

УДК 57.089

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НЕЙРОФИЗИОЛОГИИ В ВОПРОСАХ ИЗУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И НЕЙРОННЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ

Кириллова Г.А., Урунова Г.

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»,  
Архангельск, e-mail: g.kirillova@narfu.ru, urunova.g@edu.narfu.ru

Долгое время нейрофизиология была исключительно прикладной частью физиологии и ее развитие шло по пути экспериментальных наук. В конце XIX – начале XX вв. с появлением новых, не разрушающих мозговые структуры методов исследования, нейрофизиология заняла свое место и в нише теоретических наук. Возможности изучения электрических проявлений деятельности нервной системы в целом и мозга в частности дали простор для исследований и размышлений на тему сознания, памяти и восприятия. Значимость нейрофизиологии в современном мире трудно переоценить. Мозг человека – объект междисциплинарного исследования и изучается на разных уровнях: молекулярном, клеточном, на уровне объединения нейронов, на уровне систем. Электрофизиология, нейропсихология, нейробиология, нейроанатомия – все эти дисциплины тесно связаны с изучением функций нервной системы. Нейрофизиология является связующей дисциплиной и работает над теоретическими аспектами всей неврологии. Современная нейрофизиология изучает вопросы когнитивных функций головного мозга и такие высшие функции, как восприятие, память, абстрактное мышление, являются сегодня объектами пристального изучения в области кибернетики и искусственного интеллекта. Целью данной работы является изучение направлений современной нейрофизиологии и её историко-философские аспекты в создании систем искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, нейрофизиология, анализ сигналов ЭЭГ, машинное обучение, моторно-корковые потенциалы, интерфейс мозг – компьютер

## MODERN METHODS OF NEUROPHYSIOLOGY IN THE STUDY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND NEURAL INTERFACES

Kirillova G.A., Urunova G.

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk,  
e-mail: g.kirillova@narfu.ru, urunova.g@edu.narfu.ru

For a long time, neurophysiology was exclusively an applied part of physiology. Its development followed the path of experimental sciences. In the late XIX-early XX centuries, with the advent of new research methods that do not destroy brain structures, neurophysiology took its place in the niche of theoretical sciences. The possibilities of studying the electrical manifestations of the nervous system in general and in particular the brain gave scope for research and reflection on the topic of consciousness, memory, and perception. The importance of neurophysiology in the modern world is challenging to overestimate. A human brain is an object of interdisciplinary research. It is studied at different levels: molecular, cellular, and combining neurons and systems. Electrophysiology, neuropsychology, neurobiology, neuroanatomy – all these disciplines are closely related to the study of the functions of the nervous system. Neurophysiology is a connecting discipline and works on the theoretical aspects of all neurology. Modern neurophysiology studies the cognitive functions of the brain, and such higher functions as perception, memory, and abstract thinking are now objects of close study in the field of cybernetics and artificial intelligence. This work aims to study the trends of modern neurophysiology and its historical and philosophical aspects in the creation of artificial intelligence systems.

**Keywords:** artificial intelligence, neurophysiology, EEG signal analysis, machine learning, movement-related cortical potential, brain-computer interface (BCI)

Одним из знаковых вопросов в нейрофизиологии и философии остается отождествление сознания и процессов, протекающих в мозге. Человеческое сознание – достаточно многогранное понятие. Сегодня оно может быть воспринято с точки зрения разных научных подходов. В первую очередь вопросами изучения человеческого сознания занимаются такие науки, как философия, психология, психофизиология, медицина. Проблема изучения сознания возникла достаточно давно, и до сих пор ученые не пришли к единому мнению по этому вопросу.

Дэниэл Деннет, Пол Черчленд, Джессе Принц являются представителями современной философии сознания. Так, например, Д. Принц в центре своего научного поля зрения имеет различные интересы, в числе которых объяснение природы ментального опыта, эмоций, морального выбора. Эти аспекты изучаются в том числе и с помощью методов нейрофизиологии, таких как регистрация биоэлектрической активности мозга, магнитно-резонансная томография, исследования нервной проводимости. Д. Принц убежден, что возможности исследований в современной нейрофизио-

логии дают фундамент натуралистической теории, описывающей порождение сознания человеческим мозгом [1].

Современная научная точка зрения на взаимосвязь между сознанием и нервной активностью неоднозначна. С одной стороны, процесс по выявлению сознания с помощью нейробиологии построен на физикалистской идее о том, что сознание тождественно нейронной активности: известно, что мозг необходим для сознания, и нейробиология начала разгадывать нейронные механизмы, которые создают субъективный, сознательный опыт [2].

С другой стороны, ученые и философы часто предполагают, что наука может просто наблюдать корреляции между нейронной активностью и сознанием, но не сознанием как таковым. По этой причине нейробиологи ищут нейронный коррелят сознания (NCC), который был определен как минимальный набор нейронных процессов, которые вместе достаточны для определенного сознательного опыта.

Цель данной работы состоит в изучении направлений современной нейрофизиологии и её историко-философских аспектов в создании систем искусственного интеллекта, а также интерфейсов мозг – компьютер.

#### **Материалы и методы исследования**

Анализ современных представлений о биоэлектрической активности мозга, изучаемой с помощью различных методик электроэнцефалографии. Изучение отечественных и зарубежных исследований, внесших весомый вклад в исследования сознания человека, разработку нейронных интерфейсов и создание систем искусственного интеллекта.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Пытаясь объяснить, что должно происходить в головном мозге, чтобы визуальная информация перешагнула порог сознания, нейробиология исследует причинно-следственную цепочку событий, которые к этому приводят. Например, нейронные процессы, которые предшествуют предъявлению стимула, помогают предсказать, воспринимается ли стимул сознательно, это может означать, что предстимульная активность коррелирует с последующим сознательным восприятием [3].

Решения в естественнонаучном мире редко принимаются изолированно. Каждое действие, которое выбирает организм, повлияет на будущие ситуации, в которых он окажется, и эти ситуации, в свою очередь, повлияют на будущие доступные дей-

ствия. Достижение реальных целей часто требует успешного выполнения последовательности многих действий. Эффективный и гибкий способ достижения таких целей – построить внутреннюю модель среды и использовать ее для планирования поведения на несколько этапов в будущем. Этот процесс известен как многоэтапное планирование, и его нейронные механизмы только начинают понимать.

Недавние достижения в понимании этих механизмов, многие из которых используют преимущества многоэтапных задач принятия решений для людей и животных, описаны в научных трудах К.Дж. Миллера [4]. В последние годы наблюдается резкий прогресс в понимании нейронных механизмов многоэтапного планирования. Этот прогресс во многом стал возможен благодаря разработке около десяти лет назад разнообразных многоэтапных задач принятий решений людьми.

Работа над нейронными механизмами планирования основывается на обширной работе по изучению когнитивных способностей, от которых может зависеть планирование. Одна из них – способность связывать стимулы или действия с конкретными ожидаемыми результатами. Поведение, управляемое такими связями, ориентированными на результат, можно рассматривать как упражнение в простой одноэтапной форме планирования. Исследователи разработали несколько выборочных анализов этой способности и широко использовали их для идентификации и характеристики нейронных структур, которые поддерживают ассоциации, зависящие от результата [4, 5].

Многоэтапное планирование требует способности связывать воедино последовательности ассоциаций действие – результат, чтобы направлять несколько шагов поведения к потенциально отдаленной цели. Современные вычислительные методы планирования формализуют эту идею с помощью внутренней модели «функция перехода» и «функция вознаграждения» [4].

В мире технологическая и промышленная революция ускоряется благодаря широкому применению информационных и коммуникационных технологий нового поколения, таких как искусственный интеллект. Он использует компьютеры для моделирования разумного поведения человека и обучает компьютеры изучать такие человеческие черты, как обучение, суждение и принятие решений. Машинное обучение позволяет компьютерам автоматически изучать и анализировать большие данные, а затем принимать решения и предсказывать события в реальном мире. Помимо

применения алгоритмов, относящихся к искусственному интеллекту, в области распознавания образов, результаты были достигнуты и в других областях, среди которых распознавание речи, поисковые системы, семантический анализ и системы принятия решений [5].

С 2015 г. широко используются методы обработки изображений, использующие глубокое обучение для классификации. Нейронная сеть встроена через нейроны, а модель имеет нелинейную функцию подгонки через функцию активации. Цель компьютерного зрения – дать возможность компьютерам распознавать и понимать мир через зрение, как это делают люди. В основном оно использует алгоритмы для идентификации и анализа изображений. Наиболее широко используемыми компьютерными зрительными образами являются распознавание лиц и изображений [6].

Успехи в нейрофизиологии, теории принятия решений и анализа сенсорной информации позволяют ученым создавать роботизированные системы, наделенные искусственным интеллектом. Это стало возможным благодаря тому объему знаний о когнитивных способностях человека, работе нервной системы, которые получены нейрофизиологическими методами [7–9].

Для этой цели одной из технологий, которая оказалась подходящей, является электроэнцефалография (ЭЭГ), которая регистрирует текущую электрическую активность мозга. ЭЭГ широко использовалась в исследованиях визуального и аудиовосприятия а в последнее время также для оценки воспринимаемого пользователем качества мультимедиа. Предполагается, что у людей есть внутренний порог, который заставляет их решать на когнитивном уровне, заметили они искажение или нет [7]. Крайне важно более глубоко изучить взаимосвязь между реакцией ЭЭГ и поведенческой реакцией на пороге восприятия, чтобы предотвратить внедрение методов кодирования видео, которые могли бы привести к искажениям, потенциально воспринимаемым наиболее чувствительными людьми, а также для создания роботизированных систем, способных идентифицировать эмоции, оценивать популярность мультимедийного цифрового контента. Последнее играет важную роль в медиаиндустрии, где рейтинги используются для сравнения различных видео и, соответственно, предлагают видеоконтент с лучшим рейтингом для перспективных зрителей [8]. В будущем может быть создана модель анализа эмоций для автоматической маркировки видео вместе с системой прогнозирования их рейтинга.

Результаты показывают, что статистические характеристики сигналов ЭЭГ во временной области позволяют эффективно различать различные эмоциональные состояния. Кроме того, использование трехмерной модели эмоций позволяет классифицировать аналогичные эмоции, которые не были правильно классифицированы двумерной моделью (например, гнев и страх). Результаты этого исследования могут быть использованы для разработки систем распознавания эмоций на основе ЭЭГ в реальном времени [9].

Поколение роботов на сегодняшний день – интеллектуальные роботы. Этот робот обладает интеллектом, подобным человеческому, и оснащен высокочувствительными датчиками. Его сенсорные способности превосходят таковые у обычных людей. Робот может анализировать информацию, которую он воспринимает, контролировать свое поведение, реагировать на изменения в окружающей среде и выполнять сложные задачи. Однако до сих пор остается неясным, может ли робот наравне с человеком испытывать эмоции, насколько это достижимо на данном этапе развития области кибернетики [10].

В последние годы в исследовании искусственного интеллекта возобновился интерес к метаобучению, или обучению обучению. Однако метаобучение невероятно широко распространено в природе, имеет глубокие корни в когнитивной науке и психологии и в настоящее время изучается в различных формах в рамках нейробиологии. В когнитивной науке иерархические байесовские модели познания отражают, как обучение может происходить на разных уровнях и посредством приобретения полезных, структурированных априорных факторов. Хотя в психологических и когнитивных науках существует надежная история метаобучения, связи между метаобучением и нейробиологией относительно новы. Некоторые направления исследований в нейробиологии, широко связанные с метаобучением, связаны с изучением контроля над существующими представлениями. В частности, ментальные схемы описываются как структурированные мыслительные представления, которые позволяют ускорить обучение, помогая в поиске существующих знаний и интеграции новых знаний [9, 10].

Еще одно актуальное направление исследований – это исследование иерархической репрезентации и когнитивного контроля (способность выполнять релевантную для задачи обработку без внешней поддержки или перед лицом отвлекающих факторов). Некоторые исследователи пред-

полагают иерархическую организацию префронтальной коры по всей длине. Такая иерархически структурированная организация наводит на мысль о масштабной природе систем метаобучения. В этой области менее изучено, как возникают такие иерархические представления. Чтобы изучить это, полезно обратиться к нейробиологии развития, которая показывает, что младенцы могут изучать скрытую структуру для выстраивания иерархии правил и извлечения статистической закономерности из речи. Взрослые люди также изучают новую структуру и имеют склонность к структурному обучению, даже когда это не является строго необходимым, поскольку такая структура обеспечивает более быстрое обучение и обобщение в еще неизвестных ситуациях [10].

Нейронные корреляты целенаправленных действий и их отличия от движений, которые не приводят к взаимодействию с определенной целью (например, с объектом или визуальной целью на экране), в последние годы в основном изучаются в задачах наблюдения за движением. [11]. Эти исследования привели к пониманию действия как результата когнитивного процесса. Некоторые из последних результатов в этой области могут представлять интерес для исследований интерфейса мозг – компьютер (BCI), поскольку целенаправленные движения имеют первостепенное значение для нейронных интерфейсов, которые основаны на обнаружении и расшифровке движений. BCI можно использовать для управления такими устройствами, как функциональные нейропротезы на основе электрической стимуляции, способные восстановить функцию кисти и локтя у пациентов с тетраплегией с помощью мыслей [12].

Современные неинвазивные нейронные интерфейсы используют ЭЭГ для использования сенсомоторных ритмов, связанных с воображением движений [13]. Несмотря на разработки последних нескольких лет, нейронные интерфейсы на основе сенсомоторных ритмов по-прежнему не имеют естественного и интуитивно понятного управления по двум основным причинам. Во-первых, они полагаются исключительно на обнаружение конечности (обычно обеих стоп, правой руки, левой руки), подвергаемой воображению движения, что приводит к небольшому количеству классов. Ограниченное количество классов не позволяет осуществлять естественный контроль, поскольку может случиться так, что повторяющееся воображаемое движение стопы будет связано с конкретным движением нейропротеза, например с командой раскрытия руки. Это не может воспроизвести естественный

способ планирования движения. Во-вторых, задержка между обнаружением намерения движения и фактическим намерением пользователя составляет порядка секунд, что недостаточно для применения принципа Хебба [13]. Сокращение временного разрыва между намерением пользователя и обеспечиваемой обратной связью (например, электростимуляция; управление роботизированными устройствами) имеет основополагающее значение не только для быстрого и естественного контроля движений, но и потому, что оно может способствовать восстановлению моторики на корковом уровне, стимулируя нейропластичность [14].

Чтобы преодолеть эти ограничения, нейронный интерфейс должен уметь расшифровывать способ планирования и выполнения действия, обеспечивая своевременную и точную обратную связь о намерениях пользователя. Это было бы возможно, если бы интерфейс мог декодировать как цель предполагаемого действия, так и характеристики движения (например, скорость, силу). В идеале декодирование на целевом уровне – описание краткосрочных целей, необходимых для достижения определенного действия, – и на кинематическом уровне – описание кинематики руки (в пространстве и времени) — должно быть объединено для достижения оптимального и интуитивного управления. Эта двухуровневая стратегия была предложена Графтоном и Гамильтоном и описывает механизм целенаправленных действий, которые имеют большое значение для управления нейронными интерфейсами (интерфейсы мозг – компьютер), поскольку предполагают взаимодействие с мишенями [15].

Кроме того, в качестве альтернативы модуляциям мощности в различных частотных диапазонах, используемых в нейроинтерфейсах на основе сенсомоторных ритмов, можно использовать амплитудные модуляции во временной области в дельта-диапазоне. Эти медленные колебания, когда они связаны с двигательной задачей, известны как моторные корковые потенциалы и представляют собой нейронные корреляты ЭЭГ планирования и выполнения движения, которые использовались для обнаружения движения [14]. Моторные корковые потенциалы (МКП) могут обеспечивать многогранный и богатый сигнал управления двигателем по двум основным причинам. Во-первых, было показано, что обнаружение намерения движения с помощью МКП имеет относительно короткие задержки, что сокращает время между фактическим намерением и ответом системы. Во-вторых, известно, что для движений верхних

конечностей величина и наклон МКП модулируются параметрами, связанными с движением, такими как скорость и сила, а также позволяет различать направления движения и траектории, типы захвата или другие движения верхней конечности. Поскольку МКП отражают корковые процессы, используемые при планировании движения, и, как известно, модулируются несколькими параметрами, связанными с движением, интересно изучить, отражается ли также наличие конкретной цели движения в этом нейронном корреляте. Если наличие цели действительно отражено в МКП, то можно задаться вопросом, какое влияние эта информация оказывает на обнаружение движения для управления нейронным интерфейсом [14].

### Заключение

В контексте современной нейрофизиологии вопросы изучения интерфейсов мозг – компьютер и систем искусственного интеллекта особенно актуальны. Незаменимым средством в исследованиях нейробиологов остается электроэнцефалография. Методы на ее основе позволяют изучать нейронные процессы с различных сторон и получать массивы данных, необходимые для создания нейронных интерфейсов и обучения искусственного интеллекта. Остается еще большой простор для исследований и поиска новых вариантов обработки и использования данных биоэлектрической активности мозга человека, чтобы совершенствовать и создавать новые высокотехнологические системы.

### Список литературы

1. Ананина М.О. Теория сознания Джесси Принца: философский анализ // Вестник Московского университета. Серия 7. Философия. 2015. № 6. С. 96–105.

2. Carter O. Conscious machines: Defining questions. *Science*. 2018. Vol. 359. No. 359. P. 400.

3. Jylkka J., Railo H. Consciousness as a concrete physical phenomenon. *Consciousness and Cognition*. 2019. Vol. 74. P. 4–12.

4. Miller K.J. Multi-step planning in the brain. *Current Opinion in Behavioral Sciences*. 2021. Vol. 38. P. 29–39.

5. Balleine B.W. The Meaning of Behavior: Discriminating Reflex and Volition in the Brain. *Neuron*. 2019. Vol. 104. No. 1. P. 47–62.

6. Wang J.X. Meta-learning in natural and artificial intelligence. *Current Opinion in Behavioral Sciences*. 2021. Vol. 38. P. 90–95.

7. Acqualagna L., Bosse S., Porbadnigk A.K., Curio G., Müller K.-R., Wiegand T., Blankertz B. EEG-based classification of video quality perception using steady state visual evoked potentials (SSVEPs). *Journal of Neural Engineering*. 2015. Vol. 12. P. 1–14.

8. Gaubaa P., Kumara P., Pratim R. Prediction of advertisement preference by fusing EEG response and sentiment analysis. *Neural Networks*. 2017. Vol. 92. P. 77–88.

9. Nawaz R., Cheah H., Nisar V., Yap V. Comparison of different feature extraction methods for EEG-based emotion recognition. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2020. Vol. 40. P. 910–926.

10. Бахтеев Д.В. Предпосылки становления и этапы развития технологии искусственного интеллекта // *Genesis: исторические исследования*. 2019. № 8. С. 89–97.

11. Rizzolatti G., Cattaneo L., Fabbri-Destro M., Rozzi S. Cortical mechanisms underlying the organization of goal-directed actions and mirror neuron-based action understanding. *Physiological Reviews*. 2014. Vol. 94. No. 2. P. 655–706.

12. Rupp R., Rohm M., Schneiders M., Kreiling A., Müller-Putz G.R. Functional rehabilitation of the paralyzed upper extremity after spinal cord injury by noninvasive hybrid neuroprostheses. *Proceedings of the IEEE*. 2015. Vol. 103. No. 6. P. 954–968.

13. Müller-Putz G.R., Schwarz A., Pereira J., Ofner P. From classic motor imagery to complex movement intention decoding: The noninvasive Graz-BCI approach. *Progress in brain research*. 2016. Vol. 228. P. 39–70.

14. Pereira J., Ofner P., Schwarz A. EEG neural correlates of goal-directed movement intention. *NeuroImage*. 2017. Vol. 149. P. 129–140.

15. Grafton S.T., Hamilton A.F. C. Evidence for a distributed hierarchy of action representation in the brain. *Human movement science*. 2007. Vol. 26. No. 4. P. 590–616.