanter, E., Castagna, C., Yamamoto, A., Yue, Z., Arancio, O., Peterson, B.S., Champagne, F., Dwork, A.J., Goldman, J., & Sulzer, D. (2014). Loss of mTOR-dependent macroautophagy causes autistic-like synaptic pruning deficits. *Neuron*, 83(5), 1131–1143. doi:10.1016/j.neuron.2014.09.001