

УДК 004.89+577.3

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБРАЗА СТРУКТУР ГОЛОВНОГО МОЗГА

© Леонид Михайлович Макаров^{1,2}, Александр Владимирович Поздняков²,
Ольга Федоровна Позднякова²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет. 194100, г. Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2

Контактная информация: Леонид Михайлович Макаров — к.т.н., профессор, кафедра интеллектуальных систем автоматизации и управления. E-mail: biopet@mail.ru ORCID ID: 0000-0002-2661-6618 SPIN: 3674-5506

Для цитирования: Макаров Л.М., Поздняков А.В., Позднякова О.Ф. Визуализация образа структур головного мозга // Визуализация в медицине. 2023. Т. 5. № 3. С. 10–15.

Поступила: 10.07.2023

Одобрена: 25.08.2023

Принята к печати: 21.09.2023

Резюме. В материалах работы рассмотрена возможность формирования компьютерного образа нейронной структуры головного мозга человека, позволяющего идентифицировать нормальные и патологические фрагменты нейронной структуры, в частности, рассеянного склероза и болезни Альцгеймера. В медицинской практике нарушения нейронной структуры обнаруживаются в томографическом исследовании, выполненном по технологии ядерного магнитного резонанса. Наличие большого количества результатов натурных исследований с указанными заболеваниями актуализирует проблему оперативного анализа графических образов. В материалах работы показана возможность создания прогноза развития патологического состояния организма с учетом факторов внешней среды и применения на практике большого комплекса терапевтических средств, понижающих темп развития заболеваний.

Ключевые слова: МРТ-технология; заболевания Альцгеймера и рассеянного склероза; компьютерный анализ.

VISUALIZATION OF THE IMAGE OF BRAIN STRUCTURES

© Leonid M. Makarov^{1,2}, Alexander V. Pozdnyakov², Olga F. Pozdnyakova²

¹ Saint Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich. Bolshevikov Ave., 22, building 1, Saint Petersburg, Russian Federation, 193232

² Saint Petersburg State Pediatric Medical University. Lithuania 2, Saint Petersburg, Russian Federation, 194100

Contact information: Leonid M. Makarov — Candidate of Technical Sciences, Professor, Department Intelligent Automation and Control Systems. E-mail: biopet@mail.ru ORCID ID: 0000-0002-2661-6618 SPIN: 3674-5506

For citation: Makarov LM, Pozdnyakov AV, Pozdnyakova OF. Visualization of the image of brain structures. Visualization in medicine (St. Petersburg). 2023;5(3):10-15.

Received: 10.07.2023

Revised: 25.08.2023

Accepted: 21.09.2023

Abstract. The paper considers the possibility of forming a computer image of the neural structure of the human brain, which allows identifying normal and pathological fragments of the neural structure. In particular, the diseases of multiple sclerosis and Alzheimer's disease. In medical practice, violations of the neural structure of the brain are detected in a tomographic examination performed using NMR technology. The presence of a large number of results of field studies with these diseases actualizes the problem of operational analysis of graphic images. The materials of the work show the possibility of creating a forecast of the development of the pathological state of the body, taking into account environmental factors and the practical application of a large complex of therapeutic agents that reduce the rate of disease development.

Key words: MRI technology; Alzheimer's and multiple sclerosis diseases; computer analysis.

ИмPLICITНЫЙ характер процессов жизнедеятельности характеризуется множеством скрытых, не представленных в явном виде показателей [1, 2]. На практике, благодаря наличию аппаратных средств представляется возможным зафиксировать некоторые имPLICITные показатели, характеризующие функциональное состояние внутренних подсистем организма. Наиболее ярко имPLICITные

процессы проявляются на нейронных структурах, в частности, головного мозга (ГМ). В историческом отношении первые аппаратные исследования структур головного мозга (СГМ) проводились по методу электроэнцефалографии (ЭЭГ).

Выделением разных групп амплитудно-частотного ритма создавалось общее понимание о рабочих процессах ГМ, где отчетливо просматривались период бодрствования и сна. По результатам натуральных исследований декларировалось, что частотные диапазоны выделенных периодов обладают различием. Если период сна характеризовался малой интенсивностью амплитудно-частотного диапазона, то в период бодрствования наблюдалась высокая интенсивность сигнала ЭЭГ, но другого частотного диапазона. Столь простые и наглядные результаты многочисленных ЭЭГ-исследований декларировали наличие имплицитных процессов в нейронных структурах головного мозга. При этом, выделяя нижнюю и верхнюю границу частотного диапазона смены состояний организма отмечалась высокая вариабельность переходных процессов: от бодрствования ко сну и наоборот. Отмеченная вариабельность численных показателей переходного периода обычно соотносилась с индивидуальными особенностями рабочих процессов СГМ.

Установление таких простых и адекватных описаний сложного комплекса нейронных процессов в СГМ сформировало понятия о норме и патологии, которые характеризуют энергетические затраты организма на поддержание гомеостаза. Вводя понятие гомеостаза в терминах и понятиях статистики, декларируется не только возможность численного описания разных состояний организма, но и отдельных подсистем, в частности СГМ.

В терминах нейрофизиологии эти понятия позволяют установить «некоторый обобщенный» — «средневзвешенный» показатель интенсивности рабочих процессов нейронной структуры в разных отделах головного мозга с учетом случайного проявления набора факторов. В таком понимании рассматриваемый показатель интенсивности рабочих процессов на выделенном фрагменте нейронной сети действительно обладает вариабельностью, оценить которую возможно, используя аксиоматические правила теории вероятности. Основные положения теории вероятности, установленные П. Лапласом в 1812 г. постулируют наличие в природной среде двух абсолютно различных состояний физических объектов: порядка и хаоса. Вероятность обнаружения изменения состояния на протяжении длительного времени наблюдения за состоянием объекта в данной теории оценивается значением, примерно равным нулю. Этот постулат

позволяет констатировать, что в природе существует множество объектов, физическое состояние которых постоянно меняется. Это суждение применимо и к живым объектам природы.

Развивая эти представления, введем понятие о «стабильном — малоизменчивом состоянии» объекта или системы, состоящей из нескольких элементов. Наличие такого объекта, содержащего несколько элементов можно обнаружить в природной среде и охарактеризовать как кластер, обладающий очень малым показателем вариабельности свойств. В терминах современной термодинамики такое состояние объекта, содержащего практически неразличимые по свойствам элементы, характеризуется малым значением дисперсии, что соответствует представлению о «высокой компактности кластера».

Это понятие позволяет иначе взглянуть на процессы в биологической системе. Высокий показатель компактности кластера, характеризуемый некоторым незначительно меняющимся значением дисперсии, позволяет констатировать наличие факта о малых энергетических затратах биологической системы, стремящейся сохранить состояние гомеостаза. Это важное понятие в системном анализе событий, формирующих процессы жизнедеятельности организма. Появление некоторых факторов разного происхождения, способных понизить компактность кластера и тем самым инициализировать большую интенсивность энергетических процессов, будет стремиться повысить уровень дисперсии. Такая ситуация возникает как при естественной реакции живого организма, так и в случае патологии. При естественной активации отдельных фрагментов нейронной сети, СГМ, например, в случае необходимости создания ответной реплики на внешний фактор может наблюдаться кратковременное увеличение значения дисперсии нейронного кластера, охватывающего некоторую часть мозговой структуры.

В случае патологии состояния нейронного кластера может характеризоваться как высоким, так и низким значением дисперсии, наблюдаемым относительно длительный период. Эти состояния относят к очагу воспаления нейронной структуры. Для СГМ такие состояния соотносят с изменением активности нейронной сети, фактически с изменением проводимости нейронного волокна.

Относительно простые описания фрагментов патологии на СГМ выделяются методом магнитно-резонансной томографии (МРТ). Повышение оценок дисперсии на выделенном фрагменте соотносят с увеличением интенсивности рабочих процессов фрагментов нейронной сети. Напротив, понижение

оценок дисперсии соотносят с ухудшением работы выделенного фрагмента нейронной сети.

Этиология таких суждений создается на биофизической основе описания рабочих процессов нейрона, обладающего миелиновой оболочкой, поддерживающей электроизоляционные свойства нейрона. Патологический процесс на СГМ проявляется в том, что происходит избирательное повреждение миелиновой оболочки, обволакивающей нервные волокна. Понижение электроизоляционных свойств группы нейронов ухудшает проводимость фрагментов нейронной сети, что и является проявлением патологии, обнаруживаемой методом МРТ.

Для МРТ-исследования характерно, что в неоднородном магнитном поле, создающимся томографом на СГМ, величина магнитного поля в разных участках нейронной сети будет различна. Этот физический эффект позволяет воспроизводить «послойное» изображение СГМ. Это так называемые пространственные срезы СГМ, воспроизводимые в терминах математической модели МРТ. Меняя соотношения интенсивности магнитного поля и частоты, можно воспроизвести много фреймов — послойных изображений (рис. 1).

Такая методика создания и анализа фреймов выполняется по технологии пленочных оцифрованных слоев — пленок (Slick). Пленочный фрейм — Slick, создается в цифровом формате в виде набора

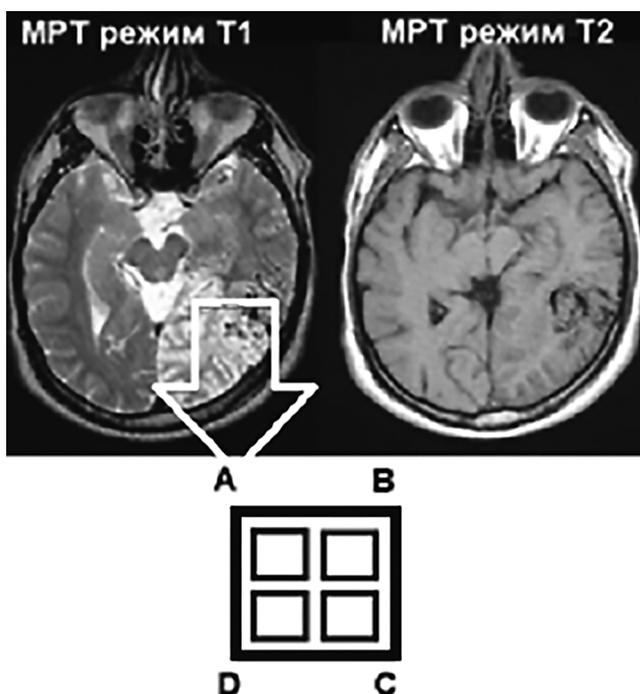


Рис. 1. Фрейм — одиночный кластер структур головного мозга

кластеров, каждый из которых содержит четыре элемента. Такой метод анализа фреймов МРТ позволяет проводить анализ физического состояния биотканей организма, в том числе и СГМ. При этом учитывают тот факт, что биофизические показатели любых биотканей обладают отличиями, которые и проявляются в разных значениях показателей, полученных в радиочастотном отклике на выделенном из четырех элементов фрагменте изображения объекта исследования.

Изображение, полученное по технологии МРТ, представляется цифровым массивом, созданным компьютером. При визуальном просмотре изображения пользуются термином «интенсивность отклика», иначе говоря, сигнала. С физической точки зрения этот термин устанавливает понятие интенсивности лучистого потока, который соотносится с яркостью свечения на экране монитора определенным типом живой биоткани. Яркие (более белые) ткани являются гиперинтенсивными, более темные — гипоинтенсивными. Данные термины, представленные в цифровом виде, можно рассматривать как численные показатели дисперсии.

В терминах биологической термодинамики дисперсия и энтропия обладают общим физическим понятием. Низкое значение дисперсии характеризует высокий уровень стабильности состояния системы, который соотносится с малым уровнем энергетического потенциала. Для такой системы характерно проявление низкого уровня активности рабочих процессов, которые могли бы изменить общее состояние. Эти представления в терминах биофизики позволяют декларировать наличие «малых интенсивностей отклика» на внешние воздействия. Обнаружение такого фрагмента на СГМ в МРТ-исследовании следует рассматривать как случай фиксации на нейронной структуре кластера низкого уровня энтропии. Такой случай вполне адекватно соотносится с реальным состоянием фрагмента нейронной структуры при наличии разрушений миелиновой оболочки.

Следуя этим представлениям, рассмотрим набор аналитических процедур для СГМ, реализуемых на цифровом массиве данных МРТ-исследования. Положим, что любой массив данных МРТ, созданный в цифровом формате, можно представить набором кластеров из четырех элементов, расположенных в квадрате с вершинами А, В, С, D. Формализм воспроизводимых суждений о физическом состоянии кластера в оценке дисперсии осуществляется на основе расчета показателя Q, вычисляемого по выражению (1). В физическом отношении показатель Q характеризует дисперсию упаковки элементов кластера, содержащего четыре элемента. Введенные

Таблица 1

| Расчетные значения дисперсии | | | | | |
|------------------------------|-------|---------------------------|-------|-------|---------------------------|
| Кластер а | | Показатель Q ₁ | | | Показатель Q ₂ |
| 182,3 | 154,2 | 562 | 128,5 | 95,3 | 942,88 |
| 115,3 | 135,3 | | 137,3 | 108,9 | |

понятия позволяют декларировать справедливость суждения, согласно которому меньшее значение дисперсии кластера характеризует меньшую интенсивность рабочих процессов выделенного фрагмента нейронной сети. В таком понимании меньшее значение дисперсии следует рассматривать как «деградацию нейронной ткани» выделенного фрагмента СГМ.

$$(AB \cdot CD + AD \cdot BC) - (AC \cdot BD) = Q \quad (1)$$

На практике использование метода Slick для анализа цифрового массива данных, полученных по результатам исследования СГМ по технологии МРТ, позволяет создавать лаконичные суждения с возможностью указания геометрических размеров выделенных фрагментов. Типичные, с точки зрения практической медицины, нарушения СГМ соотносят с рассеянным склерозом и болезнью Альцгеймера, которые хорошо обнаруживаются посредством исследований по технологии ядерного магнитного резонанса.

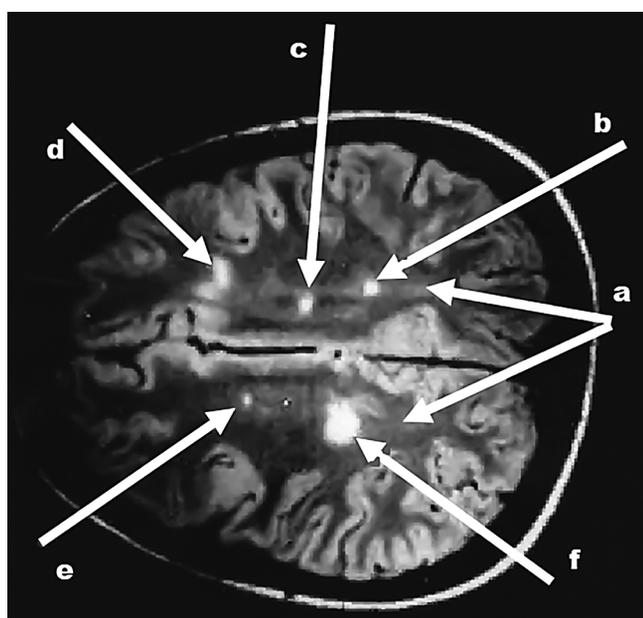


Рис. 2. Области интереса в структур головного мозга при рассеянном склерозе

Типичный фрейм СГМ, полученный с помощью технологии МРТ, демонстрирует возможность визуально выделить несколько областей (b, c, d, e, f) демиелинизации при рассеянном склерозе (рис. 2), а обширная область (a) характеризует нормальную СГМ. Выделенные области обладают разными размерами и дислокацией в СГМ.

Основы проявления заболеваний соотносят с нарушениями рабочих процессов СГМ и деменцией, разрушающей пространственные связи нейронной сети. Фактически деменция на нейронной сети инициализирует множественные пространственные нарушения группы нейронов (кластеров), ответственных за создание семантического набора суждений и поведенческих реакций организма.

Для выделенных областей СГМ воспроизведем цифровой набор кластеров (табл. 1), полученных по технологии МРТ (рис. 2). Используя выражение (1), воспроизведем расчетные значения показателя Q.

Область (a) нормального развития СГМ можно охарактеризовать двумя кластерами с соответствующими наборами показателей интенсивности, по которым вычисляется значение показателя Q (табл. 1.)

Рассматриваемый кластер (a) визуально выделен на двух фрагментах фрейма (рис. 2), где идентифицируется как Q_{1a} и Q_{2a} «норма» (табл. 1).

Таблица 2

| Расчетные значения дисперсии | | |
|------------------------------|------|---------------------------|
| Кластер b | | Показатель Q _b |
| 45,3 | 42,1 | 14,72 |
| 34,5 | 39,1 | |

Таблица 3

| Расчетные значения дисперсии | | |
|------------------------------|------|---------------------------|
| Кластер c | | Показатель Q _c |
| 28,9 | 30,1 | 7,8 |
| 45,9 | 39,4 | |

Таблица 4

Расчетные значения дисперсии

| Кластер d | | Показатель Q_d |
|-----------|------|------------------|
| 45,8 | 39,8 | 1,2 |
| 42,1 | 41,9 | |

Таблица 5

Расчетные значения дисперсии

| Кластер e | | Показатель Q_e |
|-----------|------|------------------|
| 12,9 | 15,3 | 6,24 |
| 11,2 | 13,8 | |

Таблица 6

Расчетные значения дисперсии

| Кластер f | | Показатель Q_f |
|-----------|-------|------------------|
| 156,9 | 154,2 | 18,63 |
| 132,8 | 125,9 | |

Область (b) соотносится с кластером, характеризующим по визуальной оценке наличие заболевания «рассеянный склероз» (табл. 2). Расчетный показатель (Q_b) этого кластера обладает отличием от показателей Q_{1a} Q_{2a} «норма».

Отметим, что полученные результаты (табл. 3–6) достаточно полно отражают существо процесса разрушения миелиновой оболочки нейронов в некоторых участках [3–5]. Действительно, по визуальной оценке расчетные показатели Q_1 и Q_2 на исходном изображении фрейма соотносятся с нормальной структурой нейронной ткани. Формализм такого суждения устанавливается на основе выражения (2), где Q_n и Q_n характеризуют патологическое и нормальное состояние нейронной сети, соответственно [6–8].

$$Q_n < (Q_1, Q_2) < Q_n \quad (2)$$

Там, где по визуальной оценке фрейма сохраняется естественный набор рабочих процессов, отчетливо воспроизводятся высокие показатели дисперсии — показателя Q_n . Факт совпадения результатов визуального и компьютерного анализа фрейма демонстрирует надежность полученных оценок. При этом возможность получения численных показателей для разных участков фрейма позволяет объективно выделить две группы нейронных структур: патологии. Низкий уровень Q_n соответствует норме, а для патологии отмечаются высокие значения показателя Q_n .

Столь простые правила вывода суждений о состоянии нейронной ткани СГМ позволяют проводить несколько повторных исследований, результаты которых будут отражать изменение биофизических свойств нейронов. Периодический мониторинг СГМ по технологии МРТ позволяет создавать адекватные прогнозы развития заболевания, что, в свою очередь, обеспечивает выбор оптимальных терапевтических мероприятий.

Действительно, наличие современных много численных фреймов, в частности, рассеянного склероза по материалам МРТ, указывает на наличие «нечетких» суждений, которые компилируются в терминах генетической восприимчивости, факторов внешней среды и психофизиологических расстройств [9]. Акцентируя внимание на биохимическом информационном канале сопряжения разных функциональных подсистем организма отчетливо проявляется ведущая роль нейротрансмиттеров, интенсивность рабочих процессов которых можно оценить дисперсией, порождающей возможность воспроизвести достоверные суждения о нарушениях в СГМ.

Следуя этим представлениям, констатируем, что для медицинской практики, оперирующей неполным набором понятий об этиологии нарушений СГМ представляется чрезвычайно важным обладать возможностью создавать количественные показатели функционального состояния нейронных структур, ответственных за жизнедеятельность организма.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of

the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огнев И. В. Ассоциативные память, среды, системы. М.; 2016.
2. Беар М. Нейронауки. Исследование мозга. М.: Диалектика; 2021.
3. Китаев В.М. Лучевая диагностика заболеваний головного мозга. М.: МЕДпресс-информ; 2022.
4. Савельев С.В. Атлас мозга человека. М.; 2022.
5. Броневиц А.Г. Нечеткие модели анализа данных и принятия решений. М.: Издательский Дом ВШЭ; 2022
6. Горбаченко В.И. Интеллектуальные системы: нечеткие системы и сети. М.: Юрайт; 2022.
7. Флегонтов А.В. Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных. М.: Лань; 2020.
8. Макаров Л.М., Поздняков А.В., Разинова А.А. и др. Морфометрический анализ структур головного мозга. Визуализация в медицине. 2021; 3(3).
9. Макаров Л.М. Поздняков А.В. Computer synthesis of neurotransmitter images. Proceedings of Telecommunication Universities. 2022; 8(2).

REFERENCES

1. Assotsiativnyye pamyat', sredy, sistemy. [Associative memory, environments, systems]. Moskva; 2016. (in Russian).
2. Bear M. Neyronauki. Issledovaniye mozga. [Brain research]. Moskva: Dialektika Publ.; 2021. (in Russian).
3. Kitayev V.M. Luchevaya diagnostika zabolevaniy golovnogo mozga. [Radiation diagnostics of brain diseases]. Moskva: MED-press-inform Publ.; 2022. (in Russian).
4. Savel'yev S.V. Atlas mozga cheloveka. [Atlas of the human brain]. Moskva; 2022. (in Russian).
5. Bronevich A.G. Nечetkiye modeli analiza dannykh i prinyatiya resheniy. [Fuzzy models of data analysis and decision making]. Moskva: Izdatel'skiy Dom VSHE; 2022. (in Russian).
6. Gorbachenko V.I. Intellektual'nyye sistemy: nechetkiye sistemy i seti. [Intelligent systems: fuzzy systems and networks]. Moskva: Yurayt Publ.; 2022. (in Russian).
7. Flegontov A.V. Modelirovaniye zadach prinyatiya resheniy pri nechetkikh iskhodnykh dannykh. [Modeling of decision-making problems with fuzzy initial data]. Moskva: Lan' Publ.; 2020. (in Russian).
8. Makarov L.M., Pozdnyakov A.V., Razinova A.A. i dr. Morfo-metricheskiy analiz struktur golovnogo mozga. [Morphometric analysis of brain structures]. Vizualizatsiya v meditsine. 2021; 3(3). (in Russian).
9. Makarov L.M. Pozdnyakov A.V. Computer synthesis of neurotransmitter images. Proceedings of Telecommunication Universities. 2022; 8(2). (in Russian).