

Открытые репозитории мультимодальных функциональных данных о работе головного мозга

Устинин М.Н. *, Рыкунов С.Д.**

Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, Пущино, Россия

Аннотация. Рассмотрены Интернет-ресурсы, предоставляющие свободный доступ к экспериментальным функциональным данным, включая данные электро- и магнитной энцефалографии, структурной и функциональной магнитно-резонансной томографии, полученным в ряде исследовательских проектов при изучении мозга человека. Использование таких ресурсов полезно для развития и отладки новых методов обработки и анализа энцефалограмм, а также для верификации и сравнения результатов.

Ключевые слова: *открытые наборы данных, магнитная энцефалография, электроэнцефалография, нейровизуализация*

ВВЕДЕНИЕ

Задача изучения функционирования головного мозга человека является одной из наиболее важных и сложных среди биомедицинских задач. На данный момент разработано множество методов исследования мозга, таких как электроэнцефалография (ЭЭГ), магнитная энцефалография (МЭГ), магнитно-резонансная томография (МРТ), функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ). Каждый из этих методов имеет некоторые специфические особенности, связанные с физическими принципами, на основе которых они построены и, таким образом, также обладает некоторыми ограничениями в применении. Эти методы можно разделить на два основных направления: функциональные и структурные.

Электроэнцефалография является наиболее распространённым и доступным функциональным методом. Она характеризуется достаточно высоким временным разрешением, но обладает низкой чувствительностью к сигналам, исходящим из глубоких структур головного мозга. Также стоит отметить относительно невысокую пространственную разрешающую способность. К преимуществам можно отнести широкую доступность и относительно низкую стоимость оборудования, а также невысокую стоимость обслуживания экспериментов.

Магнитно-резонансная томография относится к структурным методам и получила широкое распространение. Магнитно-резонансная томография хорошо подходит для изучения мягких тканей тела, в частности головного мозга человека. Благодаря контрастности между изображением серого и белого вещества мозга, магнитно-резонансная томография хорошо подходит для изучения таких явлений, как демиелинизация нервных волокон, цереброваскулярные болезни, инфекционные заболевания мозга и эпилепсия.

*ustinin@impb.ru

**rykunov@impb.ru

Функциональную магнитно-резонансную томографию можно отнести к «гибридным» методам — одновременно производятся структурные и функциональные измерения. В основе метода лежит изменение уровня насыщенности крови кислородом и изменение кровотока при активации той или иной зоны мозга. Особенностью экспериментов фМРТ является то, что в них изучается вызванная активность мозга, и для повышения точности измерения требуются многократные повторения заданий испытуемым. Типичное пространственное разрешение фМРТ составляет 3–4 мм, а временное 3–6 секунд [1].

Магнитная энцефалография на данный момент является наиболее точным из неинвазивных функциональных методов, направленных на детальное изучение работы головного мозга человека. Записи магнитных полей с высокой частотой дискретизации и сотнями каналов могут предоставить сведения о работе как коры, так и глубоких структур мозга. МЭГ характеризуется высоким уровнем чувствительности к слабым сигналам, высоким временным и пространственным разрешением. Существенным недостатком магнитной энцефалографии является высокая стоимость и малая распространенность оборудования, а также высокая стоимость обслуживания магнитометра.

Совместное использование данных, полученных с помощью нескольких взаимодополняющих методов визуализации, дает множество преимуществ по сравнению с анализом, основанным на использовании одного метода [2]. Совместное использование структурных МРТ и функциональных данных, например, МЭГ или ЭЭГ, дает возможность локализовать источники сигналов в соответствующие структуры головного мозга. Несмотря на ценность мультимодальной визуализации, ограниченный доступ к оборудованию или финансированию часто ограничивает объем отдельных исследований одним или двумя методами визуализации и небольшим количеством участников, что ограничивает интерпретируемость результатов. Благодаря крупномасштабному сотрудничеству и недавним инициативам по обмену данными появились крупномасштабные мультимодальные наборы данных, такие как OMEGA [3], Cam-CAN [4], WAND [5], MOUS [6], Набор данных Национального института психического здоровья США по исследованиям с участием добровольцев [7], Healthy Brain Network biobank [8]. Каждый из этих наборов данных предоставляет независимым исследователям уникальные комбинации данных и возможности для исследования.

АРХИВ КЕМБРИДЖСКОГО ЦЕНТРА ИССЛЕДОВАНИЯ СТАРЕНИЯ И НЕВРОЛОГИИ (SAMCAN)

Архив когортного исследования Кембриджского центра исследования старения и неврологии (Cam-CAN) представляет собой крупномасштабное (около 700 испытуемых), мультимодальное (МРТ — магнитно-резонансная томография, МЭГ — магнитная энцефалография, когнитивное исследование), перекрестное популяционное исследование механизмов когнитивного старения, охватывающее продолжительность жизни взрослого человека (18–87 лет). Этот набор данных включает необработанные и предварительно обработанные данные МРТ, МЭГ и когнитивно-поведенческие данные, а также демографические данные и другие показатели с перекрестными ссылками. Ключевым направлением проекта Cam-CAN является интегральный анализ во всех областях познания и измерения нейронной структуры, функций и взаимосвязей с целью понимания того, как нейрокогнитивные системы адаптируются для преодоления возрастных изменений. Несколько особенностей набора данных Cam-CAN делают его уникальным. Во-первых, опубликованная выборка получена из более крупной (приблизительно $N = 3000$), набранной из населения в целом с помощью списков доверия первичной медицинской помощи, которые могут быть связаны с

национальными данными, что позволяет количественно оценить предвзятость в выборке людей, желающих и способных пройти нейровизуализацию. Во-вторых, распределение возрастов было выбрано таким, чтобы оно было примерно равномерным, что обеспечивало достаточную статистическую мощность для проверки различий как внутри возрастных групп, так и между ними. В-третьих, исследования включали сбор широкого спектра поведенческих показателей из 14 экспериментов, охватывающих пять основных когнитивных областей (внимание, эмоции, действие, язык и память), которые также могут быть связаны со значительным объемом демографических данных, данных о здоровье и образе жизни. Наконец, данные включают в себя широкий спектр модальностей нейровизуализации: томографические изображения с высоким разрешением ($1 \times 1 \times 1 \text{ мм}^3$), взвешенные по T1 и T2, диффузионная МРТ (DWI), EPI-BOLD фМРТ зарегистрированные во время отдыха, сенсомоторной задачи и просмотра фильмов, а также данные МЭГ во время отдыха и при выполнении той же сенсомоторной задачи. Участники исследования (целевой показатель N = 700: 50 мужчин, 50 женщин из каждого возрастного десятилетия) были набраны для участия в тестировании в Отделе познания и наук о мозге Совета медицинских исследований (Великобритания) (MRC-CBSU) в Кембридже, Великобритания. Из-за проблем с набором испытуемых для самого молодого десятилетия (18–27 лет) только 56 (27 мужчин) прошли тестирование из этого десятилетия. На этом этапе структурные и функциональные МРТ-снимки, записи МЭГ и данные о когнитивных задачах были собраны в течение трех отдельных сеансов. Архив данных содержит данные МРТ, МЭГ и поведенческие данные 656 участников в возрасте от 18 до 87 лет. Все данные помечены уникальными идентификаторами. Методической командой Cam-CAN с помощью полуавтоматических скриптов был проведен первичный контроль качества данных.

Все наборы данных МРТ были собраны в одном месте (MRC-CBSU) с использованием томографа 3T Siemens TIM Trio с 32-канальной головной катушкой. Участники были просканированы за один часовой сеанс. Перед сканированием были проведены физиологические измерения и проведены два поведенческих эксперимента. В томографе использовались подушки из пены с эффектом памяти для комфорта и минимизации движений головы. Инструкции и визуальные стимулы для функциональных задач обратно проецировались на экран, просматриваемый через зеркало, установленное на головной катушке; слуховые стимулы предъявлялись через МР-совместимые этимотические наушники; а ручные ответы выполнялись правой рукой с помощью специально изготовленного кнопочного блока, совместимого с МРТ. Сердечные данные регистрировали с помощью фотоплетизмографа/пульсоксиметра на левом указательном пальце с частотой 50 Гц.

Все наборы данных МЭГ были собраны в одном месте (MRC-CBSU) с использованием 306-канальной системы VectorView MEG (Elekta Neuromag, Хельсинки), состоящей из 102 магнитометров и 204 ортогональных планарных градиентометров, расположенных в магнитно-экранированном помещении (MSR). Данные отбирались на частоте 1 кГц с фильтром верхних частот 0.03 Гц. Запись производилась в положении сидя. Положение головы в шлеме MEG непрерывно оценивалось с использованием четырех катушек индикатора положения головы (HPI), чтобы обеспечить автономную коррекцию движения головы. Две пары биполярных электродов использовались для записи сигналов вертикальной и горизонтальной электроокулограммы (VEOG, НЕОГ) для мониторинга морганий и движений глаз, а одна пара биполярных электродов записывала сигнал электрокардиограммы (ЭКГ) для мониторинга артефактов, связанных с пульсом. Инструкции и зрительные стимулы проецировались на экран через отверстие в передней стенке магнитно-экранированного помещения; слуховые стимулы предъявлялись через этимотические трубки; ответы

производились через специально изготовленную кнопочную коробку с оптоволоконными проводами. Данные МЭГ собирали в состоянии покоя, при выполнении сенсомоторной и аудиовизуальной (пассивной) задач. Во время записи в состоянии покоя участники неподвижно сидели с закрытыми глазами не менее 8 минут 40 секунд, чтобы соответствовать сканированию в состоянии покоя фМРТ. Во время записи сенсомоторной задачи участники выполняли ту же задачу, что и в версии фМРТ. В аудиовизуальном (пассивном) задании использовались те же стимулы, что и в сенсомоторном задании, но визуальные и слуховые стимулы предъявлялись изолированно, а не одновременно (чтобы облегчить разделение ответов МЭГ, вызванных каждой модальностью), и от участников не требовалось ответить. В этом задании было представлено 120 проб унимодальных стимулов (60 визуальных двусторонних шахматных досок, представленных одновременно, 60 слуховых тонов на одной из трех равновероятных частот) со скоростью примерно 1 в секунду.

Для доступа к архиву требуется регистрация на сайте проекта opendata.mrc-cbu.cam.ac.uk/projects/camcan/request/.

ОТКРЫТЫЙ МЭГ АРХИВ (OMEGA)

Открытый архив МЭГ (OMEGA) – это открытая нейронаучная инициатива, реализуемая Центром визуализации мозга Макконнелла (BIC) Монреальского неврологического института (MNI) при Университете Макгилла совместно с Университетом Монреаля. Целью проекта является создание централизованного хранилища для систематической организации МЭГ, структурной МРТ и электрофизиологических данных для открытого распространения. Большое внимание уделяется унификации данных, особенно в том, что касается сбора и обработки информации об участниках, параметров нейровизуализации и процедур контроля качества. В настоящее время это открытое хранилище состоит из обезличенных наборов данных, полученных в результате растущего числа исследований, проведенных обоими институтами-учредителями, в соответствии с предписанными этическими стандартами обмена данными этих исследований.

В настоящее время в базе OMEGA хранятся данные МЭГ в состоянии покоя и анатомические T1-взвешенные МРТ 644 (444 здоровых контрольных участника и 200 пациентов с такими заболеваниями как болезнь Паркинсона, синдром дефицита внимания и гиперактивность, хронические боли) участников в один или более моментов времени (всего 1800 сеансов). Основная демографическая информация, такая как возраст и пол, доступна для всех участников. Дополнительные анонимизированные демографические характеристики доступны в каждом отдельном исследовании. Все наборы данных МЭГ в базе OMEGA содержат как исходные данные сканирования, так и обработанные данные, которые прошли некоторую предварительную обработку в Brainstorm [9]. Для большинства испытуемых также доступны анатомические МРТ (модальность T1) в формате NIfTI. Записи МЭГ для каждого участника включают в себя двухминутные записи шумов в пустой комнате, серии записей в состоянии покоя продолжительностью не менее пяти минут каждая.

Данные МЭГ, полученные в Центре визуализации мозга и в Университете Монреаля, регистрируются с помощью идентичных энцефалографов STF MEG (VSM MedTech Inc., Канада), состоящих из 275 катушек аксиального градиентометра первого порядка и градиентной коррекции третьего порядка для устранения фоновых помех, с пассивным магнитным экранированием. Исходная информация и информация о форме головы, полученные с помощью 3D-оцифровки, а также информация о движении головы, собранная с помощью катушек для позиционирования головы, доступны для всех участников. Вместе со всеми наборами данных МЭГ доступны данные

электроокулографии (ЭОГ) и электрокардиографии (ЭКГ). Для определенной группы участников доступны данные электроэнцефалографии (ЭЭГ) с оцифрованным трехмерным расположением электродов.

Данные МРТ были собраны с помощью томографа SIEMENS Prisma 3T с использованием 32-канальной головной катушки. Полученные томограммы были преобразованы и обезличены с использованием программного комплекса Freesurfer [10]. Все МРТ приведены к унифицированному размеру $192 \times 256 \times 256$ вокселей, размер вокселя $1 \times 1 \times 1$ мм³. Совместная регистрация МЭГ и МРТ выполнялась в ручном режиме по оригинальным томограммам, оцифрованной информации о форме головы и расположении локализационных катушек.

Для доступа к архиву требуется регистрация на сайте проекта www.mcgill.ca/bic/omega-registration.

НАБОР ДАННЫХ УНИВЕРСИТЕТА НЕЙМЕГЕНА MOUS

Набор данных Университета Неймегена, известный под названием MOUS (MOther of Unification Studies), содержит мультимодальные данные нейровизуализации, полученные от 204 здоровых испытуемых. Этот набор данных посвящен нейровизуализации языка.

Протокол нейровизуализации состоял из магнитно-резонансной томографии (МРТ) для получения информации с высоким пространственным разрешением об анатомии мозга и структурных связях, а также функциональных данных во время выполнения заданий и в состоянии покоя. Кроме того, магнитная энцефалография (МЭГ) использовалась для получения электрофизиологических измерений с высоким временным разрешением во время выполнения заданий и в состоянии покоя.

В исследование было включено 204 носителя голландского языка (100 мужчин) со средним возрастом 22 года (диапазон: от 18 до 33 лет). В рамках процедуры информированного согласия они дали явное согласие на использование анонимизированных данных, собранных в ходе исследования, другими исследователями в научных целях. Испытуемые принимали участие как в фМРТ, так и в МЭГ-части исследования, сбалансированным образом. Каждый участник выполнял задание в визуальной или слуховой модальности. Все участники были правшами, имели нормальное или скорректированное до нормального зрение и не сообщали о наличии в анамнезе неврологических, развивающихся или языковых нарушений. Исследование было одобрено местным комитетом по этике (СМО – местный «Комитет по исследованиям с участием людей» в регионе Арнем–Неймеген) и проводилось в соответствии с руководящими принципами Хельсинкской декларации.

Общий набор стимулов состоял из 360 предложений на голландском языке и их перемешанных списков слов. Предложения были двух типов: 180 предложений содержали относительное предложение (RC+), чтобы создать более сложную синтаксическую структуру. Остальные 180 предложений состояли из главного предложения и простого придаточного предложения (RC–), чтобы создать более простую структуру. Списки слов были созданы путем перемешивания слов из предложений таким образом, чтобы три или более последовательных слова не образовывали связный фрагмент. Каждому испытуемому был представлен поднабор из 180 стимулов-предложений и 180 стимулов-списков слов, при этом мы следили за тем, чтобы испытуемые не видели соответствующий список слов для данного предложения. Во время МЭГ-части эксперимента испытуемым было представлено 120 предложений и 120 списков слов, а во время фМРТ-части эксперимента – 60 предложений и 60 списков слов. Для всех испытуемых все стимулы были представлены одинаковое количество раз в условиях предложений и списков слов.

В каждой сессии (фМРТ и МЭГ) записи в состоянии покоя предшествовали языковой задаче. В MEG испытуемым было предложено не думать ни о чем конкретном, сосредоточившись на кресте в центре экрана в течение 5 минут. Крест был представлен в том же формате, что и в визуальном задании (предложение/список слов). В фМРТ испытуемым также было предложено не думать ни о чем конкретном и не засыпать, держа глаза закрытыми в течение 7 минут.

Магнитоэнцефалографические данные собирались с помощью 275-канального осевого градиентометра системы (СТФ). Сигналы оцифровывались с частотой дискретизации 1200 Гц (частота среза аналогового антиалиасингового фильтра низких частот составляла 300 Гц). Три локализационные катушки были прикреплены к голове испытуемого (на носу, левом и правом ушных каналах) для определения положения головы относительно датчиков МЭГ. На протяжении всего измерения положение головы постоянно контролировалось. Во время перерывов испытуемому было поручено изменить положение и скорректировать небольшие смещения головы, если это было необходимо, и поэтому он, как правило, мог поддерживать положение головы в пределах 5 мм от исходного положения в течение всей сессии. Три пары биполярных электродов Ag/AgCl использовались для измерения горизонтальной и вертикальной электроокулограммы и электрокардиограммы. В записях, где присутствовали слуховые стимулы, аудиосигналы записывались вместе с данными МЭГ с помощью канала АЦП, который синхронно с каналами МЭГ осуществлял выборку с частотой 1200 Гц. Запись пустой комнаты не включалась в протокол измерения МЭГ. Таким образом, для оценки пространственной структуры шума рекомендуется оценивать ее (при необходимости) с помощью независимого компонентного анализа для данных в состоянии покоя или с помощью четко определенной базовой линии в данных задачи.

Данные МРТ были собраны с помощью томографа SIEMENS Trio 3T с использованием 32-канальной головной катушки. Порядок регистрации различных модальностей МРТ был следующим: 1) фМРТ в состоянии покоя, 2) фМРТ на основе заданий, пауза, 3) структурное изображение, 4) диффузионно-взвешенная визуализация. Для всех испытуемых также были получены данные МР-спектроскопии, данные о поведении и генетические данные, но они не входят в опубликованный набор данных.

Для получения структурных изображений использовалась импульсная последовательность T1-взвешенного магнитно-подготовленного быстрого градиентного эха (MP-RAGE) со следующими параметрами: объем TR = 2300 мс, TE = 3.03 мс, угол поворота 8 градусов, 1 пластина, размер матрицы среза = 256 × 256, толщина среза = 1 мм, поле зрения = 256 мм, изотропный размер вокселя = 1.0 × 1.0 × 1.0 мм. Капсула витамина E была помещена в качестве ориентира за правым ухом, чтобы обеспечить визуальную идентификацию соответствия левой и правой сторон.

Процедура совместной регистрации МЭГ и МРТ проводилась следующим образом. В данных МЭГ расположение датчиков MEG определяется относительно головы испытуемого, где конкретная система координат испытуемого определяется на основе набора анатомических ориентиров на поверхности головы (назион, левая и правая преаурикулярные точки). Эта система координат была совместно зарегистрирована с индивидуальными анатомическими изображениями с использованием инструментария FieldTrip [11]. В начале каждой сессии МЭГ с помощью сканера Polhemus 3D-Space Fastrak регистрировалась оцифрованная поверхность головы, состоящая из набора координат $x/y/z$ на коже головы.

Для доступа к архиву требуется регистрация на сайте проекта data.ru.nl/collections/di/dccn/DSC_3011020.09_236?0.

НАБОР ДАННЫХ НАЦИОНАЛЬНОГО ИНСТИТУТА ПСИХИЧЕСКОГО ЗДОРОВЬЯ ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ С УЧАСТИЕМ ДОБРОВОЛЬЦЕВ

Комплексный набор данных Национального института психического здоровья (Бетезда, Мэриленд, США) содержит структурные и функциональные магнитно-резонансные томограммы (МРТ и фМРТ), данные диффузионной тензорной томографии (DTI) и магнитной энцефалографии (МЭГ). В нейровизуализационных исследованиях приняли участие 251 здоровый доброволец в возрасте от 20 до 64 лет. Этот набор данных является беспрецедентным по глубине характеристики здорового населения и позволит проводить широкий спектр исследований в области нормального когнитивного функционирования и регуляции настроения.

Структурные МРТ получены на томографе GE DISCOVERY MR750 с использованием 32-канальной головной катушки. Полученные томограммы были преобразованы и обезличены с использованием программного комплекса AFNI. Все МРТ приведены к унифицированному размеру $244 \times 256 \times 256$ вокселей, размер вокселя $1 \times 1 \times 1$ мм³. Во время того же визита, что и структурное МРТ-сканирование, участникам предлагалось выполнить набор задач из NIH Toolbox Cognition Battery. Четыре задачи оценивают внимание и исполнительные функции (задача по ингибированию фланкеров и вниманию), исполнительные функции (задача по сортировке карт с изменением размеров), эпизодическую память (задача по запоминанию последовательности картинок) и рабочую память (задача по сортировке списков).

Исследования МЭГ проводятся на 275-канальной системе STF MEG. Положение головы локализовалось в начале и в конце записи с помощью трех опорных катушек. Эти катушки были размещены на 1.5 см выше носа и у каждого уха, на расстоянии 1.5 см от мочки уха на линии между мочкой уха и внешним углом глаза. Для некоторых участников были сделаны фотографии трех катушек, которые использовались для маркировки точек на T1-взвешенном структурном МРТ-скане для совместной регистрации. Для остальных участников непосредственно перед сбором данных МЭГ использовался нейронавигационный блок BrainSight для совместной регистрации МРТ, анатомических опорных точек и локализационных катушек.

Для доступа к архиву требуется регистрация на сайте проекта openneuro.org/datasets/ds005752/versions/2.1.0

УЭЛЬСКАЯ БАЗА ДАННЫХ ПО ПЕРЕДОВЫМ МЕТОДАМ НЕЙРОВИЗУАЛИЗАЦИИ (WAND)

Уэльская база данных по передовым методам нейровизуализации (WAND) содержит полученные от 170 здоровых взрослых добровольцев (в возрасте от 18 до 63 лет) неинвазивные данные о мозге *in vivo*, включая данные магнитно-резонансной томографии (МРТ) с магнитным полем 3 Тесла (3 Т), структурную и функциональную МРТ и ядерную магнитно-резонансную спектроскопию при 3 Т и 7 Т, данные магнитной энцефалографии (МЭГ) и данные транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС). WAND является открытым для доступа и предоставляет гибкие возможности загрузки. Данные организованы с использованием структуры данных визуализации мозга (BIDS) и сопровождаются хорошо документированным репозиторием git, а также отчетами о качестве для нескольких модальностей. Здоровые добровольцы были набраны в Кардиффе, Уэльс, Великобритания, и прилегающих районах в период с февраля 2019 года по май 2023 года. В общей сложности 717 человек прошли отбор на соответствие критериям, из которых 178 (108 женщин) были включены в исследование, а 170 прошли по крайней мере одно сканирование. Все участники были в возрасте от 18 до 63 лет (средний возраст 25 лет). Этническая принадлежность была указана

участниками исследования самостоятельно, а затем классифицирована с использованием классификации переписи населения Великобритании 2021 года, как сообщается Управлением национальной статистики. Этническое распределение выборки WAND соответствовало населению Уэльса (где были собраны данные), хотя с более высокой долей этнических меньшинств: 79.2 % белых (против 93.8 % по данным переписи 2021 года); 12.9 % азиатов (против 2.9 % по данным переписи 2021 года); 4.5 % чернокожих (против 0.9 % по данным переписи 2021 года); 2.2 % смешанных или нескольких этнических групп (против 1.6 % по данным переписи 2021 года); и 1.1 % прочих (против 0.9 % по данным переписи 2021 года).

Исследование МЭГ проводилось на 275-канальной системе STF MEG. Дополнительные 29 опорных каналов регистрировались для подавления шума, а основные датчики анализировались как синтетические градиентометры третьего порядка. Оцифровка головы была выполнена до входа участника в магнитно-экранированную комнату с использованием системы оцифровки Polhemus. Запись МЭГ проводилась до любой МРТ, чтобы избежать остаточной намагниченности тканей после воздействия магнитных полей МРТ-сканеров. Испытуемые сидели в вертикальном положении в магнитно-экранированной комнате с головой, поддерживаемой подбородником, чтобы свести к минимуму движения. Были получены следующие дополнительные записи: горизонтальные и вертикальные электроокулограммы (ЭОГ, для мониторинга морганий и движений глаз), двусторонняя электрокардиограмма запястья (ЭКГ), электромиография правого указательного пальца (ЭМГ; для моторной задачи). Заземляющие и опорные электроды были размещены на противоположных локтях. МЭГ регистрировалась во время выполнения следующих заданий: (1) 10-минутная запись в состоянии покоя, (2) визуальная гамма-задача, (3) когнитивная задача Саймона, (4) слуховая/пальцевая задача и (5) задача на несоответствие негативности (MMN).

Данные диффузионной и количественной МРТ были получены с помощью томографа Connectom 3 T с ультрасильным градиентом магнитного поля (300 мТ/м), модифицированного из 3T Magnetom Skyra (Siemens Healthcare, Эрланген, Германия), и 32-канальной приемной катушки для головы (того же производителя). Данные диффузии и количественной МРТ были получены с помощью ультрасильного магнитного градиента (300 мТ/м) 3-теславого МРТ-сканера Connectom, модифицированного из 3-теславого Magnetom Skyra (Siemens Healthcare, Эрланген, Германия), и 32-канальной головной катушки только для приема (того же производителя). Анатомические данные с T1-взвешиванием были получены с помощью последовательности Magnetization Prepared Rapid Gradient Echo (MPRAGE) с радиочастотным импульсом подготовки 180° с временем повторения (TR) 2300 мс, временем эха (TE) 2 мс, углом поворота 9° , полем зрения (FOV) $256 \times 256 \times 192$ мм³, размер вокселя $1 \times 1 \times 1$ мм³, время инверсии (TI) 857 мс, 2-кратный недобор в плоскости и направление фазового кодирования от передней к задней части (A>>P).

Для доступа к архиву требуется регистрация на сайте проекта gin.g-node.org/CUBRIC/WAND

БАЗА ПРОЕКТА HEALTHY BRAIN NETWORK

Healthy Brain Network – это большое исследование, запущенное Child Mind Institute с целью сбора биомедицинских данных 10000 участников в возрасте от 5 до 22 лет. База содержит данные о психиатрических, поведенческих, когнитивных и связанных с образом жизни особенностях, а также мультимодальные изображения мозга (фМРТ в состоянии покоя, диффузионная МРТ, структурная МРТ), электроэнцефалограммы, голосовые и видеозаписи.

Исследование проводилось в три этапа. На первом этапе проводилось тестирование 500 первых участников для создания прототипа диагностического исследовательского центра HBN, расположенного в Стэйтен-Айленде (штат Нью-Йорк). Целью было установление всех рабочих процессов и стратегий/процедур проекта для набора участников, диагностических оценок, фенотипических оценок и сети направлений (т. е. медицинских учреждений, в которые участники могут быть направлены в случае выявления клинически значимых проблем). Первоначальный протокол включал диагностические оценки, фенотипические оценки, ЭЭГ и МРТ. Также оценивалась целесообразность и преимущества использования мобильного МРТ-сканера и мобильного диагностического исследовательского центра. Второй этап проекта проводился с участием следующих 500 участников и имел две основные цели: добавление новых и/или удаление протоколов, полученных на первом этапе, на основе полученного опыта и новых разработок; и доработка усовершенствованных протоколов, для обеспечения их максимальной оптимальности и надежности, а также отражения современного состояния науки и практики. Опираясь на опыт и уроки, извлеченные из первых двух этапов, проект Healthy Brain Network находится сейчас на третьем этапе развития, имеющем целью привлечь 7500 участников к установленному протоколу.

Для каждого участника были зарегистрированы данные ЭЭГ и отслеживания движения глаз во время проведения тестирования, разработанного для изучения внимания, восприятия, тормозного контроля и принятия решений. Данные ЭЭГ высокой плотности регистрировались в звукоизолированной комнате с частотой дискретизации 500 Гц и полосой пропускания от 0.1 до 100 Гц с использованием 128-канального электроэнцефалографа компании Electrical Geodesics Inc. (EGI). Опорная точка регистрации находится в Cz (вершина головы). Для каждого участника измерялась окружность головы и выбиралась ЭЭГ-сетка подходящего размера. Отслеживание движения глаз. Во время записи ЭЭГ положение глаз и расширение зрачков регистрировалось с помощью инфракрасного видео-трекера (iView-X Red-m, SensoMotoric Instruments [SMI] GmbH) с частотой дискретизации 120 Гц. Эта система имеет пространственное разрешение 0.1° и точность определения положения взгляда 0.5° . Перед каждой исследуемой парадигмой трекер калибровался с помощью 5-точечной сетки.

Регистрация МРТ в начале работы проводилась на передвижном томографе 1.5 T Siemens Avanto, оснащенной градиентами 45 мТ/м, установленной в мобильном трейлере (Medical Coaches, Онеонта, Нью-Йорк). Система была модернизирована с помощью 32 каналов приема RF, 32-канальной головной катушки Siemens и последовательности одновременной многослойной эхо-планарной визуализации Центра магнитно-резонансных исследований (CMRR) Университета Миннесоты 31. Томографическое исследование включало фМРТ в состоянии покоя, диффузионную куртозную томографию (DKI), структурную МРТ (T1, T2-пространство), томографию с переносом магнитной индукции, количественное картирование T1 и T2 (DESPOT T1/T2) и томографию висцерального жира (T1W). В настоящее время для регистрации томограмм используется МРТ-сканер Siemens 3 T Tim Trio, расположенный в Центре визуализации мозга Университета Рутгерса (RUBIC). Система оснащена 32-канальной головной катушкой Siemens и последовательностью одновременной многослойной эхо-планарной визуализации CMRR.

Для доступа к архиву требуется регистрация на сайте проекта https://fcon_1000.projects.nitrc.org/indi/cmi_healthy_brain_network/MRI_EEG.html. На текущий момент опубликовано 3155 наборов ЭЭГ и 2611 МРТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены открытые репозитории мультимодальных данных нейровизуализации, полученных на более чем 4000 испытуемых. Использование таких ресурсов полезно для развития и отладки новых методов обработки и анализа энцефалограмм, а также для верификации и сравнения результатов.

Так, в работе [12] с использованием данных OMEGA был предложен метод разделения экспериментальных данных магнитной энцефалографии на две синтетические энцефалограммы: одну, происходящую из мозга, вторую, происходящую из немозговых физиологических источников. Этот метод дает возможность более четко отличать магнитную энцефалограмму от физиологических шумов. Также становится возможным более детальное изучение физиологических электрических источников в голове, включая области, не относящиеся к мозгу (например, глотку), и области мозга, содержащие некоторые мощные источники, модулируемые сердцебиением и, возможно, расположенные вблизи кровеносных сосудов. В работах [13, 14], по данным из OMEGA, исследовались особенности магнитных энцефалограмм пациентов с синдромом дефицита внимания и гиперактивности. По данным функциональной томографии [15] были детально исследованы особенности пространственных распределений спектральных компонент магнитных энцефалограмм. В норме альфа-ритм генерируется в затылочной и теменной части мозга, но в исследованных данных пациентов с СДВГ наблюдалось заметное усиление спектральной мощности альфа-ритма в лобных долях обоих полушарий. Также были обнаружены отклонения от нормы в пространственной локализации источников бета-ритма. Анализ матриц корреляций между основными компартментами головного мозга позволил сделать следующие выводы: корреляции в диапазонах частот тета и альфа в несколько раз превышают корреляции в диапазонах бета и гамма. У обоих субъектов наблюдалась сильная асимметрия связей в полосе частот альфа-ритма, у одного – правосторонняя, у другого – левосторонняя.

В работе [16] по данным архива Cam-CAN проведено исследование возрастных изменений в основных ритмах мозга (1–4 Гц - дельта; 4–8 Гц- тета; 8–13 Гц - альфа; 13–21 Гц - бета-1; 21–30 Гц - бета-2; 30–48 Гц - гамма). Было обнаружено, что спектральная мощность дельта-ритма значительно уменьшается (p -значение 0.002), а бета-1 и гамма значительно увеличиваются (p -значения 0.001 и 0.003). Электрическая мощность дельта-ритма значительно уменьшается (p -значение 0.033), в то время как электрическая мощность в полосе частот бета-1 значительно увеличивается (p -значение 0.001). Кроме того, суммарная электрическая мощность тета-, альфа-, бета-1, бета-2 и гамма-ритмов значительно увеличивается (p -значение 0.024).

Работа выполнена при поддержке Московского центра фундаментальной и прикладной математики, Соглашение с Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2025-346

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glover G.H. Overview of functional magnetic resonance imaging. *Neurosurg. Clin. N. Am.* 2011. V. 22. P. 133–139. doi: [10.1016/j.nec.2010.11.001](https://doi.org/10.1016/j.nec.2010.11.001)
2. Uludağ K., Roebroeck A. General overview on the merits of multimodal neuroimaging data fusion. *Neuroimage*. 2014. P. 3–10. doi: [10.1016/j.neuroimage.2014.05.018](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.05.018)

3. Niso G., Rogers C., Moreau J.T., Chen L.Y., Madjar C., Das S., Bock E., Tadel F., Evans A.C., Jolicoeur P. et al. OMEGA: The Open MEG Archive. *Neuroimage*. 2015. V. 124. P. 1182–1187. doi: [10.1016/j.neuroimage.2015.04.028](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.04.028)
4. Shafto M.A., Tyler L.K., Dixon M., Taylor J.R., Rowe J.B., Cusack R., Calder A.J., Marsen-Wilson W.D., Duncan J., Dalgleish T. et al., Cam-CAN. The Cambridge Centre for Ageing and Neuroscience (Cam-CAN) study protocol: A cross-sectional, lifespan, multidisciplinary examination of healthy cognitive ageing. *BMC Neurology*. 2014. V. 14. Article No. 204. doi: [10.1186/s12883-014-0204-1](https://doi.org/10.1186/s12883-014-0204-1)
5. McNabb C.B., Driver I.D., Hyde V., Hughes G., Chandler H.L., Thomas H., Allen C., Messaritaki E., Hodgetts C.J., Hedge C. et al. WAND: A multi-modal dataset integrating advanced MRI, MEG, and TMS for multi-scale brain analysis. *Sci. Data*. 2025. V. 12, Article No. 220. doi: [10.1038/s41597-024-04154-7](https://doi.org/10.1038/s41597-024-04154-7)
6. Schoffelen J.M., Oostenveld R., Lam N.H.L., Uddén J., Hultén A., Hagoort P. A 204-subject multimodal neuroimaging dataset to study language processing. *Sci. Data*. 2019. V. 6. Article No. 17. doi: [10.1038/s41597-019-0020-y](https://doi.org/10.1038/s41597-019-0020-y)
7. Nugent A.C., Thomas A.G., Mahoney M., Gibbons A., Smith J.T., Charles A.J., Shaw J.S., Stout J.D., Namyst A.M., Basavaraj A. et al. The NIMH intramural healthy volunteer dataset: A comprehensive MEG, MRI, and behavioral resource. *Sci. Data*. 2022. V. 9. Article No. 518. doi: [10.1038/s41597-022-01623-9](https://doi.org/10.1038/s41597-022-01623-9)
8. Alexander L.M., Escalera J., Ai L., Andreotti C., Febre K., Mangone A., Vega-Potler N., Langer N., Alexander A., Kovacs M. et al. An open resource for transdiagnostic research in pediatric mental health and learning disorders. *Sci. Data*. 2017. V. 4. Article No. 170181. doi: [10.1038/sdata.2017.181](https://doi.org/10.1038/sdata.2017.181)
9. Tadel F., Baillet S., Mosher J.C., Pantazis D., Leahy R.M., Brainstorm: A User-Friendly Application for MEG/EEG Analysis. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2011. Article No. 879716. doi: [10.1155/2011/879716](https://doi.org/10.1155/2011/879716)
10. Fischl B. FreeSurfer. *Neuroimage*. 2012. V. 62. P. 774–781. doi: [10.1016/j.neuroimage.2012.01.021](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.01.021)
11. Oostenveld R., Fries P., Maris E., Schoffelen J.-M., FieldTrip: Open Source Software for Advanced Analysis of MEG, EEG, and Invasive Electrophysiological Data. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2011. V. 1. Article No. 156869. doi: [10.1155/2011/156869](https://doi.org/10.1155/2011/156869)
12. Llinás R.R., Rykunov S., Walton K.D., Boyko A., Ustinin M. Splitting of the magnetic encephalogram into «brain» and «non-brain» physiological signals based on the joint analysis of frequency-pattern functional tomograms and magnetic resonance images. *Front. Neural Circuits*. 2022. V. 16. Article No. 834434. doi: [10.3389/fncir.2022.834434](https://doi.org/10.3389/fncir.2022.834434)
13. Устинин М.Н., Рыкунов С.Д., Бойко А.И., Маслова О.А., Панкратова Н.М. Изучение синдрома дефицита внимания и гиперактивности методом функциональной томографии по данным магнитной энцефалографии. *Математическая биология и биоинформатика*. 2019. Т. 14. № 2 С. 517–532. doi: [10.17537/2019.14.517](https://doi.org/10.17537/2019.14.517)
14. Устинин М.Н., Рыкунов С.Д., Бойко А.И. Корреляция между компартаментами мозга при синдроме дефицита внимания и гиперактивности, рассчитанная методом виртуальных электродов по данным магнитной энцефалографии. *Математическая биология и биоинформатика*. 2020. Т. 15. № 2. С. 471–486. doi: [10.17537/2020.15.471](https://doi.org/10.17537/2020.15.471)
15. Llinás R.R., Ustinin M.N. Frequency-pattern functional tomography of magnetoencephalography data allows new approach to the study of human brain

- organization. *Front. Neural Circuits*. 2014. V. 8. Article No. 43. doi: [10.3389/fncir.2014.00043](https://doi.org/10.3389/fncir.2014.00043)
16. Ustinin M., Boyko A., Rykunov S. Healthy aging changes in conventional frequency bands of neuroelectric brain activity reconstructed from resting-state MEG. *Geroscience*. 2025. V. 47. P. 4093–4108. doi: [10.1007/s11357-025-01522-y](https://doi.org/10.1007/s11357-025-01522-y)

Рукопись поступила в редакцию 03.12.2025, переработанный вариант поступил 23.01.2026.
Дата опубликования 13.02.2026.

=====
===== INFORMATION AND COMPUTER =====
===== TECHNOLOGIES IN BIOLOGY AND MEDICINE =====

Open Repositories of Multimodal Functional Brain Data

Ustinin M.N., Rykunov S.D.

*Institute of Mathematical Problems of Biology RAS, Keldysh Institute of Applied Mathematics
of Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia*

Abstract. Internet resources providing an open access to experimental functional brain data, including electric and magnetic encephalography, structural and functional MRI data obtained in a number of research projects studying the human brain are reviewed. The usage of such resources is beneficial for the development and adjustment of new methods for processing and analyzing encephalograms, as well as for verifying and comparing results.

Key words: *open datasets, magnetic encephalography, electric encephalography, neuroimaging*