

КЛАДОВАЯ ГИПСР

Библиотека учебных работ

ДОКЛАД

**Проект «Коннектом», его особенности и
перспективы**

Дисциплина: Анатомия центральной нервной системы

Авторская работа редакции Кладовой ГИПСР

Санкт-Петербург

2026

Введение

Описание нервной системы традиционно начинается с её отделов, клеток и проводящих путей. Однако знание перечня элементов ещё не объясняет, как они совместно обеспечивают восприятие и поведение. Между анатомической формой отдельного нейрона и деятельностью человека существует уровень организации связей. Именно его изучает коннектомика: она рассматривает нервную систему как сеть взаимодействующих элементов.

Цель доклада — раскрыть идею коннектома, сопоставить основные методы его исследования и оценить результаты и перспективы крупных проектов. Для этого необходимо различить масштаб описания, способ получения данных и допустимые выводы. Рассматриваются Human Connectome Project, реконструкция фрагмента человеческой коры H01, проект MICrONS и карта мозга взрослой дрозофилы FlyWire. Под названием «Коннектом» здесь понимается исследовательское направление и семейство проектов, а не единственный завершённый атлас всех связей человеческого мозга.

Основная мысль доклада состоит в следующем: картирование связей даёт необходимую основу для изучения работы нервной системы, но карта структуры не равна объяснению её функций. Практическая ценность данных определяется тем, насколько точно исследователь понимает, что именно измерено, какие связи реконструированы и где заканчиваются возможности выбранного метода.

1. Что называют коннектомом

В программной статье О. Спорнса, Дж. Тонони и Р. Кёттера коннектом был предложен как структурное описание элементов нервной системы и связей между ними [1]. Такую сеть можно представить графом: узлы соответствуют выбранным элементам, рёбра — установленным или оценённым связям. При этом выбор узла зависит от масштаба. Им может быть отдельный нейрон или крупная область мозга. Поэтому две карты

одного объекта могут выглядеть по-разному и отвечать на разные вопросы, оставаясь корректными в пределах своего уровня описания.

На микроскопическом уровне исследователь стремится различить клетки, их отростки и синаптические контакты. На макроскопическом уровне задача состоит в описании связей между участками мозга. Переход между этими уровнями не сводится к увеличению изображения: меняются методы измерения, объём доступных данных и смысл элемента сети. Линия между двумя областями на томографической карте не означает, что исследователь увидел каждый соединяющий их аксон.

Из этого следует важное правило чтения научных сообщений: слово «полный» имеет смысл только вместе с указанием объекта и масштаба. Полная реконструкция определённого фрагмента ткани не становится полной реконструкцией органа. Карта мозга одной особи также не является исчерпывающим описанием индивидуальной изменчивости вида. В докладе полнота рассматривается как характеристика конкретного набора данных, а не как универсальная оценка достигнутого знания.

2. Структурная и функциональная связность

Структурная связность относится к анатомической организации соединений. Функциональная связность описывает статистическую согласованность сигналов активности. Эти характеристики связаны, но не тождественны. В рамках Human Connectome Project они исследуются совместно с использованием нескольких методов нейровизуализации [2; 3]. Сопоставление разных измерений позволяет уточнять интерпретацию, однако не устраняет различий между ними.

Функциональную связь нельзя автоматически считать прямым анатомическим соединением. Если два сигнала изменяются согласованно, возможны разные объяснения: прямое взаимодействие, влияние через промежуточные элементы или воздействие общего источника. Само значение статистической связи не выбирает одно из этих объяснений. Поэтому

исследователь должен отделять описание наблюдаемой согласованности от утверждения о причинном механизме.

Для пояснения можно использовать условную аналогию с транспортной сетью. Схема дорог показывает, где движение возможно, а измерения потока — где оно происходило в определённый период. Наличие дороги не сообщает обо всех поездках, а совпадение интенсивности движения в двух районах ещё не доказывает прямого сообщения между ними. Аналогия ограничена: нейроны не являются автомобилями, а синапсы не сводятся к постоянным дорогам. Её задача — подчеркнуть различие между возможностью взаимодействия и конкретным состоянием системы.

В контексте психологии это различие защищает от поспешных выводов. Обнаруженная связь между сетевым показателем и результатом задания ещё не превращает показатель в причину способности, характеристику личности или индивидуальный диагноз. Для перехода к таким утверждениям необходимы отдельная постановка исследования, проверка альтернативных объяснений и воспроизведение результата.

3. Как получают карты связей

Human Connectome Project использует структурную МРТ, диффузионную МРТ и функциональную МРТ, дополняя нейровизуализацию поведенческими измерениями [2; 3]. Диффузионная МРТ регистрирует особенности движения воды в ткани; на этой основе строят модели направлений волокон. Функциональная МРТ отражает изменения сигнала, связанные с гемодинамическим ответом, а не прямую запись каждого нервного импульса. Эти методы позволяют исследовать живых людей, но имеют ограничения пространственного и временного разрешения.

Электронная микроскопия решает другую задачу. Последовательные изображения подготовленной ткани используются для восстановления клеточных отростков и контактов. Работа включает получение изображений, совмещение срезов, автоматическую сегментацию и проверку

реконструкции. На примере H01 видно, что небольшой объём ткани может требовать огромного массива изображений и вычислений [4]. Высокая детализация достигается ценой сложной подготовки и не означает возможности наблюдать таким способом работу всего живого человеческого мозга.

Методы не следует ранжировать по единой шкале «лучше — хуже». Если вопрос касается различий сетевой организации между людьми, необходима соответствующая выборка и возможность сопоставления. Если исследуется конкретная микросхема контактов, требуется клеточная детализация. Выбор метода должен следовать за вопросом. Иначе технически впечатляющее изображение рискует заменить научную задачу, оставаясь лишь иллюстрацией.

При чтении карты полезно последовательно выяснять: что является узлом сети, что считается связью, какие данные лежат в основе реконструкции и как оценивалась ошибка. Например, неверное объединение двух отростков может создать ложный маршрут на микроскопической карте. На макроуровне результат зависит от выделения областей и процедуры обработки сигналов. Поэтому воспроизводимость требует не только публикации красивой схемы, но и описания последовательности анализа.

4. От Human Connectome Project к современным реконструкциям

Human Connectome Project стал крупной программой исследования макроскопической организации человеческого мозга. В обзоре консорциума WU-Minn описан проект сбора мультимодальных данных у 1200 здоровых молодых взрослых, включая близнецов и их братьев и сестёр [2]. Программа связывает измерения структуры, функций и поведения и делает наборы данных доступными исследовательскому сообществу. Её результат следует понимать как инфраструктуру для изучения человеческих сетей и их изменчивости, а не как перечень всех синапсов человека.

В работе A. Shapson-Coe и соавторов 2024 года представлен набор H01: реконструкция небольшого фрагмента человеческой коры с наноскопической детализацией. В публикации сообщается примерно о 57 тысячах клеток и 150 миллионах синапсов; объём данных составляет около 1,4 петабайта [4]. Эти числа характеризуют конкретный образец. Их нельзя механически переносить на весь мозг или трактовать как измерения универсального «среднего человека».

MICrONS соединяет информацию об активности клеток с последующей детальной реконструкцией связей в части зрительной коры мыши. Основная публикация 2025 года описывает функциональную коннектомику нескольких зрительных областей [5]. Особенность проекта заключается в возможности сопоставлять ответы на стимулы с устройством клеточных соединений в одном исследовательском контексте. Это важный шаг к проверке связи структуры и функции, однако данные мышью зрительной коры не являются прямой моделью всех психологических процессов человека.

FlyWire показывает иной масштаб достижимой полноты: в 2024 году опубликована схема связей мозга взрослой самки *Drosophila melanogaster*. Реконструкция включает 139 255 нейронов и десятки миллионов химических синапсов [6]. Ценность результата связана с возможностью проследить пути в пределах целого мозга выбранного модельного организма. Включение этого проекта в сравнение помогает увидеть, почему слова «мозг картирован» без указания вида и метода вводят читателя в заблуждение.

Таблица 1. Сопоставление проектов: объект, измерение и границы вывода

Проект	Объект и масштаб	Что становится доступно	Чего результат не устанавливает
НСР [2; 3]	Живые люди; макроуровень	Сопоставление сетей, изображений и поведения между участниками	Полный список клеточных контактов

Проект	Объект и масштаб	Что становится доступно	Чего результат не устанавливает
H01 [4]	Малый фрагмент человеческой коры; микроскопический уровень	Детальная реконструкция клеток и синапсов образца	Строение всего человеческого мозга
MICrONS [5]	Фрагмент зрительной коры мыши	Сопоставление активности и микроструктуры связей	Универсальное объяснение человеческой психики
FlyWire [6]	Мозг взрослой самки дрозофилы	Карта клеточных соединений выбранного мозга	Полная динамика поведения или карта мозга человека

Таблица составлена автором доклада по указанным публикациям. Проекты сопоставлены по смыслу измерения, а не по соревнованию количества клеток. Такое сравнение показывает взаимодополняемость подходов: межиндивидуальные исследования, реконструкция ткани, совмещение активности со структурой и описание целого мозга небольшого организма решают разные части общей задачи.

5. Ограничения и открытые вопросы

Первое ограничение — неполнота соответствия структуры функции. Для объяснения поведения недостаточно знать, какие элементы соединены. Нужно понимать условия их активности, характер передачи сигнала и состояние организма. Поэтому коннектом разумнее рассматривать как пространство возможных взаимодействий, которое требует функциональной проверки. Научная ценность карты не уменьшается от признания этого ограничения: становится яснее, какие эксперименты она позволяет спланировать.

Второе ограничение связано с индивидуальностью и выборкой. Детальная карта одного образца может раскрыть неизвестную организацию соединений, но сама по себе не определяет распространённость обнаруженного признака. Вопрос «что существует в этом образце?» отличается от вопроса «насколько это типично?». В человеческих

исследованиях к этому добавляются условия получения ткани, возрастные особенности и история участника. Вывод о норме требует отдельного основания, а не только высокого разрешения изображения.

Третье ограничение — зависимость результата от анализа. Крупные массивы требуют автоматической обработки, но автоматизация не отменяет проверку. Если ошибочная связь включена в сеть, последующие вычисления могут быть математически правильными относительно неверного входного описания. Следовательно, качество реконструкции и качество выводов нужно контролировать на разных этапах. Показатель числа исправленных ошибок полезен лишь вместе с пониманием того, что именно и каким способом проверялось.

Наконец, размер массива не равен силе объяснения. Миллионы наблюдений внутри одного фрагмента ткани не превращаются в миллионы независимых участников. Большое количество измеренных элементов повышает детализацию описания объекта, но не автоматически расширяет область обобщения. Это различие особенно важно, когда результаты коннектомики пересказывают вне исходной научной задачи.

6. Перспективы и возможное применение

Наиболее содержательная перспектива коннектомики — соединение карт разных масштабов с экспериментами, способными проверять гипотезы. Вместо общего утверждения «сеть связана с восприятием» можно поставить более определённый вопрос: какая организация связей совместима с наблюдаемой обработкой стимула и какие альтернативные модели дают разные предсказания? Тогда карта помогает выбрать между объяснениями и спланировать следующие измерения.

Для подготовки психолога эти данные полезны в изучении системной организации внимания, восприятия и памяти. Но переход к психологическому понятию требует аккуратной операционализации: нужно указать задание, измеряемый результат и способ сопоставления с сетевыми

данными. Нельзя начинать с привлекательного названия способности, а затем объявлять любое отличие изображения её объяснением. Коннектомика побуждает связывать анатомическое описание с конкретным исследовательским вопросом.

В качестве учебного применения можно предложить сравнительный семинар. Студенты выбирают по одной фигуре из публикаций НСР и MICrONS, определяют объект, тип данных и единицу анализа, затем формулируют один допустимый и один недопустимый вывод. Это не проведение нового эксперимента, а упражнение в проверке интерпретаций. Его результатом становится умение отличать изображённую связь, модель обработки и утверждение о функции.

Другой перспективный путь — повторный анализ открытых данных при точной фиксации используемой версии и метода. Такой подход позволяет обсуждать воспроизводимость на конкретном материале. Однако открытая доступность не снимает обязанности соблюдать условия использования и защиты данных. Для учебной работы разумно выбирать обезличенные, разрешённые к использованию наборы и ставить вопросы, соразмерные уровню подготовки и вычислительным возможностям.

Прямые клинические обещания в настоящем докладе не делаются. Возможность исследовать сетевые различия ещё не подтверждает пригодность конкретного показателя для решения об отдельном человеке. Сначала необходимы независимые проверки, оценка ошибок и ясное понимание того, какое решение такой показатель должен улучшать. Перспектива коннектомики состоит в развитии проверяемого знания, а не в замене этой работы эффектной визуализацией.

Заключение

Коннектомика расширяет анатомическое описание нервной системы, делая связи самостоятельным объектом исследования. Её особенности — сетевое представление, работа на нескольких масштабах, соединение

методов и необходимость обработки крупных массивов. HCP, H01, MICrONS и FlyWire демонстрируют разные способы продвижения: исследование человеческой макросвязности, подробную реконструкцию ткани, сопоставление активности со структурой и картирование целого мозга модельного организма.

Главный вывод заключается в необходимости соотносить результат с объектом и методом. Известная структура не сообщает автоматически обо всей функции, согласованность сигналов не доказывает прямую причинную связь, а детальность одного образца не устанавливает универсальную норму. Практически полезное применение начинается с ясного вопроса и проверки границ вывода. Для будущего психолога это означает умение читать данные о мозге без сведения сложной психической деятельности к одной картинке или одному числовому показателю.

Список источников

1. Sporns O., Tononi G., Kötter R. The Human Connectome: A Structural Description of the Human Brain // PLoS Computational Biology. 2005. Vol. 1, no. 4. e42. DOI: 10.1371/journal.pcbi.0010042.
2. Van Essen D. C., Smith S. M., Barch D. M. et al. The WU-Minn Human Connectome Project: An Overview // NeuroImage. 2013. Vol. 80. P. 62–79. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2013.05.041.
3. Van Essen D. C., Ugurbil K., Auerbach E. et al. The Human Connectome Project: A Data Acquisition Perspective // NeuroImage. 2012. Vol. 62, no. 4. P. 2222–2231. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2012.02.018.
4. Shapson-Coe A., Januszewski M., Berger D. R. et al. A Petavoxel Fragment of Human Cerebral Cortex Reconstructed at Nanoscale Resolution // Science. 2024. Vol. 384, no. 6696. eadk4858. DOI: 10.1126/science.adk4858.
5. The MICrONS Consortium. Functional Connectomics Spanning Multiple Areas of Mouse Visual Cortex // Nature. 2025. Vol. 640. P. 435–447. DOI: 10.1038/s41586-025-08790-w.
6. Dorkenwald S., Matsliah A., Sterling A. R. et al. Neuronal Wiring Diagram of an Adult Brain // Nature. 2024. Vol. 634. P. 124–138. DOI: 10.1038/s41586-024-07558-y.

Основание и сведения об издании

РПД «Анатомия центральной нервной системы», набор 2025, с. 14, тема доклада № 6. Файл программы обновлён 22.06.2026.

Авторский учебный доклад Кладовой ГИПСР. Сведения проверены по указанным публикациям; включены результаты 2024–2025 годов. Основание — опубликованная РПД набора 2025. РПД не задаёт число страниц и параметры оформления темы; использован редакционный академический формат. Доклад не заменяет последующее участие в дискуссии и сверку указаний преподавателя.

Программа: <https://disk.yandex.ru/d/ezdUIpO6jL4JDw> (проверено 11.09.2026). Бесплатно для личного учебного использования.