

Основные концепции современной нейробиологии

Краткий обзор

Н.Н. Кулагина,
кандидат биологических наук

Дается анализ современных представлений о структурно-функциональной организации нервной системы

Ключевые слова: нервная система, теория пластичности нервной системы, принцип фрактала, детерминистский хаос, Fuzzy-анализ, функции невральнoго ответа.

Центральная нервная система в организме человека выполняет интегрирующую роль, объединяя в единое целое все ткани и органы и координируя их специфическую активность в составе целостных гомеостатических и поведенческих функциональных систем. Функции нервной системы достаточно многообразны. Они представлены в нижеприведенной таблице.

Таким образом, деятельность нервной системы, с одной стороны, направлена на интеграцию всех частей организма, а с другой – на взаимодействие организма с окружающей средой и на регуляцию этих взаимоотношений.

Я. Сентаготи и М. Арбиб [14] сформулировали пять основных принципов функционирования нервной системы, которые

Т а б л и ц а

Функции нервной системы
(по В.И. Козлову, Т.А. Цехмистренко)

Анализ информации (аналитическая функция)		Регуляция функций организма (регуляторная функция)	Интегративная деятельность (функция)	Умственная деятельность (психика)
из внутренней среды	из внешней среды			
Интерорецепция	Обоняние	Дыхание	Координация функций	Рисование
Проприорецепция	Зрение	Пищеварение	Чувствование	Воображение
Вестибулярный аппарат	Слух	Кровообращение	Игнорирование	Речь

Анализ информации (аналитическая функция)		Регуляция функций организма (регуляторная функция)	Интегративная деятельность (функция)	Умственная деятельность (психика)
из внутренней среды	из внешней среды			
	Вкус	Водный баланс	Внимание	Письмо
	Осязание	Сохранение гомеостаза	Сон	Чтение
		Положение тела и его частей	Адаптация	Вычисление
		Локомоция	Обучение	Созидание
		Репродукция		Познание
			Осознание собственного Я	
Память				

обеспечивают адаптивное взаимодействие органов с внешней средой.

1. Теория должна исходить из включенного в действие восприятия.

Организм воспринимает внешнюю среду в той мере, в какой он может взаимодействовать с этой средой. У человека и животного существует избыточность потенциальных команд, требующая дополнительного анализа со стороны нервной системы, чтобы определить, какая из программ (систем построения действий) будет регулировать действия организма.

2. Воспринимается не только «что», но и «где».

3. Адаптивная система должна соотносить сенсорные данные и свои действия так, чтобы непрерывно корректировать свою внутреннюю модель мира.

Для организма опыт, навыки, следы памяти сливаются в то, что называют внутренней моделью мира. Сложным системам требуется изменять эту внутреннюю модель, чтобы приспособить ее к тем аспектам внешней среды, которые первоначально не были заложены в модель.

4. Организация должна быть иерархической, с соответствующими петлями обратной связи для координации подсистем.

Важнейшими понятиями в функциональной иерархической организации являются «внешняя обратная связь», «внутренняя обратная связь», «упреждающий разряд» и т. д. Представления о функциональной иерархии нервной системы зависят от уровней (масштабов) описания. Авторы выделяют четыре уровня описания с возрастающей детализацией:

- 1) общее функциональное поведение;
- 2) расчленение функционального поведения:

в соответствии с анатомическим строением;

на отдельные субфункции, которые могут не совпадать;

3) послыйный анализ ядер и областей коры;

4) описание локальных связей и функций нейронов.

5. Мозг является многослойным соматотопическим компьютером.

Функционирование нервной системы связано с восприятием и обработкой разнообразной сенсорной информации, а также информационным обменом между организмом и средой. Передача информации между нервными клетками осуществляется в форме нервных импульсов, которые возникают в сенсорных нейронах как ре-

зультат активации их воспринимающих структур, называемых рецепторами. Сенсорные нейроны передают возникшие в рецепторах импульсы в спинной и головной мозг. Здесь происходит активация других нейронов и передача нервных импульсов в конечном итоге на мотонейроны, локализованные в определенных отделах спинного и головного мозга. Посредством связей, обеспечивающих передачу нервных импульсов между нервными клетками, осуществляется избирательное объединение (интеграция) рецепторов и эффекторного аппарата, реализующего ответную реакцию организма.

Нервная система обладает также памятью – способностью хранить и накапливать значимую для организма информацию, получаемую из внешней и внутренней среды.

Нейроны в нервной системе объединяются в нервные сети, обеспечивающие сложную координированную деятельность организма. Для организации нервной системы в целом характерен принцип иерархического соподчинения нейронных сетей, структурно и функционально связанных с различными отделами мозга.

С.Н. Оленев сформулировал общие принципы, позволяющие упорядочить современные представления о структурно-функциональной организации нервной системы [4 – 6].

1. В ходе фило- и онтогенеза нервная система формируется путем дополнительных надстроек. У высших млекопитающих можно выделить элементы структур и функций (вплоть до поведения), свойственные рептилиям и низшим млекопитающим.

2. Нервную систему формируют три эмбриональных источника: плакоды, ганглиозная пластинка и нервная трубка

3. При размножении в любой зоне миграции клетки образуются в определенной последовательности: сначала малочисленные крупные клетки, затем средние по размерам, позднее многочисленные мелкие ассоциативные клетки. Численные соотношения этих клеток приближаются к пропорции $1 : 2 : 2^n$.

4. Химическое кодирование нервных проекций разного вида обеспечивают медиаторы, гормоны и нейропептиды. Эти биологически активные вещества вовлекают в кодирование ферменты синтеза, мембранные молекулы-транспортёры обратного захвата, мембранные рецепторы, внутриклеточные «вторичные» посредники.

5. Клетки нервной системы объединены в иерархически организованные структурно-функциональные единицы – «модули», содержащие 10—1000 клеток, получающие афферентные волокна и трансформирующие нервными импульсы.

6. Важнейшим принципом существования мозга является топически упорядоченная организация его структур. Трёхмерное пространство мозга составляют два взаимно перпендикулярных вектора топически упорядоченной плоскости и вектор хемотаксиса, обеспечивающий миграцию клеток по градиенту химического вещества.

7. Преобразование многомерной информации в мозге происходит многоступенчато: конвергенция, дивергенция, инверсия, различные формы вычленения.

В данной работе рассматриваются некоторые современные концепции функционирования нервной системы, а именно теория пластичности, принцип фрактала, теория детерминистского хаоса, fuzzy-logic и neurofuzzy-системы.

Теория пластичности нервной системы

В современных представлениях о структурных особенностях и функционировании мозга важное место занимает теория пластичности нервной системы. Пластичность является важнейшей морфофункциональной особенностью нервной системы и обуславливает модификацию состояний мозга. Она существует на всех иерархических уровнях организации нервной системы и затрагивает не только микропроцессы (например, образование медленных потенциалов), но и макропроцессы (память, восприятие) [13].

Г.Н. Крыжановский [2,3] рассматривает пластичность как изменения структурно-функциональной и метаболической орга-

низации нервной системы, обеспечивающие возможность продолжения эффекта после окончания стимула либо сохранения эффекта в виде следа, а также модуляции эффекта при повторных воздействиях.

В нормальных условиях структурно-функциональные изменения на различных морфофункциональных и иерархических уровнях нервной системы происходят постоянно. За счет этого создается физиологическая пластичность нервной системы. Однако если процессы реорганизации выходят за физиологические пределы, то пластичность теряет оптимальный характер.

Известно, что факторами, поддерживающими пластичность нервной системы, являются ассоциированный с ростом протеин GAP-43 и ингибитор нейтрализации антител к миелину mAB-IN-1 [29].

Исследования пластичности волокон кортикоспинальных путей у детей, страдающих гемиплегической формой детского церебрального паралича (ДЦП), на примере «зеркальной» моторики свидетельствуют о том, что со стороны как пораженного полушария, так и непораженного отмечаются ненормальные ветвления ипсилатеральных кортикоспинальных волокон, что может быть следствием морфофункциональной перестройки мозга в ответ на унилатеральное поражение [16].

На уровне биоэлектрической активности головного мозга пластичность нервной системы определяют как высокую вероятность перехода одного вида биоэлектрической активности в другой. Изменение пластичности нервной системы по этому признаку отмечено при нервно-психических заболеваниях у взрослых (маниакально-депрессивный психоз, шизофрения) [15].

Исследования ЭЭГ новорожденных с помощью анализа, позволяющего определить переходы одного вида активности в другой, показали, что для детей с синдромом двигательных расстройств снижение вероятности переходов из ритма в ритм как в предполагаемой зоне поражения, так и в соседних является значимым неблагоприятным прогностическим признаком [7, 8, 10].

У детей с таким ЭЭГ-паттерном в дальнейшем достоверно чаще сохранялся или усугублялся двигательный дефицит, а также формировалась задержка психомоторного развития [9, 11, 12].

Пластичность нервной системы при рассмотрении функционирования мозга в целом хорошо описана с помощью дихотомии «вариабельность – стереотипность» [31]. У здоровых детей различных возрастных групп отмечен широкий диапазон вариабельности движений, а у детей даже с минимальной неврологической дисфункцией выявлено нарушение вариабельности движений и преобладание стереотипий при формировании крупной, мелкой моторики и ползания [24, 33].

Таким образом, пластичность представляет собой универсальный принцип структурно-функциональной организации мозга в норме и патологии. Оптимальная пластичность нервных процессов обеспечивает благоприятное развитие мозга человека, способность к обучению в широком смысле слова.

Принцип фрактала

В современной нейробиологии принцип фрактала распространился на представления о структуре и функции нервной системы (как и на другие системы организма). Под фракталом понимаются процессы, описываемые формулой

$$x_{n+1} = f(x_n) = (x_n)^2 + c,$$

где x — переменная, c — независимое слагаемое. Подобный процесс обладает особенностью сохранять свои свойства при любом масштабе рассмотрения.

Первично теория фрактала касалась принципов геометрии, наиболее интересными иллюстрациями фрактальной геометрии явились фигуры В.В. Mandelbrot.

Дальнейшее развитие теории фрактала связано со статистикой Р. Levy, которая позволяет описывать не только морфологические, но и функциональные закономерности природных объектов [27].

Позднее принцип фрактала был перенесен на биологические объекты и В.В. Ман-

delbrot представил, в частности, схематическую модель легкого млекопитающего. Затем было выявлено, что принцип фрактала играет роль на уровне границ ветвления бронхиального дерева.

Статистика P. Levy объясняет характер роста и ветвления дендритов. Мозг млекопитающих в целом имеет фрактальную структуру, и фрактальное число d для поверхности коры головного мозга составляет $2,7 \pm 0,07$ [25]. Что касается функциональных особенностей нервной ткани, то установлено, что нейронные разряды, обусловленные процессами возбуждения и торможения, также описываются статистикой P. Levy [21].

Теория фрактала дает возможность создать морфофункциональную модель нервной системы и позволяет утверждать, что определенные свойства нервной системы (и не только нервной) сохраняются при любом масштабе ее рассмотрения — от нейрона и нейронных ансамблей до мозга в целом [22, 23].

Таким образом, определенные свойства нейронов и нейронных цепей можно распространить на мозг в целом.

Теория детерминистского хаоса

Детерминистский хаос — это модель нелинейных динамических процессов в природе, присутствующая в различных физических феноменах.

Любая нелинейная хаотическая система способна к переключению от линейных регулярных фаз к хаотичным нелинейным (принцип перемежения), системы же с очень близкими исходами быстро расходятся, ведя к непредсказуемости результата [17, 28].

В настоящее время теория детерминистского хаоса стала одной из основных теорий функционирования нервной системы. Она применима к современным представлениям о перцепции.

Изучение функции обоняния показало, что распространение обонятельного импульса происходит благодаря коллективной работе нейронов. Ряд нейронов способствует активации (возбуждению),

а другой ряд — ингибированию (торможению). W.J. Freeman [17] показал, что в функционировании (периодах возбуждения и «молчания») рецепторных обонятельных нейронов, нейронов обонятельных луковиц и коры, а также их взаимодействия присутствуют аperiodические, неповторяющиеся, хаотические процессы. Наиболее заметны эти явления при недостаточном внешнем стимулировании обонятельной луковицы, при котором импульсная активность нейронов обонятельной коры приобретает свойства хаотической самоорганизации.

Рядом исследований установлено, что биоэлектрическая активность мозга определяется саморегулирующимися разрядами возбуждающих и тормозящих нейронов [17, 28]. Анализ динамики многоканальной ЭЭГ показал локальную потерю предсказуемости биоэлектрической активности и положительную энтропию всех примененных экспериментальных состояний, что доказывает хаотичность процессов, лежащих в основе ЭЭГ. А.Б. Пальчик исследовал новорожденных с постгипоксическим синдромом повышенной нервно-рефлекторной возбудимости. Результаты этих исследований позволили найти конкретное практическое применение теории детерминистского хаоса. При изучении биоэлектрической активности головного мозга у этих детей выявлены паттерны ЭЭГ-картирования. Отмечается значительное повышение и снижение кросс-корреляции амплитудных значений преимущественно в лобных областях. Этот факт позволяет предположить, что в основе рассматриваемого состояния лежат реальные нейрофизиологические механизмы — это либо синхронизация, либо асинхрония биоэлектрической активности. При синдроме повышенной нервно-рефлекторной возбудимости, протекающей с синхронной картиной ЭЭГ, отмечается достоверно менее благоприятный прогноз психомоторного развития, чем у детей с асинхронной ЭЭГ. При этом наблюдается не только сохранение тремора, возбудимости и скованности, но и более позднее формирование моторных

навыков вследствие замедления эволюции цепных шейно-тонических реакций. А.Б. Пальчик высказывает предположение, что мозг новорожденного с высокими и низкими кросс-корреляциями представляет собой две системы с близким исходом (повышенная возбудимость). Синхронность обусловлена, по-видимому, именно регуляторными фазами в разрядах нейронов, асинхронность – хаотичными разрядами [8 – 12].

Fuzzy-logic и neurofuzzy-системы

Fuzzy-logic* – это методология изучения неопределенных, непредсказуемых систем и процессов. Она имеет особые отношения с нейронауками, поскольку, с одной стороны, ее принципы позволяют интерпретировать ряд процессов, происходящих в нервной системе, с другой стороны, принципы существования цепей, сетей нейронов используются в построении neurofuzzy-систем в промышленной технологии. Возможно, первым исследованием fuzzy-систем в нейронауках было изучение Т. Юнгом (Т. Young) в начале XIX в. механизмов цветного зрения. Он писал: «В настоящее время невозможно представить любую чувствительную точку сетчатки, содержащую бесконечное количество частиц, каждая из которых была бы способна вибрировать в полный унисон с любым возможным колебанием. Приходится предположить, что число этих частиц ограничено и, к примеру, на три основных цвета — красный, желтый и синий — каждая из частиц реагирует с большей или меньшей силой колебаниями, отличающимися от колебаний, реализуемых в унисон» [32, p. 12]. Высказываясь подобным образом, Т. Юнг сформулировал проблему и наметил пути ее решения: проблема состоит в невозможности обработки большого количества информации ограниченным числом нейронных ресурсов; решение – в теории неупорядоченных конфигураций (систем) (fuzzy set theory).

В дальнейшем гипотеза Т. Юнга была распространена на все сенсорные системы, и особенности ответа в сенсорных системах называют Neural Response Functions (NRF) – функциями неврального ответа.

Fuzzy-анализ также успешно применяется к таким фундаментальным психическим процессам, как память и интеллект [18–20, 26, 30].

Литература

1. Козлов В.И., Цехмистренко Т.А. Анатомия нервной системы. М., 2003.
2. См. статью Г.Н. Крыжановского в «Журнале невропатологии и психиатрии им. С.С. Корсакова». 1990. Т. 90. №10.
3. Крыжановский Г.Н. Общая патофизиология нервной системы. М., 1997.
4. Оленев С.Н. Конструкция мозга. Л., 1987.
5. Оленев С.Н. Нейробиология. СПб., 1995.
6. Оленев С.Н., Оленев А.С. Эволюция мозга человека. СПб., 2000.
7. Пальчик А.Б. Скрининг-схема оценки состояния нервной системы новорожденного. СПб., 1995.
8. Пальчик А.Б. Диагноз и прогноз перинатальных поражений головного мозга гипоксического генеза: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. СПб., 1997.
9. Пальчик А.Б. Пограничные состояния нервной системы новорожденных // Педиатрия. 1998. №5.
10. Пальчик А.Б. Эволюционная неврология. СПб., 2002.
11. Пальчик А.Б., Чугреев И.В. Диагностика перинатальных поражений мозга у новорожденных методом электроэнцефалографического картирования // Педиатрия. 1995. №3.
12. Пальчик А.Б., Чугреев И.В. Клиническая и электроэнцефалографическая характеристика синдрома повышенной нервно-рефлекторной возбудимости // Педиатрия. 1997. №3.
13. Прибрам К. Языки мозга: Пер. с англ. М., 1975.
14. Сентаготаи Я., Арбиб М. Концептуальные модели нервной системы: Пер. с англ. М., 1976.

* Fuzzy (англ.) – неясный, неопределенный, неупорядоченный, неровный.

15. Сорока С.И., Сидоренко Г.В. ЭЭГ-маркеры нервно-психических нарушений и компьютерная диагностика. Бишкек, 1993.
16. Farmer C.F., Harrison L.M., Ingram D.A., Stephens J.A. Plasticity of central motor pathways in children with hemiplegic cerebral palsy // *Neurology*. 1991. Vol. 41. №9.
17. Freeman W.J. Physiology of perception // *Scientific American*. 1991. Vol. 264. February.
18. Erickson R.P., Chelaru M.I., Buhusi C.V. The brain as a Fuzzy Machine: A modeling problem // *Fuzzy and neurofuzzy systems in Medicine* / Eds H.-N. Teodorescu, A. Kandel, L.C. Jain. N. Y., 1999.
19. Erickson R.P., DiLorenzo P.M., Woodbary M.A. Classification of taste responses in brain stem: Membership in fuzzy sets // *J. of Neurophysiology*. 1994. Vol. 71.
20. Erickson R.P., Woodbary M.A., Doetsch G.S. Distributed neural coding based on fuzzy logic // *Information Sciences*. 1996. Vol. 95.
21. Gerstein G.L., Mandelbrot B.B. Random walk models for spike activity of a single neuron // *Biophysical J.* 1964. Vol. 4.
22. Goldberger A.L., Rigney D.R., West B.J. Chaos and fractals in human physiology // *Scientific American*. 1990. Vol. 263. February.
23. Goldberger A.L., West B.J. Fractals in physiology and medicine // *Yale J. Biol. Med.* 1987. Vol. 60.
24. Hadders-Algra M., Huisjes H.J., Touwen B.C.L. Preterm of small-for-gestational-age infants. Neurological and behavioral development at the age of 6 years // *European J. Pediatrics*. 1988. Vol. 147.
25. Hofman M.A. The fractal geometry of convoluted brains // *J. Hirnforsch.* 1991. B. 32.
26. Kohonen T. Self-organization and Associative Memory. N. Y., 1977.
27. Levy P. Theorie de l'addition des variables aleatoires. Paris, 1937.
28. Rae-Grant A.D., Kim Y.W. Type III intermittency: a nonlinear dynamic model of EEG burst suppression // *EEG Clin. Neurophysiol.* 1994. Vol. 90. №1.
29. Schwab M.E. Structural plasticity of the adult CNS. Negative control by neurite growth inhibitory signals // *Int. J. Develop. Neurosci.* 1996. Vol. 14. №4.
30. Sugeno M., Yasukawa T. A fuzzy-logic-based approach to qualitative model // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 1993. Vol.1.
31. Touwen B.C.L. The relationship between minor neurological dysfunction and learning disabilities // *Thalamus*. 1981. Vol. 1. №2.
32. Young T. On theory of light and colors // *Phil. Tans. Soc. of London*. 1802. Vol. 92.
33. Weisglas-Kuperus N., Baerts W., Fetter W.P.F. et al. Minor neurological dysfunction and quality of movement in relation to neonatal cerebral damage and subsequent development // *Dev. Med. Child Neurol.* 1994. Vol. 36. №8.